POLITECNICO DI TORINO

DOTTORATO DI RICERCA IN BENI CULTURALI

XXIV



GIS 3D: STUDIO E APPLICAZIONE ALLA DOCUMENTAZIONE DEI BENI CULTURALI

Erik Costamagna

COORDINATORE DEL CORSO DI DOTTORATO
Prof. Costanza Roggero

TUTORE:
Arch. Antonia Spanò



GIS 3D: STUDIO E APPLICAZIONE ALLA DOCUMENTAZIONE DEI BENI CULTURALI by Erik Costamagna is licensed under a Creative Commons Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 3.0 Unported License.

alla mia famiglia

ABSTRACT

Il risultato di più di mezzo secolo di attività di ricerca a livello nazionale e internazionale sulla documentazione dei beni culturali ha prodotto un progressivo allargamento del concetto di bene culturale e dei compiti della tutela. A partire dalle prime formulazioni si è giunti ad una definizione più ampia che tiene conto della complessità del fenomeno e della sua stretta integrazione con il territorio. Quest'evoluzione ha portato anche ad un mutamento delle politiche di tutela e alla nascita del concetto di valorizzazione. Da una visione basata esclusivamente sulla salvaguardia del bene si è passati ad una visione che fa del bene stesso il centro delle politiche di sviluppo. Questo cambiamento nell'atteggiamento di fronte alle politiche di tutela ha portato ad una maggiore attenzione all'attività di documentazione degli interventi sui beni culturali e ad un sempre maggiore sviluppo dei sistemi per una gestione integrata dei dati.

Lo sviluppo tecnologico che ha segnato il passaggio alla società dell'informazione ha rivoluzionato profondamente il campo della Geomatica sia sul versante dei sistemi di acquisizione che di quelli di gestione dei dati. I sistemi di posizionamento satellitare, scansione laser e gli sviluppi della fotogrammetria digitale ci metteno a disposizione un'ampia gamma di supporti metrici che necessitano di una corretta integrazione nei sistemi di gestione (GIS). Questi ultimi hanno conosciuto una diffusione sempre maggiore grazie allo sviluppo delle tecnologie informatiche che hanno contribuito a trasformarli da strumenti cartografici a sistemi che permettono elaborate analisi spaziali e tematiche. Un' importante caratteristica dei GIS, resa evidente dall'esigenza di documentare i sempre più diffusi interventi di trasformazione urbana, è quella di integrare le funzioni di rappresentazione e analisi tridimensionale del dato metrico al livello di dettaglio richiesto dalle esigenze di documentazione dei beni culturali. Questo livello di dettaglio implica la capacità dei DBMS, ovvero dei GIS 3D, di svolgere operazioni di analisi spaziale sulle coordinate $< x, y, z >$, oltre che di integrare le funzioni di rappresentazione dei sistemi CAD.

A queste esigenze si cercherà di dare risposta attraverso la progettazione e realizzazione di un modello 3D semantico, multiscala e multivalente. L'implementazione del modello in un database tridimensionale consentirà di sperimentare le analisi ed elaborazioni di dati spaziali caratterizzati da un elevato contenuto geometrico ad una scala che va dalla cartografia urbana alla progettazione architettonica di dettaglio. L'organizzazione dei dati terrà conto dei più recenti sviluppi della ricerca nel campo dei modelli spaziali 3D e dei principali standard nazionali e internazionali nel campo dell'informazione geografica e della documentazione dei beni culturali. Una particolare attenzione sarà dedicata all'analisi della rispondenza del modello implementato con le necessità di questo tipo di documentazione: la complessità del valore semantico, la possibilità di estendere e adattare il modello a diversi contesti applicativi e la possibilità di personalizzare la rappresentazione dei dati.

Indice

I. LA DOCUMENTAZIONE METRICA DEI BENI CULTURALI 1

1. Introduzione **3**
- 1.1. Finalità ed esigenze nella documentazione dei beni culturali 3
- 1.2. La documentazione dei beni culturali 4
- 1.3. Area di interesse e ambito di applicazione 7
- 1.4. Percorso di ricerca 12

2. Gli standard nella documentazione dei beni culturali **15**
- 2.1. Acquisizione dei dati 17
- 2.2. Gestione e pubblicazione dei dati 23

II. GESTIONE DEI DATI 27

3. I DBMS **29**
- 3.1. RDBMS 31
- 3.2. OODBMS 34
- 3.3. Componenti del DBMS 37

4. Gli standard per l'archiviazione e l'interscambio dei dati **39**
- 4.1. UML 39
- 4.2. XML 44

III. MODELLAZIONE SPAZIALE 53

5. Approcci alla modellazione dei dati **55**

6. Spazio metrico e spazio topologico **61**

7. Le rappresentazioni spaziali **69**
- 7.1. Introduzione 69
- 7.2. Modelli di superficie 74
- 7.3. Modelli solidi 77

8. Modelli topologici **85**
- 8.1. *Cell graph* 85

8.2. 3D TIN 86
8.3. TEN 87
8.4. 3D FDS 89
8.5. SSM 90

9. Le relazioni spaziali **93**
9.1. Relazioni metriche 93
9.2. Relazioni topologiche 96
9.3. Indicizzazione 97

10. Standard e linguaggi di modellazione **101**
10.1. Gli standard per l'interscambio di formati grafici 101
10.2. Gli standard per l'informazione geografica 102

11. Strumenti applicativi **135**
11.1. CAD e BIM 135
11.2. GIS 138

12. Applicazioni **141**
12.1. Gestione dei dati metrici in ambito urbano 141
12.2. Gestione della documentazione metrica dei beni culturali 144

IV. IMPLEMENTAZIONE DEL DATABASE SPAZIALE 3D 149

13. Caratteristiche del caso studio **153**
13.1. Introduzione storica 153
13.2. Gli elaborati metrici 154

14. Modello geometrico **161**
14.1. 1:50 163
14.2. LOD4 (1:100) 164
14.3. LOD3 (1:200) 165
14.4. LOD2 (1:1000 - 1:500) 167
14.5. LOD1 (1:2000 - 1:1000) 168

15. Modello tematico **171**
15.1. L'edificio e le sue parti 172
15.2. Il modello del terreno 178
15.3. L'aspetto superficiale 180

16. Serializzazione **183**

17. Gestione dei dati **189**
17.1. XML database 189
17.2. Geodatabase 196

18. Modellazione di un fenomeno culturale **201**
18.1. Modello concettuale UML 202

18.2. Schema XML 205

V. APPENDICI 211

Standard 213

3. Metric Survey Specifications for English Heritage 213
4. Notazioni UML 215
5. Specifiche ISO 216
6. *OGC Abstract Specification* 222
7. Geographic Markup Language 225
8. City Geographic Markup Language 228
9. Specifiche IntesaGIS 241

Implementazione del database spaziale 243

10. Gli elaborati metrici utilizzati 243
11. Il modello geometrico 243
12. Modello tematico 249
13. XML database 249
14. Geodatabase 253
15. Modellazione di un fenomeno culturale 255

Parte I.

LA DOCUMENTAZIONE METRICA DEI BENI CULTURALI

1. Introduzione

1.1. Finalità ed esigenze nella documentazione dei beni culturali

Lo scopo di questa introduzione è quello di definire brevemente le caratteristiche dell'applicazione dei Sistemi Informativi Spaziali nel rilievo metrico dei beni culturali, di illustrare l'ambito di applicazione della mia ricerca e di definirne obiettivi e contenuti. A partire da una breve analisi del quadro normativo nazionale [72] ed internazionale e delle varie istituzioni e iniziative nel campo della normalizzazione dei prodotti metrici del rilievo verrà affrontato il problema dell'adozione di un sistema di qualità condiviso che corrisponda alle esigenze di tutti i soggetti diversamente coinvolti nel processo di formazione del valore culturale di cui la documentazione è veicolo di trasmissione. L'analisi del quadro normativo e delle iniziative per la normalizzazione dei processi che coinvolgono i beni culturali sono indispensabili per comprendere la complessità del fenomeno e le istanze di cui sono portatori i vari soggetti coinvolti.

La definizione di bene culturale adottata dalla normativa nazionale è una delle più complete ed esplicative della complessità dei fenomeni descritti ed è il punto di arrivo di un lungo percorso iniziato con le prime formulazioni della Carta di Atene [2] attraverso quelle successive della Carta di Venezia [39], nella formulazione dell'UNESCO [91] e della Comunità Europea [88].

> «1. Il patrimonio culturale è costituito dai beni culturali e dai beni paesaggistici. 2. Sono beni culturali le cose immobili e mobili che [...] presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà.»[1]

Il territorio, inteso quindi come contesto culturale, è diventato parte integrante del bene perché è nel riconoscimento che la comunità fa di esso che si determina il suo valore culturale e perché questo valore si esplica soprattutto nelle relazioni che temporalmente e geograficamente ciascun bene intrattiene con il suo territorio. I beni culturali sono sempre più considerati come una risorsa da valorizzare soprattutto a livello locale e la loro tutela contribuisce a innescare processi di sviluppo.

> «*Each Party undertakes to adopt integrated conservation policies which: [...] include the protection of the architectural heritage as an essential town and country planning objective and ensure that this requirement is taken into account at all stages both in the drawing up of development plans and in the procedures for authorising work.*»[2]

[1] Repubblica Italiana, *Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002*, n. 137, art. 1 cc. 1,2

[2] *European Cultural Convention*, Parigi, 1954, Art.10, c.1

> «*The concept of a historic monument embraces not only the single architectural work but also the urban or rural setting in which is found the evidence of a particular civilization, a significant development or a historic event.*»[3]

Le diverse definizioni che sono state date di patrimonio culturale nel corso del tempo hanno sempre più ampliato il significato del termine portandolo ad includere anche le manifestazioni della cultura umana che sono intangibili e immateriali. Questo processo è in gran parte dovuto al fatto che i beni culturali vengono intesi oramai come un fenomeno complesso per cui la determinazione del valore culturale del bene, che in passato era legata essenzialmente alle caratteristiche del bene inteso singolarmente, oramai fa sempre più riferimento al contesto nel quale il bene si colloca e alle relazioni che con esso intrattiene [41].

> «*Records of monuments, groups of buildings and sites may include tangible as well as intangible evidence, and constitute a part of the documentation that can contribute to an understanding of the heritage and its related values.*»[4]

1.2. La documentazione dei beni culturali

> «*Recording is the capture of information which describes the physical configuration, condition and use of monuments, groups of buildings and sites, at points in time, and it is an essential part of the conservation process.*
>
> *[...]The recording of the cultural heritage is essential:*
>
> > *To acquire knowledge in order to advance the understanding of cultural heritage, its values and its evolution;*
> >
> > *To promote the interest and involvement of the people in the preservation of the heritage through the dissemination of recorded information.*
> >
> > *To permit informed management and control of construction works and of all change to the cultural heritage;*
> >
> > *To ensure that the maintenance and conservation of the heritage is sensitive to its physical form, its materials, construction, and its historical and cultural significance.*
>
> *Recording should be undertaken to an appropriate level of detail in order to:*
>
> > *Provide information for the process of identification, understanding, interpretation and presentation of the heritage, and to promote the involvement of the public;*
> >
> > *Provide a permanent record of all monuments, groups of buildings and sites that are to be destroyed or altered in any way, or where at risk from natural events or human activities;*

[3] *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*, Venezia, 1964, Art.1

[4] ICOMOS, *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*, Sofia, 1996

> *Provide information for administrators and planners at national, regional or local levels to make sensitive planning and development control policies and decisions;*
>
> *Provide information upon which appropriate and sustainable use may be identified, and the effective research, management, maintenance programmes and construction works may be planned.*
>
> *Recording of the cultural heritage should be seen as a priority, and should be undertaken especially:*
>
> *When compiling a national, regional, or local inventory;*
>
> *As a fully integrated part of research and conservation activity;*
>
> *Before, during and after any works of repair, alteration, or other intervention, and when evidence of its history is revealed during such works;*
>
> *When total or partial demolition, destruction, abandonment or relocation is contemplated, or where the heritage is at risk of damage from human or natural external forces;*
>
> *During or following accidental or unforeseen disturbance which damages the cultural heritage;*
>
> *When change of use or responsibility for management or control occurs.»*[5]

La documentazione dei beni culturali è alla base di ogni politica di tutela, restauro e valorizzazione ed ha come fine l'acquisizione di conoscenze utili alla comprensione del loro valore, quello di fornire gli strumenti per gestione delle trasformazioni e dello sviluppo del bene, la disseminazione delle informazioni per coinvolgere il contesto socio-culturale nei processi di valorizzazione [41]. Queste finalità sono condizionate dalla complessità del bene stesso dovuta in gran parte al suo legame con il territorio e al continuo mutamento del contesto socio-culturale; aspetti, questi che condizionano fortemente le caratteristiche attese della documentazione prima, durante e dopo ogni intervento. La documentazione e l'analisi del patrimonio culturale è un processo che sta alla base e quindi precede gli interventi di tutela o valorizzazione, ma accompagna anche tutte le trasformazioni del bene e del suo contesto in un processo continuo di arricchimento della conoscenza. Essa infatti non si esaurisce con il progetto di restauro o di valorizzazione, ma deve accompagnare tutte le fasi più rilevanti nella gestione del bene contribuendo con il suo apporto alla tutela e valorizzazione.

I soggetti coinvolti nell'attività di tutela, restauro e valorizzazione comprendono da un lato i professionisti del settore, a diverso titolo coinvolti nella documentazione dei beni culturali e portatori di interessi specifici e la comunità dei potenziali fruitori che invece condivide i valori di cui i beni culturali sono portatori contribuendo alla formazione degli stessi. Con un termine preso a prestito dall'amministrazione aziendale questi due gruppi di soggetti, spesso portatori di interessi ed esigenze diverse, sono chiamati *stakeholders* e *shareholders*. Questa categorizzazione, che naturalmente è solo un modo di analizzare il problema, ha l'importanza di mettere in luce il diverso peso che i diversi soggetti hanno nel processo in questione. Essa però non dice nulla in merito al diverso contributo che ciascun soggetto ha nel processo e le relative esigenze di

[5] ICOMOS, *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*, Sofia, 1996.

cui è portatore. Analizzando il problema da questo punto di vista possiamo identificare altre due categorie di soggetti, entrambe costituite da *stakeholders* e *shareholders*: i produttori e gli utilizzatori di informazioni. I produttori di informazioni sono tutte quelle figure coinvolte nel processo di acquisizione e gestione dei dati che vanno dai professionisti, che lavorano per le istituzioni pubbliche o private preposte alla tutela, agli specialisti della ricerca che operano nel settore dei beni culturali. Le esigenze di questi soggetti contribuiscono a definire le *best practises* che sono determinabili e valutabili in termini di procedure e metodi utilizzati nell'acquisizione ed elaborazione dei dati e in tutti gli aspetti connessi con l'integrazione dei dati in uno schema comune e condiviso dalle varie discipline coinvolte. Dal questo punto di vista essi rappresentano l'indispensabile controparte metodologica applicativa delle esigenze di qualità del prodotto finale espresse dall'altra categoria: gli utilizzatori. Essi comprendono da una parte le stesse istituzioni pubbliche preposte alla tutela che sovrintendono all'acquisizione e all'elaborazione dei dati e dall'altra i destinatari dell'attività di valorizzazione. Questi ultimi nell'accezione più vasta comprendono la collettività che si riconosce nel valore culturale del bene e l'insieme degli utenti finali è a vario titolo rappresentato dalle istituzioni scolastiche, da quelle turistiche, dai musei e da associazioni o fondazioni private. Le esigenze di tutti questi soggetti sono esprimibili in termini di qualità attesa del prodotto finale e coinvolgono tutti gli aspetti connessi con l'archiviazione e la comunicazione dei dati, condizionando quindi le caratteristiche della documentazione. Esse mutano in relazione al mutare del contesto socio-culturale e allo stesso progresso nell'attività di conoscenza dei beni culturali che, man mano che si amplia, contribuisce a ridefinire le priorità della documentazione.

Queste schematizzazioni introdotte, che inevitabilmente offrono una visione limitata dei problemi connessi, ci fanno però capire da un lato la diversità degli interessi di produttori e utilizzatori, interessi spesso divergenti tra loro e generatori di conflitti e dall'altro la necessità di redistribuire il peso decisionale di tutti quei soggetti che possono trarre beneficio dalle politiche di valorizzazione (*shareholders*). Per fare un esempio di come possano essere complesse le scelte relative alla documentazione di un bene culturale si pensi all'attività di tutela delle evidenze archeologiche che, specie in ambito urbano, oltre a tutte le esigenze operative connesse all'attività edilizia deve tenere conto anche dei vari contributi che nel corso del tempo la documentazione ha apportato allo studio dell'evoluzione dell'insediamento abitativo cui il bene culturale appartiene. Questi contributi fanno si che la scelta, che spesso è del tipo esclusivo per esigenze tecniche e operative, possa privilegiare, in ragione della necessità di un maggiore approfondimento della conoscenza, un determinato aspetto o una particolare fase storica del bene. Queste scelte saranno poi quelle che orienteranno i sistemi e le tecniche di acquisizione utilizzate e quindi anche la qualità del prodotto finale. Anche in questo caso si evince come sia necessario prescindere dalle caratteristiche del bene inteso singolarmente, che possono essere anche molto rilevanti, ma contestualizzare queste caratteristiche nel territorio culturale con cui si relaziona il bene e quindi anche con lo stato di avanzamento della ricerca in quel determinato contesto. La documentazione è un processo continuo di arricchimento di significati che determina la necessità di disporre di uno schema condiviso dove collocare le informazioni e attraverso il quale è possibile scambiarle. In quest'ottica l'adozione di un sistema condiviso di qualità risponde all'esigenza di coniugare le finalità e le esigenze dei vari soggetti coinvolti nel processo di documentazione. Questo sistema presuppone sia la definizione degli aspetti

metodologici dell'attività di documentazione sia quelli prestazionali atti a garantire il livello finale di qualità atteso.

Le finalità del rilievo metrico dei beni culturali, quindi, influiscono sia sulla qualità dei dati raccolti che sulla loro organizzazione e rappresentazione. Queste finalità comprendono aspetti diversi che vanno dalla conoscenza geometrica del bene, l'analisi delle caratteristiche tipologiche e costruttive, l'analisi dello stato di conservazione e il rilievo strutturale, solo per citarne alcune. Il processo di raccolta ed elaborazione delle informazioni è infatti un attività continua di arricchimento di valori e significati che coinvolge in egual misura tutti i soggetti che in diversa misura contribuiscono alla rappresentazione e trasmissione del valore culturale del bene [41].

> «*Typically the recording process may involve skilled individuals working in collaboration, such as specialist heritage recorders, surveyors, conservators, architects, engineers, researchers, architectural historians, archaeologists above and below ground, and other specialist advisors.*»[6]

Da queste premesse è evidente come questo processo sia un'attività che deve essere necessariamente multidisciplinare in quanto, convolgendo discipline diverse che ognuna delle quali contribuisce alla produzione ed elaborazione delle informazioni, deve mettere da parte l'impostazione specialistica propria di ciascuna disciplina per lasciare posto ad una visione più ampia che rifletta la complessità del problema [33]. Il rilievo metrico fa parte di questo processo di conoscenza ed è caratterizzato da una selezione e interpretazione critica degli elementi dell'oggetto che andiamo ad indagare e comprende sia l'acquisizione di dati spaziali che la selezione e interpretazione dei dati stessi.

1.3. Area di interesse e ambito di applicazione

La documentazione dei beni culturali comprende un ambito di interesse sempre più vasto, come abbiamo attraverso le codifiche normative a livello nazionale e internazionale. A partire da questi riferimenti normativi è necessario specificare più precisamente la categoria di beni culturali che analizzeremo nella presente ricerca. Oggetto del presente studio sono le tecniche di analisi e rilevamento applicate alla documentazione metrica del patrimonio architettonico così come è stato definito dall'UNESCO nella Convenzione di Parigi del 1972 con il termine 'cultural heritage' [91] e successivamente ripreso dall'Unione Europea nella Convenzione di Granada [89] con il termine 'architectural-heritage'[7].

> «*For the purposes of this Convention, the following shall be considered as 'cultural heritage':*
>
> *monuments : architectural works, works of monumental sculpture and painting, elements or structures of an archaeological nature, inscriptions, cave dwellings and combinations of features, which are of outstanding universal value from the point of view of history, art or science;*

[6] ICOMOS, *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*, Sofia, 1996, p.50

[7] D'ora innanzi il termine 'beni architettonici' sarà utilizzato come traduzione di 'architectural heritage' nel contesto del significato descritto nella Convenzione di Granada

> *groups of buildings : groups of separate or connected buildings which, because of their architecture, their homogeneity or their place in the landscape, are of outstanding universal value from the point of view of history, art or science;*
>
> *sites : works of man or the combined works of nature and of man, and areas including archaeological sites which are of outstanding universal value from the historical, aesthetic, ethnological or anthropological points of view.»*[8]

> *«For the purposes of this Convention, the expression "architectural heritage" shall be considered to comprise the following permanent properties:*
>
> *monuments: all buildings and structures of conspicuous historical, archaeological, artistic, scientific, social or technical interest, including their fixtures and fittings;*
>
> *groups of buildings: homogeneous groups of urban or rural buildings conspicuous for their historical, archaeological, artistic, scientific, social or technical interest which are sufficiently coherent to form topographically definable units;*
>
> *sites: the combined works of man and nature, being areas which are partially built upon and sufficiently distinctive and homogeneous to be topographically definable and are of conspicuous historical, archaeological, artistic, scientific, social or technical interest.»*[9]

I progressi scientifici dell'ultima metà del secolo scorso nel campo delle tecnologie e dei sistemi di trasmissione ed elaborazione delle informazioni, sono stati così importanti da coinvolgere quasi tutte le discipline della conoscenza umana, determinando un cambiamento profondo nella nostra società, cambiamento segnato dal passaggio dalla società industriale alla società dell'informazione. Lo sviluppo tecnologico ha trasformato profondamente anche i sistemi di acquisizione delle informazioni metriche. La diffusione delle tecnologie di misura elettroniche e di posizionamento satellitare, insieme ai sistemi per il trattamento automatico delle informazioni, hanno rivoluzionato il rilievo metrico. Negli ultimi dieci anni abbiamo visto la diffusione di nuove tecniche di acquisizione di come il LiDAR (*Light Detection And Ranging*), il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e sistemi di trattamento automatico per la produzione di modelli digitali di elevazione (DEM, *Digital Elevation Model*) e la correlazione di immagini (*image-matching*). La diffusione di queste nuovi sistemi e tecniche ci ha permesso di acquisire ed elaborare i dati più velocemente, con un maggior controllo della precisione e mettendo a disposizione una mole notevole di informazioni diversamente strutturate e codificate.

L'evoluzione dei sistemi di gestione delle basi di dati (*Data Base Management System* o DBMS) ha portato alla separazione della struttura logica del dato da quella fisica, vedendo prima la nascita del modello relazionale nella seconda metà del secolo scorso e poi verso la fine del secolo di quello ad oggetti (*object-oriented*). Il modello relazionale è diffuso in numerosi settori applicativi grazie alla semplice formalizzazione logico-matematica ed è attualmente il sistema più diffuso nei DBMS. Il modello ad oggetti, invece, è stato elaborato successivamente per superare alcuni limiti del modello

[8] UNESCO, *Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage*, Parigi, 1972, art. 1

[9] UE, *Convention for the Protection of the Architectural Heritage of Europe*, Granada, 1985, art. 1

relazionale nel descrivere la complessità di alcuni fenomeni e per garantire maggiore flessibilità al modello. Le caratteristiche di incapsulamento, ereditarietà e polimorfismo del modello ad oggetti consentono infatti di incorporare procedure e metodi nei dati, di rappresentare correttamente aggregazioni complesse di elementi più semplici e di differenziare le procedure di accesso agli stessi dati. I Sistemi Informativi Spaziali (*Geographic Information System* o GIS), applicazione dei DBMS agli oggetti spaziali, sono nati anch'essi nella seconda metà del secolo scorso con la nascita i diffusione degli RDBMS (*Relational Database Management Systems*) e hanno visto un crescente sviluppo delle potenzialità applicative e degli ambiti di interesse. La caratteristica dei GIS di riuscire associare le normali funzioni di indicizzazione, analisi e ricerca dei DBMS all'universo delle proprietà geometriche, costituite da rapporti metrici e topologici, li ha resi uno strumento indispensabile nella gestione di questo tipo di informazioni e inoltre ha aperto nuovi e inattesi scenari di indagine per un sistema che, da strumento applicativo, sta sempre più diventando scienza proprio per la pluralità delle discipline coinvolte nei vari ambiti di interesse.

L'utilizzo del GIS è oramai una prassi in molte strutture che si occupano di archiviare i dati spaziali nei più svariati settori di applicazione come la pianificazione territoriale, la gestione delle emergenze e le scienze sociali. Negli ultimi anni la ricerca nel campo delle applicazioni dei sistemi informativi spaziali si è allargata fino a comprendere i fenomeni insediativi urbani dove rappresenta un nuovo terreno di confronto per gli strumenti della Geomatica e della rappresentazione per l'analisi e la gestione dello sviluppo urbano e di tutti i fenomeni ad esso correlati. Questo passaggio dell'applicazione dei sistemi informativi alla scala urbana rappresenta un sforzo interessante nella direzione di una sempre maggiore integrazione di tutte le discipline che concorrono a definire il fenomeno abitativo e soprattutto di quelle urbanistiche e della progettazione con la gestione del processo edilizio. Lo sviluppo tecnologico ha trainato questo cambiamento, mentre l'elaborazione di un sistema concettuale e logico per la rappresentazione delle informazioni ha seguito un cammino più lento.

La caratteristica dei GIS di essere un sistema dotato di una serie di strumenti applicativi per la gestione integrata delle informazioni spaziali e tematiche ha determinato una rapida diffusione nell'ambito della tutela e valorizzazione dei beni culturali, caratterizzati dalla particolare ricchezza semantica del valore associato alla componente spaziale. L'insieme delle relazioni complesse che questi hanno con il territorio e le politiche di sviluppo ad esso correlate rappresentano il secondo, importante, motivo di diffusione degli strumenti dei database spaziali anche nel settore dei beni culturali. La gestione delle informazioni relative alla diffusione e allo stato di conservazione del patrimonio culturale sono un importante strumento per la pianificazione di tutte le politiche di valorizzazione del territorio inteso nel suo significato più ampio, cioè di paesaggio culturale [92].

> «*Cultural landscapes are cultural properties and represent the "combined works of nature and of man" designated in Article 1 of the Convention. They are illustrative of the evolution of human society and settlement over time, under the influence of the physical constraints and/or opportunities presented by their natural environment and of successive social, economic and cultural forces, both external and internal.*»[10]

[10]UNESCO, *Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritagage Convention*,

Nei territori fortemente caratterizzati dalla presenza antropica e dalla sua stratificazione nel tempo, la necessità di disporre di strumenti ha portato ad una rapida adozione dei GIS da parte enti di tutela. In Italia, ad esempio, la predisposizione da parte dell'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione, l'Istituto Centrale per il Restauro e gli altri organi del MiBAC (Ministero per i Beni e le Attività Culturali), di database catalografici a livello nazionale come il SIGEC (Sistema Generale del Catalogo) e la Carta del Rischio rappresenta l'evidenza dell'efficacia e della necessità di questi strumenti per coordinare tutti i processi coinvolti nella gestione del patrimonio. La diffusione di questi strumenti non deve però farci considerare l'applicazione dei GIS ai beni culturali un fatto concluso, al contrario ancora molti aspetti rimangono e suscettibili di approfondimenti. Le caratteristiche di complessità e specificità caratterizzano i beni culturali nella loro duplice veste di oggetti spaziali e di memorie storiche, costituite da una stratificazione di contenuti e relazioni che li legano tra di loro. Una delle sfide dell'applicazione delle nuove tecnologie alle tecniche di rilevamento e analisi dei dati spaziali nella documentazione del patrimonio è proprio la capacità di queste tecniche e sistemi di restituire la complessità di questi fenomeni e adattarsi in maniera flessibile alla specificità del dato. Il bene culturale indagato, che sia un organismo architettonico oppure un sito archeologico, presenta un grado di complessità elevato e caratteristiche specifiche che ci impongono un'attenta progettazione della struttura con cui vengono organizzati e gestiti i dati, sulla base della quale vengono determinate le possibilità di interrogazione e di analisi sugli stessi. Solitamente le regole e la metodologia con cui questi dati vengono organizzati e gestiti hanno bisogno di molto tempo per essere adeguate alle necessità e alle finalità della documentazione il che finisce inevitabilmente per cristallizzare una struttura semantica e logica costruita e consolidata attorno ad un determinato contesto culturale che l'ha prodotta. Se da una parte è stata riconosciuta l'importanza che il patrimonio culturale ha nello sviluppo del territorio dall'altra è sempre più matura la sensibilità che esso rappresenti un valore universale che travalica i confini geografici e temporali. Questa sensibilità impone l'adozione di un sistema di qualità condiviso, costituito da norme e buone pratiche, che permetta la trasmissione di quei valori universali di cui i beni sono portatori. Queste norme, oltre che essere esaustive nei confronti della complessità della materia trattata, devono anche essere in grado di adattarsi alla specificità e talvolta unicità del singolo bene culturale. La predisposizione di modelli concettuali e logici che rispondano alle esigenze di normalizzazione e che, nello stesso tempo, presentino caratteristiche di flessibilità rappresenta sicuramente una delle più importanti sfide nell'ambito della normalizzazione di questo settore.

Riguardo all'aspetto del valore semantico del dato importanti passi sono stati condotti in questa direzione con l'applicazione del modello *object-oriented* alla gestione dei database. Questo modello, che avremo modo di analizzare in modo approfondito successivamente, grazie alle caratteristiche di incapsulamento, polimorfismo ed ereditarietà possiede le proprietà richieste per rappresentare la complessità e specificità degli oggetti spaziali [25][65]. L'applicazione del paradigma *object-oriented* è codificata attraverso norme precise e la sua adozione come modello concettuale per la modellazione dei dati spaziali è una prassi per le più importanti organizzazioni di normazione nazionali e internazionali come l'ISO (*International Standard Organization*), l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) o l'Intesa Stato-Regioni (IntesaGIS). Dal punto di vista della

Parigi, 2005, Cap. II.A par. 45

sua applicazione ai DBMS, invece, molti sforzi devono ancora essere compiuti, la maggior parte dei GIS e in più in generale tutti i DBMS infatti sono basati sul modello logico relazionale. La traduzione del modello concettuale *object-oriented* verso quello logico relazionale presenta una serie di problemi noti (*impedance-mismatch*), legati soprattutto alla perdita di valore semantico e alla maggiore onerosità delle operazioni modifica della struttura del database come per esempio l'estensione delle classi o la definizione di nuove procedure.

La gestione dell'informazione spaziale da parte dei database spaziali presenta anch'essa degli aspetti che necessitano degli approfondimenti, soprattutto per quanto concerne la componente applicativa dei sistemi. Gli strumenti dei GIS a disposizione sul mercato, che siano essi software proprietari oppure *open-source*, sono dotati quasi tutti di funzionalità di analisi e gestione della componente 2D dell'informazione spaziale, mentre, salvo poche eccezioni, sono pressoché assenti le funzionalità di gestione del dato 3D. Caratteristiche, queste, che invece sono una delle funzionalità principali ed ampiamente sviluppate da parte dei sistemi CAD. Nati entrambi grazie alla rivoluzione tecnologica che ha segnato il passaggio alla società dell'informazione, i GIS e i sistemi CAD si sono affermati in due settori diversi sia per il contesto applicativo che per la tipologia dei dati trattati. I sistemi CAD si sono diffusi nel settore della progettazione architettonica, strutturale e nel disegno industriale riuscendo a gestire efficacemente tutti gli aspetti connessi con la modellazione tridimensionale della componente geometrica del dato in un sistema di riferimento cartesiano, con un elevato grado di dettaglio e con la capacità di restituzioni foto-realistiche. Al contrario i GIS si sono diffusi inizialmente nell'ambito cartografico per la loro capacità di riuscire a gestire i differenti sistemi di proiezione cartografici e per le capacità di analisi spaziali sui dati rese possibili dagli strumenti dei DBMS che permettono di effettuare delle operazioni di calcolo su una base di dati strutturata secondo uno schema logico articolato che codifica le relazioni tra i dati. Questo schema logico viene utilizzato per organizzare le relazioni tra le componenti dell'informazione geometrica e quelle dell'informazione tematica consentendo ai DBMS funzionalità di analisi sulle due componenti. Questi strumenti permettono quindi ai GIS di compiere analisi spaziali e tematiche, caratteristica che i sistemi CAD possiedono in modo limitato.

Per quanto concerne il modello spaziale dei dati, che è alla base di tutti i sistemi GIS, a partire dagli anni '90 del secolo scorso importanti sforzi sono stati fatti per la ricerca di soluzioni in grado di gestire le differenti tipologie di rappresentazioni tridimensionali e le relazioni tra gli elementi che compongono la struttura geometrica. Uno degli aspetti più importanti di queste ricerche è volto alla ricerca di soluzioni che si adattino ai diversi contesti di applicazione, dalla modellazione dei fenomeni naturali a quella dei manufatti architettonici. La principale differenza tra i le due tipologie di fenomeni dal punto di vista della rappresentazione spaziali consiste nella struttura geometrica del dato e nella sua articolazione. I fenomeni naturali come per esempio gli strati geologici, presentano caratteristiche di irregolarità nella loro conformazione spaziale e un'articolazione abbastanza semplice della struttura geometrica facilmente rappresentabile tramite aggregazioni di oggetti più semplici identici fra loro. I manufatti umani e in particolar modo quelli architettonici, invece presentano solitamente una forma geometrica più regolare che però risulta molto più articolata nella sua struttura che è esprimibile solo attraverso un'attenta modellazione degli elementi costitutivi, delle loro proprietà e relazioni. Queste diverse tipologie di dato, prevedendo una diversa

articolazione dei rapporti spaziali tra gli oggetti più semplici e le loro aggregazioni e diverse tipologie di relazioni, non possono essere esaustivamente descritte da un unico modello spaziale. Nella vasta panoramica di modelli spaziali elaborati verranno presi in considerazione quelli che meglio si prestano a rappresentare gli oggetti spaziali rappresentati nel tema edificato della cartografia urbana. In questo contesto l'applicazione dei sistemi GIS ai beni culturali richiede, oltre alla necessaria gestione della componente tridimensionale, un ulteriore approfondimento di scala. Una delle caratteristiche più importanti dei documentazione metrica dei beni culturali è infatti la sua capacità di gestire il dato a differenti scale di rappresentazione che a partire da quella urbana si spingono fino alle scale architettoniche e oltre. I database spaziali multiscala rispondono infatti alla necessità di garantire la possibilità di analisi approfondite sul dato ove questo sia richiesto dalle esigenze di tutela. Queste esigenze, proprio per la natura complessa del dato, non sono sempre determinabili a priori, ma scaturiscono dall'azione conoscitiva di cui il rilievo metrico è portatore.

1.4. Percorso di ricerca

Le tematiche di ricerca della geomatica, sintetizzate precedentemente, fanno parte degli ambiti di interesse dell'unità del Politecnico - Facoltà di Architettura II di cui l'Arch. Spanò è coordinatrice. Tra queste tematiche, che riguardano l'applicazione della geomatica alla documentazione dei beni culturali, le esperienze maturate nell'ambito dei sistemi di gestione dei dati spaziali hanno costituito il punto di partenza per l'elaborazione del percorso di ricerca della presente dissertazione. Queste esperienze hanno riguardato l'applicazione dei GIS alla documentazione metrica di beni architettonici ed archeologici nell'ambito di progetti di ricerca[11] e cooperazioni con altri istituti in ambito nazionale ed internazionale[12]. Le principali finalità di queste esperienze, al di là delle differenze dei diversi contesti applicativi, riguardano la sperimentazione degli strumenti applicativi per la gestione delle caratteristiche specifiche di queste tipologie di beni che riguardano, in maniera diversa, sia la componente spaziale che quella tematica dei beni analizzati. I beni culturali sono caratterizzati da una maggiore complessità del valore semantico del dato che rappresenta il valore culturale del bene che è necessario documentare e comunicare. La capacità del sistema di riuscire a realizzare quest'obiettivo dipende essenzialmente dal sistema logico-concettuale, composto da schemi e linguaggi di definizione, e dalla sua traduzione negli strumenti applicativi.

[11] L'unità di ricerca è stata coinvolta in due progetti:

- PRIN (Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale) 2002 *Integrazione di tecniche di rilevamento nei Sistemi Informativi Territoriali per la documentazione, la conservazione e la gestione del patrimonio culturale* resp. nazionale prof. C. Monti
- PRIN 2004 Cartografia Numerica a grandissima scala per GIS a carattere architettonico-ambientale, resp. locale Spanò, nell'ambito del progetto nazionale *Strutture evolute della Cartografia numerica per i GIS e l'ambiente WEB*, resp. nazionale prof. R. Galetto.

[12] La nostra unità di ricerca è coinvolta in diverse missioni archeologiche, tra cui quella di Hierapolis di Frigia (Turchia), una cooperazione tra diverse università italiane e le autorità turche, di cui il Politecnico fa parte sin dal 1957. L'applicazione dei sistemi informativi ai dati raccolti ha permesso di effettuare analisi spaziali a diverse scale, dall'elaborazione della cartografia alle analisi di dettaglio per finalità specifiche.

Le esperienze maturate nell'ambito della rappresentazione e gestione dell'archivio metrico di un sito archeologico dalla scala cartografica a quella di dettaglio [10] e quelle maturate nell'ambito dell'integrazione dell'archivio informativo dei beni architettonici con la cartografia urbana e regionale [80][31] sono state il punto di partenza per l'elaborazione di un'analisi più approfondita sulle problematiche della gestione delle rappresentazioni 3D della componente spaziale dei dati e di quelle relative ai linguaggi di modellazione per quanto riguarda la componente tematica, problematiche che sono alla base della presente dissertazione. È stato quindi elaborato un percorso per la progettazione ed implementazione di un modello 3D semantico, multiscala e multivalente avente come base di dati un significativo esempio tratto dall'ambito degli interventi di documentazione metrica di un bene architettonico. Questo modello è stato implementato in un database con lo scopo di analizzare le possibilità di analisi e elaborazione dei dati. La significatività del caso studio utilizzato, sia sotto l'aspetto della complessità della conformazione spaziale e articolazione dei volumi che sotto l'aspetto del valore culturale è importante per garantire alla sperimentazione del modello sufficienti margini di applicabilità alla vasta panoramica dei beni architettonici. Il primo passo per la messa in opera di questi obiettivi è quello della scelta del modello concettuale, quindi di quello logico e in ultima istanza verrà scelto il modello fisico dei dati e cioè il sistema per l'implementazione del modello. La scelta del modello concettuale e di quello logico soprattutto deve essere fatta in modo da assicurare che questi diversi livelli di definizione dei dati siano coerenti tra loro. Essi infatti non sono altro che passi successivi di un processo di traduzione dei dati da un linguaggio naturale (umano) attraverso linguaggi formali come l'UML (di alto livello) fino al codice fisico (di basso livello) e viceversa. Questi passaggi di traduzione devono far si che venga mantenuto integro sia il contenuto dei dati che la sua struttura. Come vedremo questa integrità non sarà sempre possibile da assicurare, soprattutto in considerazione delle possibilità applicative che i sistemi consentono, pertanto saranno valutate le diverse strategie per superare questo problema e verranno adottate delle soluzioni per ridurre le perdite di valore semantico nei diversi passaggi.

Nei decenni passati lo studio delle applicazioni dei sistemi di gestione dei dati ha fatto fatica a stare al passo con lo sviluppo tecnologico che ha avuto dei ritmi di crescita vertiginosi, testimoniati delle capacità di memorizzazione e calcolo dei supporti hardware caratterizzati da un un incremento costante a partire dagli anni '60 fino ai giorni nostri. Ora sembra che le capacità di sviluppo nell'integrazione dei microprocessori abbiano raggiunto una fase di rallentamento e pertanto, tenendo presente che gli strumenti software e hardware non sono altro che meri strumenti al servizio dell'uomo cui spetta la responsabilità di piegarli ai suoi scopi, forse è il momento per soffermarsi sulla rappresentazione dei dati e interrogarci se gli strumenti che abbiamo a disposizione possono essere utilizzati meglio per i nostri fini. Uno dei compiti fondamentali che hanno gli specialisti e i ricercatori nel campo del rilievo metrico dei beni culturali è infatti quello di rappresentare un anello di collegamento tra il mondo delle discipline sociali e quelle tecnico-scientifiche e il loro ruolo è fondamentale per fornire a quest'ultime gli indirizzi e le linee guida da perseguire nello sviluppo delle nuove tecnologie. Per questi motivi, una volta definite le esigenze e le finalità proprie del contesto applicativo dei beni architettonici, una parte fondamentale della tesi sarà dedicata all'analisi dei modelli di rappresentazione e gestione dei dati spaziali in considerazione della loro duplice natura di informazione geometrica e tematica. Questi modelli sono il frutto

di decenni di lavoro da parte dei ricercatori che fanno parte delle Università e delle organizzazioni internazionali come l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) volte alla definizione di schemi concettuali e strumenti logico-operativi per rispondere alle istanze che provengono dagli utilizzatori delle informazioni spaziali. Questi modelli verranno applicati al particolare contesto dei beni architettonici. Le istanze di questo segmento porteranno a determinate scelte per quanto concerne i modelli dei dati e porteranno ad una loro estensione per comprendere quelle istanze specifiche che non trovano una corretta espressione negli strumenti dei DBMS già codificati.

Considerato che solo degli strumenti applicativi aperti e liberi possono garantire una corretta rappresentazione e un'adeguata diffusione a questo tipo di informazioni, verrà utilizzato lo schema concettuale-logico CityGML [61], uno standard libero e aperto codificato dall'OGC che, nel panorama nazionale e internazionale, è uno dei più completi per quanto concerne il livello di definizione dei dati ed è l'unico in grado di gestire la componente 3D dell'informazione spaziale. Questo standard è composto da un metamodello concettuale UML, schemi XML, rappresentando anche un formato di interscambio dei dati. La sua completezza è un aspetto importante per quanto concerne la salvaguardia della struttura e del significato delle informazioni spaziali definite a livello concettuale. Questo potente strumento di modellazione dei dati spaziali naturalmente necessita di un'adeguata controparte operativa costituita dai sistemi software per gestire correttamente questo formato e in questo campo troviamo le maggiori difficoltà che ci imporranno dei compromessi con l'applicazione dello standard. I maggiori software per la gestione di database infatti sono RDBMS (*Relational Data Base Management System*), tra essi alcuni, gli ORDBMS (*Object Relational Data Base Management System*) hanno iniziato ad implementare funzionalità *object-oriented* come per esempio l'ereditarietà (*inheritance*). La diffusione dei database ad oggetti puri, OODBMS (*Object-Oriented Data Base Management System*) è ancora limitata. Sul versante della gestione dell'informazione geometrica da parte dei software si riscontrano le difficoltà maggiori a trovare strumenti che supportino la componente 3D. La maggior dei GIS riesce a gestire correttamente la componente 2.5D e a fornire strumenti per una visualizzazione 3D dei dati spaziali, mentre manca quasi completamente di strumenti per la gestione del 3D che, come abbiamo visto, è uno degli aspetti fondamentali per l'applicazione ai beni architettonici di questi sistemi. Al momento l'unico strumento applicativo in grado di supportare la geometria 3D dal punto di visto topologico e metrico è Oracle Spatial che pertanto sarà utilizzato per l'implementazione fisica del database.

Le modalità di applicazione di questi obiettivi dovranno tenere in considerazione la rispondenza del modello implementato con i dati provenienti dal caso studio ai criteri di rilevanza, confrontabilità, e completezza. La rilevanza del modello garantisce che questo corrisponda agli aspetti ritenuti più significativi nel contesto applicativo ed è una caratteristica soggettiva. La confrontabilità assicura il modello abbia le necessarie caratteristiche di generalità da permettergli di essere utilizzato come modello o tipo per tutte le situazioni simili. Infine la completezza ci assicura che il modello utilizzato sia esaustivo nel rappresentare tutta gli aspetti del fenomeno da descrivere.

2. Gli standard nella documentazione dei beni culturali

Il concetto di norma viene usato per indicare un modello medio che viene usato come termine di paragone e di riferimento e la normalizzazione o normazione definisce il processo di definizione e adeguamento delle norme alle esigenze e gli scopi che le animano. L'esigenza di normazione ha origini antichissime, ma è con l'avvento dell'era moderna e quindi con la rivoluzione industriale che si è sentita la necessità, a livello nazionale e internazionale, di codificare in maniera univoca e universale determinate tecniche o procedure. Il termine ha il duplice significato di riferirsi a norme *de facto* che cioè fanno riferimento a situazioni consuetudinarie oppure a norme *de jure* codificate cioè da organismi riconosciuti. In entrambe le accezioni il termine non implica necessariamente un valore cogente quanto piuttosto quello di codificare determinare procedure, metodi e caratteristiche prestazionali che assurgono quindi il ruolo di modello per tutti i casi simili. Le stesse norme possono anche assumere un valore prescrittivo allorché gli stati o le organizzazioni sovranazionali dotate di potere legiferante le adottano nelle loro disposizioni. Gli standard nascono su base volontaria e servono per migliorare la qualità dei prodotti e il loro reciproco scambio. Essi però non devono solo rispondere ad esigenze particolari o locali, ma devono avere valore il più largo possibile. Il processo di definizione degli standard deve comprendere quindi tutti coloro che a vario titolo sono coinvolti o hanno un interesse, che siano parte attiva in un processo o gli utenti finali dello stesso. Le caratteristiche di consensualità e di universalità sono sempre il principale riferimento che garantisce la validità e l'osservanza delle norme.

> «norma: una specificazione tecnica approvata da un organismo riconosciuto ad attività normativa, per applicazione ripetuta o continua, la cui osservazione non sia obbligatoria, [...]»[1]
>
> «È con un certo orgoglio ed una motivata fierezza che il mondo della normazione afferma di agire secondo le regole del consenso, della democrazia, della trasparenza e dell'adesione volontaria sulle quali si basa il valore delle norme tecniche.»[2]
>
> «Sul piano dei contenuti, esse definiscono le caratteristiche di un prodotto, di un processo o di un servizio, secondo lo stato dell'arte della tecnica, e ciò in relazione alle dimensioni, alle prestazioni, all'impatto ambientale, alla sicurezza, all'organizzazione: in sintesi a tutto ciò che concorre a definire la "qualità".»[3]

[1] UE, *Direttiva 98/34/CE*, 1998, art. 1 c.6
[2] UNI, *Le regole del gioco*, 2006, cap.1, p.21
[3] UNI, *Le regole del gioco*, 2006, p.7

Rispetto ai contenuti gli standard possono descrivere sia la metodologia di un determinato procedimento che il livello di qualità atteso. Spesso questi due primi aspetti, soprattutto quando le caratteristiche dell'attività normata sono complesse e multidisciplinari, coesistono all'interno della stessa norma. Gli standard inoltre possono essere definiti in base alla finalità che si prescrivono e cioè se hanno l'obiettivo di classificare una determinata procedura particolare in categorie prestabilite oppure se intendono prefissare degli obiettivi o delle linee guida generali.

> «*The vast majority of ISO standards are highly specific to a particular product, material, or process. However, ISO 9001 (quality) and ISO 14001 (environment) are "generic management system standards". "Generic" means that the same standard can be applied to any organization, large or small, whatever its product or service, in any sector of activity, and whether it is a business enterprise, a public administration, or a government department. ISO 9001 contains a generic set of requirements for implementing a quality management system and ISO 14001 for an environmental management system.*»[4]

Accostare i beni culturali che sono qualcosa di unico e irripetibile con il concetto di standard che è associato alla produzione seriale di beni è molto difficile. La documentazione dei beni culturali, è un prodotto dell'attività di tecnici e specialisti e come tale è definibile attraverso determinate procedure e metodi. La stessa documentazione poi è anche destinata alla valorizzazione del bene e cioè alla fruizione della collettività e quindi, come tale ha degli utenti finali che hanno precise aspettative. Queste due figure, coloro che concorrono alla produzione del bene e i fruitori del bene stesso, contribuiscono a definire da una parte le *best practise* e dall'altra i livelli di qualità attesi. La definizione di norme coinvolge quindi sia gli aspetti metodologici dell'attività di documentazione sia quelli prestazionali atti a garantire precisi livelli di qualità del prodotto finale. Il procedimento di normalizzazione richiede infatti sia la conoscenza relativa delle tecniche di acquisizione dei dati sia quella relativa alle finalità dell'acquisizione dei dati stessi. Esso dovrebbe coinvolgere quindi da una parte la comunità scientifica e tecnica al fine di selezionare le migliori pratiche di acquisizione dei dati e dall'altra parte l'insieme delle organizzazioni, nazionali e internazionali, preposte alla tutela e valorizzazione che contribuiscono a definire le caratteristiche attese dei dati raccolti. La normalizzazione del livello di qualità del prodotto finale della documentazione deve tenere conto dell'universalità del patrimonio culturale. I dati che dobbiamo trasmettere non sono quindi destinati solo ad un consumo immediato da parte di un'utenza limitata, ma devono essere fruibili al maggior numero di persone possibili e inoltre devono essere preservati per le future generazioni. È necessario quindi coniugare la necessaria generalizzazione richiesta nell'elaborazione di norme universalmente condivise con l'esigenza di poter adattare gli standard e i linguaggi alle specificità delle diverse tipologie di beni.

Il panorama delle organizzazioni internazionali che si occupano della documentazione dei beni culturali è molto vasto e comprende istituzioni governative e non, associazioni scientifiche e professionali, fondazioni private. L'ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) [40] è una delle più importanti istituzioni internazionali che si occupano della conservazione dei beni culturali in tutti i loro aspetti, incluso quello della

[4] ISO, http://www.iso.org/iso/about/discover-iso_whats-different-about-iso-9001-and-iso-14001.htm

documentazione. L'ICOMOS è un organizzazione internazionale non governativa nata nel 1965 in occasione al II Congresso Internazionale del Restauro del 1964 per venire incontro all'esigenza di creare un'organizzazione di specialisti nella conservazione e nel restauro indipendente dall'ICOM (International Council of Museums). L'ICOM, nata nel 1946, è l'associazione internazionale dei musei e dei museologi. La prima risoluzione di questo congresso di Venezia del 1964 è stata la Carta Internazionale del Restauro (International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites) conosciuta come la Carta di Venezia. La seconda risoluzione dello stesso congresso, promossa dall'UNESCO, ha portato alla nascita dell'ICOMOS.

> «*ICOMOS shall be the international organisation concerned with furthering the conservation, protection, rehabilitation and enhancement of monuments, groups of buildings and sites, on the international level.*»[5]

Il CIPA (International Committee for Documentation of Cultural Heritage) è la commissione internazionali dell'ICOMOS che si occupa della documentazione dei beni culturali. Il CIPA [19], nato in collaborazione con l'ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), comprende numerose organizzazioni nazionali e associazioni di professionisti nel campo del rilievo metrico. Uno dei soci sostenitori è il Getty Conservation Institute (GCI) che è una società del J. Paul Getty Trust, importante ente privato che opera nel settore culturale. Esso opera a livello internazionale nel campo della conservazione dei beni culturali, della formazione di figure specializzate e nel settore della documentazione.

> «*The Missions of CIPA are [...] to promote recording, documentation, information management and monitoring of cultural objects, monuments, groups of buildings and their environment, villages, towns, sites and cultural landscapes by the means and further development of applications of traditional surveying methods, photography, photogrammetry, laser scanning, remote sensing, information technology and management, including and integrating related disciplines and techniques.*»[6]

2.1. Acquisizione dei dati

Il modello statunitense: HABS/HAER Standards

Il National Park Service è il distretto amministrativo del Dipartimento degli Interni degli Stati Uniti che si occupa delle politiche nell'ambito del patrimonio culturale. Nato nel 1872 con l'istituzione del Parco Nazionale di Yellowstone, a partire dal 1933 ha iniziato ad acquisire alcune proprietà significative dal punto di vista storico-culturale e nel 1970 è divenuto un sistema che comprende oltre ai beni paesaggistici anche quelli culturali. Gli HABS/HAER Standards (Standards for the Historic American Buildings Survey/Historic American Engineering Record) [79] sono stati pubblicati nel 1990 dal Dipartimento degli Interni e possono essere considerati come una serie di linee guida, essenzialmente metodologiche. Lo schema del processo di documentazione infatti è

[5] ICOMOS *Statutes*, art.4
[6] CIPA *Statutes*, art 2

impostato secondo quattro criteri generali in relazione alla significatività dei dati (ovvero alle finalità della documentazione) e tre livelli decrescenti di qualità in relazione ai quali i criteri generali vengono modulati. Questi livelli di qualità sono messi strettamente in relazione con la significatività e il valore dell'edificio, del sito o dell'oggetto documentato.

- ***Standard I. Content: Documentation Shall Adequately Explicate and Illustrate What is Significant or Valuable About the Historic Building, Site, Structure or Object Being Documented.***

  «The historic significance of the building, site, structure or object identified in the evaluation process should be conveyed by the drawings, photographs and other materials that comprise documentation. The historical, architectural, engineering or cultural values of the property together with the purpose of the documentation activity determine the level and methods of documentation.»[7]

  «For example, Documentation Level I would be inappropriate for a building that is a minor element of a historic district, notable only for streetscape context and scale. A full set of measured drawings for such a minor building would be expensive and would add little, if any, information to theHABS/HAER collections. Large format photography [Documentation Level III] would usually be adequate to record the significance of this type of building.»[8]

- ***Standard II. Quality: Documentation Shall be Prepared Accurately From Reliable Sources With Limitations Clearly Stated to Permit Independent Verification of the Information.***

  «Measured drawings: Measured drawings shall be produced from recorded, accurate measurements. [...] No part of the measured drawings shall be produced from hypothesis or non-measurement related activities. [...] Documentation Level I measured drawings shall be accompanied by a set of field notebooks in which the measurements were first recorded. Other drawings prepared for Documentation Levels II and III, shall include a statement describing where the original drawings are located. [...] The written data shall include a methodology section specifying name of researcher, date of research, sources searched, and limitations of the project.»[9]

- ***Standard III. Materials: Documentation Shall be Prepared on Materials That are Readily Reproducible, Durable and in Standard Sizes.***

  Questa sezione riassume i supporti tradizionali di output e definisce i formati standard dei disegni su supporto lucido, delle fotografie analogiche, delle relazioni stampate e degli appunti di cantiere.

[7] US National Park Service, *Secretary of the Interior's HABS/HAER Standards*, p.1
[8] US National Park Service, *Secretary of the Interior's HABS/HAER Standards*, p.5
[9] US National Park Service, *Secretary of the Interior's HABS/HAER Standards*, p.6

- ***Standard IV. Preservation: Documentation Shall be Clearly and Concisely Produced.***

  Questa sezione contiene alcuni criteri per facilitare la lettura delle informazioni come per esempio l'uniformità dei caratteri, le scale metriche sui disegni e nelle foto.

Il modello inglese: *Metric Survey*

English Heritage (*Historic Buildings and Monuments Commission for England*) è il consulente ufficiale dello stato inglese per i beni culturali. Si occupa di tutte le politiche di conservazione e valorizzazione a livello nazionale ed è un ente autonomo finanziato dal Dipartimento per la Cultura e dalle entrate provenienti dalla gestione dei siti. Nel 2009 questo ente ha pubblicato il *Metric Survey Specifications for English Heritage [15]*, uno degli esempi più completi e approfonditi di manuali per il rilievo metrico dei beni culturali, che si compone di cinque sezioni ed è caratterizzato da un'impostazione sia metodologica che prestazionale [20]. Di seguito verranno riassunte le caratteristiche principali.

1. ***General conditions and Project Information***

   La prima sezione riguarda gli aspetti contrattuali e contiene le norme generali applicabili in tutti i casi di rilievo. Nel contratto di rilievo deve essere allegato in primo luogo una sintesi del progetto di rilievo (*Project brief*) contenente tutte le informazioni principali atte ad identificare il tipo di rilievo e le caratteristiche. Nel *Project brief* sono indicati le finalità del rilievo, la localizzazione, i permessi di accesso, le dichiarazioni di conformità, la proprietà intellettuale, il contratto, la descrizione dell'area e della scala di rilievo, le tecniche di acquisizione e la tabella di marcia.

   A questa segue un introduzione sulla legislazione di riferimento per la tutela dei beni culturali e quindi la descrizione del contratto e degli altri documenti allegati: la dichiarazione di metodo, la valutazione dei rischi e le modalità di controllo. Nella dichiarazione di metono sono indicati: le regole e le procedure di archiviazione dei dati da parte del contraente, la tabella di marcia, il supporto degli elaborati. Altri elementi che possono essere inclusi sono i possibili metodi alternativi di rilievo, il livello di definizione 3D del sito, l'uso di prese inclinate, l'uso dei *target* e dei vertici topografici.

   Nei capitoli successivi sono descritti i dettagli contrattuali, le norme e procedure per la sicurezza, le precauzioni per l'utilizzo di supporti fissi permanenti o mobili quali vertici topografici o *target* e la proprietà fisica ed intellettuale del materiale prodotto. Seguono quindi tre appendici che contengono norme e specifiche tecniche sull'uso degli impianti di illuminazione mobili, l'uso degli apparecchi elettrici e delle scale.

2. ***General Performance and Control of Metric Survey***

   a) *General performance requirements*

      La seconda sezione del manuale riguarda la descrizione dei requisiti generali di qualità nel rilievo. I prodotti del rilievo metrico sono differenziati per tipologia di supporto (*vector presentation* e *image/based presentation*) mentre

i requisiti di qualità attesi sono valutati secondo tre criteri: *measurement (accuracy and precision); selection of features; presentation of the survey data.* Questi criteri sono applicabili a tutte le tipologie di supporto metrico. Nel primo criterio (*measurement*) sono definiti i parametri di precisione e accuratezza che vengono mantenuti separati, secondo la pratica in uso, tra componente planimetrica e altimetrica.

> «*Accuracy describes the closeness between measurements and their true values. The closer a measurement is to its true value the more accurate it is. [...] In surveying precision is taken to describe the consistency with which a measurement or set of measurements can be repeated.*»[10]

Il secondo criterio (*selection of features*), attiene invece alla rispondenza del rilievo alle caratteristiche dell'oggetto da rilevare. Contribuiscono alla sua definizione, oltre che le caratteristiche di precisione e accuratezza, le scelte relative alle tecniche e metodi di acquisizione e trattamento dei dati che sono analizzati nelle sezioni successive.

> «*The differentiation of data in order to make the required delineation needs two key principles to be met:*
> - *a specification indicating the features required, presentation style and scale to be used;*
> - *and a survey method that allows the capture of clearly defined features.*»[11]

Seguono le indicazioni sulle caratteristiche generali relative alla descrizione dell'oggetto da rilevare, la cui definizione dell'estensione rilevata deve essere indipendente dalle caratteristiche del metodo di rilievo adottato. Questa primo capito introduttivo si conclude con la definizione delle caratteristiche dei metadati secondo le linee guida del Dublin Core[12] [24].

b) *Control of Survey*

In questa prima parte specifica relativa al controllo della qualità del rilievo sono analizzate le caratteristiche del sistema di riferimento adottato e della rete di inquadramento. Viene innanzitutto stabilita la tolleranza massima assoluta dei vertici topografici della rete ($\pm$5mm) e di seguito le caratteristiche dell'errore di chiusura verticale e orizzontale della rete (rispettivamente $\pm$10mm e $\pm$20mm). Di seguito vengono definite le modalità di scelta del sistema di riferimento (locale o globale) e quelle relative alla georeferenziazione tramite tecniche GNSS/GPS o per mezzo delle osservazioni sui punti fiduciali dell'Ordnance Survey. Infine vengono definite le caratteristiche della materializzazione dei vertici topografici in relazione alla vulnerabilità del bene.

c) *Image-based surveys*

[10] English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 2.1.1.
[11] English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 2.1.3.
[12] Il *Dublin Core Metadata Element Set (v. 1.1)* è il principale documento di riferimento per la definizione del vocabolario base per la definizione dei metadati. Elaborato dalla Dublin Core Metadata Initiative (DCMI) è uno standard ISO 15836:2009.

Questa parte analizza il controllo della qualità dei rilievi fotogrammetrici. Viene definita la tolleranza massima prevista per i punti di controllo utilizzati nell'orientamento dei blocchi (±3mm). Vengono specificate quindi le caratteristiche della materializzazione dei suddetti punti, le dimensioni in termini assoluti e relativamente alla riproduzione fotografica e il numero minimo di punti presenti su ciascuna coppia di fotogrammi (4). Vengono ammesse tecniche di orientamento dei blocchi fotogrammetrici che permettono di ridurre il numero di punti (*minor control*)[13]. Vengono inoltre specificate i casi in cui è possibile utilizzare punti naturali in luogo dei *target* materializzati a terra tramite supporti non riflettenti e le modalità di registrazione delle informazioni di localizzazione degli stessi.

d) *Measured building surveys*

Viene qui analizzato il controllo di qualità del rilievo architettonico (scale di rilievo comprese tra 1:100 e 1:20). Esso viene definito come basato su una rete di vertici calcolata e compensata con metodi statistici a partire dai quali vertici vengono acquisite le misure di dettaglio. Questo metodo può essere eventualmente integrato con altre metodologie di rilievo che non prevedono un controllo statistico delle misure. L'accuratezza del rilievo, nel caso che le misure vengano acquisite esclusivamente dai vertici calcolati e compensati nella rete, è pari alla tolleranza prefissata nel primo capito di questa sezione e cioè pari allo scarto quadratico medio di 0.3mm nella scala di restituzione. Vengono inoltre definite le caratteristiche del sistema di riferimento, la precisione e l'intervallo delle curve di livello e di conseguenza dei punti di quota.

e) *Topographic surveys*

In quest'ultima parte relativa al controllo della qualità del rilievo vengono definiti i criteri relativo al rilievo plano-altimetrico alle scale di rilievo comprese tra 1:200 e 1:500. In questa tipologia di rilievo la rete di inquadramento viene misurata attraverso tecniche GNSS/GPS, mentre intersezioni topografiche possono essere utilizzate per determinare il raffittimento. Il sistema di riferimento adottato in questo caso è quello cartografico nazionale e di conseguenza vengono definite le modalità di trasformazione dalle coordinate geocentriche. Anche qui viene determinato l'intervallo delle isocline e la loro precisione.

3. ***Format, Presentation and Provision of Survey Data***

La terza sezione definisce tutte le caratteristiche della restituzione e presentazione dei dati. Vengono elencati i formati standard dei nomi dei files, i formati CAD utilizzati per il disegno vettoriale e quelli per le immagini raster. Per quanto riguarda quest'ultime vengono preferiti i formati non proprietari e non compressi come il TIFF. Viene ammesso l'utilizzo di formati compressi come il JPG limitatamente alla codifica di fotopiani. Per quanto riguarda i formati vettoriali non

[13] Tecniche di triangolazione fotogrammetrica come la compensazione a stelle proiettive (*bundle adjustment*) permettono di ridurre il numero dei punti di controllo e di legame per ciascuna coppia di fotogrammi nel calcolo simultaneo dell'orientamento dei blocchi, la cui soluzione ai minimi quadrati viene determinata per mezzo di equazioni differenziali non-lineari.

vengono identificati dei formati di riferimento, essendo quelli più largamente diffusi quasi tutti proprietari, mentre vengono definite le caratteristiche dell'ambiente di lavoro CAD, quali la codifica dei sistemi di riferimento, delle impostazioni di visualizzazione e di presentazione.

4. ***Standard Specification for Image-based Metric Survey***

   Questa è la prima delle tre sezioni che descrivono le caratteristiche specifiche di ognuna delle tre tipologie di rilievo. Vengono in questa sezione analizzate tutte le caratteristiche principali del rilievo *image-based* per ognuna delle diverse fasi, a partire dall'acquisizione attraverso l'elaborazione dei dati fino alla loro restituzione grafica. Le scale prese in considerazione sono: 1:50, 1:20, 1:10. A partire dalla classificazione delle diverse tecniche di acquisizione di misure dalle immagini (rilievo fotogrammetrico, ortoproiezione e raddrizzamento di immagini) si procede ad analizzare le caratteristiche di ciascuna di esse. Per ognuna di esse vengono innanzitutto definite le caratteristiche delle camere (risoluzione e formato della matrice e/o film, distorsione delle lenti e parametri di calibrazione) per passare ad analizzare i requisiti di precisione ed accuratezza del supporto metrico nelle diverse fasi di elaborazione, a partire dai dati grezzi fino alla restituzione finale. Le immagini acquisite vengono classificate per mezzo del parametro gsd (*ground sampling distance*) che identifica la dimensione del pixel a terra in relazione alla scala di restituzione. Sono definiti i parametri del progetto di presa per l'acquisizione dei fotogrammi per il rilievo fotogrammetrico e il fotoraddrizzamento e l'ortoproiezione (geometria di presa, copertura stereoscopica, rapporto base/distanza). Vengono quindi specificati i requisiti di accuratezza nell'elaborazione dei dati (calcolo dell'orientamento esterno e creazione del modello di superficie) per ciascuna scala di restituzione. Gli stessi parametri di accuratezza vengono inoltre specificati per valutare la qualità della restituzione finale.

5. ***Standard Specification for Measured Building Survey***

   I prodotti metrici del rilievo architettonico sono classificati secondo le caratteristiche dell'oggetto rilevato e delle relative convenzioni di rappresentazione bidimensionale (piante prospetti e sezioni). Come tutte le altre tipologie di prodotti metrici il rilievo architettonico deve rispondere ai requisiti generali indicati nella sezione 2. La qualità del prodotto metrico viene messa direttamente in relazione alla scala di restituzione e con la selezione degli elementi geometrici (*selection of features*). Alla scala 1:20 il livello di dettaglio della restituzione deve permettere di distinguere tutti gli elementi componenti l'oggetto architettonico (le modanature, i singoli blocchi o mattoni, i serramenti) e il loro stato di conservazione (erosione degli spigoli o deformazioni delle superfici murarie). A partire da questa scala vengono specificati i criteri per la generalizzazione delle *feature* alle scale superiori (1:50 e 1:100) e le relative tolleranze. Particolare attenzione viene dedicata alla definizione delle convenzioni e dei simbolismi grafici per ciascun tipo di rappresentazione e delle convenzioni della codifica degli elaborati nei formati CAD.

6. ***Standard Specification for Topographical Survey***

   In questa sezione vengono analizzati il rilievo metrico alle scale superiori (1:200, 1:500) avente per oggetto sia elementi antropici che quelli naturali che defini-

scono le caratteristiche del paesaggio. I prodotti metrici analizzati consistono di planimetrie, profili di sezione e DTM (*Digital Terrain Model*) e per ciascuno di essi vengono analizzate le caratteristiche della restituzione finale con l'indicazione delle tolleranze e degli elementi geometrici per ciascuna scala. Sono indicate le principali categorie di tematismi antropici e i relativi simbolismi grafici nelle rappresentazioni bidimensionali, mentre per i DTM sono specificati le caratteristiche principali, incluse quelle metriche come posizione e intervallo, delle principali *feature* (curve di livello e punti di quota). Seguono le indicazioni relative alla codifica nei formati CAD.

7. ***Standard Specification for the Collection and Archiving of Terrestrial Laser Scan Data***

   Questa sezione è stata inserita nel manuale a partire dalla versione del 2009, sostituendo le appendici che erano già state pubblicate ad integrazione del manuale del 2003. Le scale di rilievo prese in considerazione sono: 1:10, 1:20, 1:50, 1:100. Le caratteristiche dei prodotti metrici vengono analizzati nelle diverse fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati. Le caratteristiche principali del progetto di acquisizione analizzate sono il parametro della densità dei punti per ciascuna scala di restituzione, ricoprimento dell'oggetto, sovrapposizione delle scansioni, caratteristiche dei target per la registrazione e dei punti di controllo. Gli elaborati finali comprendono le scansioni registrate, quelle grezze, le informazioni sulla rete di appoggio (coordinate e residui), le informazioni sulla precisione della registrazioni (residui).

L'esempio normativo del Regno Unito che abbiamo analizzato è uno dei più completi e comprensivi standard di riferimento per il rilievo metrico dei beni culturali. Esso fornisce allo stesso tempo una precisa indicazione dei parametri di qualità dei metodi e delle tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati e delle caratteristiche della restituzione finale. Lo spazio dedicato all'analisi del rilievo fotogrammetrico e delle scansioni laser terrestri dimostra che queste tecniche sono oramai considerate una pratica consolidata in questo ambito. La completezza per quanto riguarda l'analisi delle metodologie e tecniche di rilievo e il corredo di numerosi esempi illustrati contribuiscono ad allargare l'ambito di applicazione del *Metric Survey* che, oltre ad essere un esempio di normativa, può essere considerato un vero e proprio manuale di rilievo metrico dei beni culturali.

2.2. Gestione e pubblicazione dei dati

RecorDIM

Per iniziativa dell'ICOMOS, del GCI e del CIPA è stata avviato un'importante progetto per la definizione di standard applicati ai beni culturali chiamato RecorDIM (*Recording, Documentation and Information Management*) . Questo progetto ha l'obiettivo di colmare il vuoto che esiste tra i due protagonisti della documentazione: coloro che contribuiscono a trasmettere l'informazione (i produttori delle informazioni) e i fruitori delle stesse[14].

[14] A questo proposito si segnala l'iniziativa dell'UNESCO con il supporto del Governo della Corea del Sud che ha portato alla pubblicazione del manuale per l'utilizzo del GIS come strumento per la

> «*RecorDIM [...] is an international [...] partnership between heritage conservation organizations or institutions working together to bridge the gaps that currently exist between the information users (researchers, conservation specialists of all trades, project managers, planners etc.) and the information providers (photographers, heritage recorders, photogrammetrists, surveyors, etc.).*»[15]

Una prima fase dell'iniziativa, iniziata nel 2002 e conclusa nel 2007, è servita per definire i vari elementi che hanno portato a questo divario tra produttori e fruitori e portare all'elaborazione di uno schema di lavoro. Dai risultati di questo lavoro è emerso che il passo successivo sarebbe stato quello di pubblicare manuali e prontuari sui principi generali e le linee guida nell'acquisizione, documentazione e gestione delle informazioni e la partecipazione in attività di formazione in questo campo.

Tra i vari gruppi di lavoro che hanno partecipato a questa fase il Task Group 16 ha presentato un report sugli standard nella documentazione dei beni culturali. In quest'ultimo sono contenute delle raccomandazioni circa gli aspetti che dovrebbero confluire nella procedure di definizione degli standard. Tra questi vi sono la trasparenza dell'informazione, la proprietà intellettuale dei beni, l'uso di specifiche, manuali e cataloghi, la migliore pratica nel trattamento dei dati digitali. In secondo luogo la formazione di competenze di base che comprendono conoscenza dei beni culturali e del loro valore, le tecniche di documentazione, la gestione delle informazioni e la multidisciplinarietà. Infine la pubblicazione di esempi di buona pratica, un vocabolario di termini tecnici, una certificazione basata su dati richiesti e le metodologie del progetto di documentazione.

> «*The principal goal of international heritage documentation standards is to improve, harmonise, clarify and integrate the standards and best practices in use in the key areas of work practice, technical standards and information management [...] The documentation achieved by one project is often unusable by others because of differing thematic, technical or data standards. The recommendations of this report are a reaction to the need for a common framework that offers a consistent approach across disciplines in cultural heritage to improve the effectiveness of documentation.*»[16]
>
> «*practitioners must be literate, numerate and IT capable.*»[17]

I risultati della prima fase dei lavori del progetto RecorDIM sono stati pubblicati nel 2007 [49] in un documento contenente le linee guida per la raccolta e la gestione dei dati relativi ai beni culturali corredato da una approfondita serie di esempi illustrati di buone pratiche. Il documento contiene una serie di indicazioni generali e strumenti operativi per l'impostazione metodologica dell'intero processo di raccolta ed elaborazione delle informazioni. Il punto di partenza sono i principi che ispirano la necessità di documentare le tracce del nostro passato così come sono enunciati dai principali organismi internazionali come l'UNESCO e l'ICOMOS, a partire da questi vengono analizzate le esigenze e requisiti attesi da parte dei principali soggetti coinvolti nel

gestione delle risorse culturali: *GIS and Cultural Resource Management. A Manual for Heritage Managers* di Paul Box [14].

[15]CIPA RecorDIM *Task Group-16 Meeting*, Corfù 2002

[16]RecorDIM, *Task Group 16 Draft report*, p. 3

[17]RecorDIM, *Task Group 16 Draft report*, p. 4

processo: i produttori e i fruitori dell'informazione. Uno dei concetti che emerge dal progetto RecorDIM è che il processo di raccolta ed elaborazione delle informazioni coinvolge in egual misura tutti i soggetti coinvolti nel processo, che sono sono portatori di interessi o che li condividono (*stakeholders* e *shareholders*) e l'iniziale distinzione tra produttori e fornitori di informazione viene via via sfumando per lasciare spazio ad una definizione più articolata del processo di documentazione dei beni culturali. Entrambi i soggetti infatti contribuiscono all'arricchimento del valore semantico del dato raccolto e trasmesso alla comunità. L'informazione raccolta dagli specialisti che operano nel settore delle tecniche e analisi di rilevamento viene elaborata e studiata da coloro che operano nel campo della conservazione e della tutela che contribuiscono a valorizzare gli aspetti più significativi delle informazioni raccolte in funzione delle finalità specifiche cui l'azione di conservazione e tutela è diretta. Al fine di fornire uno strumento operativo utile, che serva anche da riferimento e guida per l'impostazione del lavoro, vengono presentati una serie di schemi metodogici, tabelle, piani operativi e modelli di schede per la catalogazione da utilizzare nell'attività di raccolta ed elaborazione delle informazioni. Questi strumenti sono corredati da una numerosa serie di esempi applicativi illustrati per mezzo dei vari elaborati prodotti.

Il CIDOC CRM

Un'altra importante iniziativa nel campo della normalizzazione, è il CRM (*Conceptual Reference Model*) elaborato dal CIDOC, Comitato Internazionale per la Documentazione dell'ICOM, ed è divenuta norma ISO 21127:2006. Il CRM-ISO 21127 è uno schema di riferimento per favorire l'integrazione e lo scambio dei beni culturali. Quest'obiettivo è stato ottenuto grazie al lavoro sui database delle reti museali e la relativa documentazione. In particolare per la definizione della norma è stato utilizzato il modello relazionale dei dati del CIDOC e attraverso una procedura di sintesi sono state identificate circa un centinaio di classi e proprietà con le quali è stato possibili abbracciare tutti i campi semantici dei numerosi cataloghi museali del mondo. Il CIDOC, inoltre, ha prodotto un manuale di standard per le collezioni africane: *HandBook of Standard. Documenting African Collections* [38]. Esso è uno strumento per classificare un oggetto d'arte o archeologico con una terminologia precisa, tramite la compilazione di una serie di campi contenenti le informazioni essenziali e la relativa terminologia da utilizzare. Le caratteristiche delle informazioni sono corredate da esempi e il manuale è consultabile sul web[18].

Core Data Index, Core Data Standard e ObjectID™

Un'importante frutto della collaborazione tra il Getty Conservation Institute e l'ICOM è quello che riguarda la definizione di standard per l'identificazione dei beni architettonici, dei beni archeologici e degli oggetti d'arte [87]. Il primo, il *Core Data Index* è uno strumento per l'identificazione e la catalogazione dei beni architettonici mentre il secondo, il *Core Data Standard*, per l'identificazione dei beni archeologici. Il *Core Data Index* è un indice che si compone di quattro campi fondamentali e cinque opzionali che variano a seconda delle caratteristiche del bene da documentare. Nei primi quattro

[18] http://www.museum.or.jp/icom-J/afridoc/html_gb/accueil/accueil2.html

campi troviamo: il nome e i riferimenti, la localizzazione spaziale, le caratteristiche funzionali e infine la datazione del bene. Il Core Data Index è stato preso come riferimento nelle Raccomandazioni del Consiglio dell'Unione Europea in merito al coordinamento dei sistemi e metodi di documentazione dei beni culturali [90].

> «*II. promote the adoption within architectural documentation centres of a Core Data Index to historic buildings and monuments based upon the definitions set out in the appendix to this recommendation. This common minimum index should facilitate the exchange of information between countries and organisations engaged in the task of understanding, conserving and protecting historic buildings and in fulfilling the needs of the public for information relating to historic buildings and monuments*;»[19]

ObjectID™, invece è un'iniziativa promossa nel 1993 dal Getty Conservation Institute per definire precisi standard nell'ambito dello scambio di beni culturali mobili e si propone l'obiettivo di definire un livello minimo di informazioni necessarie per l'identificazione di oggetti d'arte e archeologici. Questa lista di identificazione è composta da una decina di campi, che definiscono le caratteristiche generali dell'oggetto, più una breve descrizione dello stesso. Questo breve prontuario si sta imponendo a livello nazionale e internazionale come standard per l'identificazione degli oggetti rubati o illegalmente esportati. Ne è un esempio il "Documento dell'opera d'arte - Object ID" predisposto dal Comando Carabinieri Tutela Patrimonio Culturale.

EPOCH

EPOCH (*European Network of Excellence in Open Cultural Heritage*) è una rete di eccellenza che comprende numerose istituzioni europee e ha l'obiettivo di promuovere la qualità e l'efficacia dell'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione nell'ambito dei beni culturali. L'importanza che applicazioni delle tecnologie informatiche e della comunicazione (ICT *Information and Communications Technologies*) hanno assunto negli ultimi anni nel campo della documentazione e valorizzazione dei beni culturali è notevole. Tra gli scopi di EPOCH vi è il riconoscimento dell'importanza che gli standard hanno all'interno dei beni culturali come in ogni attività scientifica. Tra le iniziative di EPOCH vi è la proposta di una carta riguardante la comunicazione dei beni culturali: *The Ename Charter* adottata poi dall'ICOMOS nel 2008. The ICOMOS *Ename Charter* (*Charter for the Interpretation and Presentation of Cultural Heritage Sites*) [43] è una carta internazionale che si propone l'obiettivo di chiarire quali siano i concetti di interpretazione e presentazione in relazione alla comunicazione dei beni culturali. L'ispirazione del progetto viene dai lavori di un Comitato Nazionale dell'ICOMOS: l'AUSTRALIA ICOMOS Committee. Questo comitato ha adottato nel 1999 un testo denominato *The Australia ICOMOS Charter for the Conservation of Places of Cultural Significance* conosciuto anche come *The Burra Charter* [42]. Queste specifiche comprendono un vocabolario di termini comuni corredato da una descrizione degli stessi. Sempre nell'ambito delle iniziative di EPOCH ricordiamo *The London Charter for the Visualisation of Cultural Heritage* [29] che ha l'obiettivo di definire i principi nell'uso delle tecniche computerizzate di visualizzazione in relazione alla comunicazione dei beni culturali.

[19] UE, *Committee Of Ministers Recommendation* No. R (95) 3

Parte II.

GESTIONE DEI DATI

3. I DBMS

La progettazione del database è un processo a più livelli di traduzione delle informazioni da dati non strutturati a dati strutturati che parte da una rappresentazione prima astratta della realtà (modello concettuale) che viene poi tradotta in un linguaggio coerente con il sistema informativo adottato (modello logico) e infine completata con la definizione dei parametri fisici di memorizzazione dei dati (modello fisico). Secondo la classificazione in uso in ambito informatico questo passaggio parte dalla descrizione della realtà secondo un linguaggio astratto di alto livello, più complesso e ricco dal punto di vista semantico (il linguaggio proprio dell'uomo) ad uno più specifico di basso livello coerente con la struttura fisica della base di dati (il linguaggio delle macchine).

Nella progettazione del DBMS (*Data Base Management System*) si sono studiati e applicati diversi sistemi nel corso del tempo e l'evoluzione degli stessi per ovvie ragioni è in stretta relazione con l'evoluzione dei linguaggi di programmazione in ambito informatico. I primi modelli sviluppati per i database sono quelli gerarchici e reticolari che sono stati soppiantati a partire dagli anni '70 dal modello relazionale sviluppato da Codd il quale è ad oggi quello più diffuso. A partire dagli anni '90 si sono affacciati sulla scena i primi database ad oggetti figli della rapida diffusione dei linguaggi di programmazione omonimi. I primi sistemi adottati (reticolare e gerarchico) descrivevano una struttura formale dei dati ancora legata alla loro strutturazione fisica, mentre i modelli sviluppati successivamente (relazionale e a oggetti) si basano sulla separazione del modello dei dati ovvero il meccanismo di strutturazione degli stessi dalla loro rappresentazione fisica. Questa distinzione permette l'indipendenza logica dei dati dalla loro rappresentazione fisica: la definizione dei sistemi che gestiscono il database fa infatti riferimento ad un modello dei dati che è indipendente dalla sua implementazione fisica, la quale può essere pertanto modificata indipendentemente dalla struttura logica.

Nella progettazione dei database si parte dalla definizione del modello concettuale (o schema concettuale) che mira a rappresentare i contenuti informativi della base di dati in modo indipendente dai criteri di rappresentazione utilizzati dai sistemi di gestione delle basi di dati. Questo modello viene poi ristrutturato nella fase successiva per permetterne la sua traduzione nel modello logico (o schema logico) equivalente, viene ottimizzato e sottoposto alle verifiche mediante le tecniche formali. Il modello logico è strutturato secondo un insieme di regole logico-matematiche precise, è coerente con il sistema utilizzato per la gestione dei dati, ma è ancora indipendente dalla struttura fisica del database nel software che gestisce. L'ultima fase della progettazione di un DBMS è quella della creazione del modello fisico, nel quale lo schema logico dei dati viene implementato nella struttura fisica di memorizzazione dei dati tramite il *file system*[1] e gli indici.

In questa sezione verranno introdotti una serie di termini in uso nell'ambito informatico. Di seguito un piccolo vocabolario dei termini principali utilizzati e del loro significato nel contesto [5].

[1] Un *file system* è un sistema per la memorizzazione fisica dei dati.

- tupla. Formalizzazione: stabiliamo la corrispondenza fra attributi e domini per mezzo di una funzione $dom : X \rightarrow D$ che associa a ciascun attributo $A \in X$ un dominio $dom(A) \in D$, una tupla su un insieme di attributi X è quindi una funzione t che associa a ciascun attributo $A \in X$ un valore del dominio $dom(A)$. Nel modello relazionale una tupla identifica univocamente una riga della tabella le cui colonne sono rappresentate dagli attributi ed è chiamata anche *record*.

- classe (*class*): identifica un determinato insieme di oggetti che presentano caratteristiche e relazioni simili. È uno dei costrutti principali della modellazione ad oggetti.

- istanza (*instance*): rappresenta un oggetto della classe e cioè la realizzazione della stessa. In altri termini un istanza è il singolo esemplare che costituisce l'insieme di oggetti simili che la classe identifica.

- tabella (*table*): costituita una matrice di righe e colonne, nel modello relazionale identifica la relazione composta dall'insieme delle occorrenze che costituiscono le righe della tabella. Le colonne contengono i nomi degli attributi mentre i campi della tabella corrispondono ai valori degli attributi corrispondenti ad una singola occorrenza.

- relazione (*relationship*): qualificazione del legame che intercorre tra diverse classi nel modello ad oggetti. Nel modello relazionale coincide invece con la tabella e può essere definita come un insieme di tuple.

- associazione (*association*): nel modello E/R corrisponde a legame che intercorre tra le entità.

- entità (*entity*): nel modello E/R identifica un'insieme di occorrenze che realizzano un determinato insieme di oggetti simili. È simile alla classe, ma non ha le stesse proprietà.

- occorrenza: nel modello E/R rappresenta un oggetto ovvero la realizzazione di un entità.

- attributo: identifica le proprietà di un oggetto tramite i valori specificati. Nel modello relazione è identificato dalle colonne della tabella. Nel modello ad oggetti invece è rappresentato direttamente in un comparto della classe.

- valore: nel modello ad oggetti rappresenta il contenuto delle proprietà definite dagli attributi. Secondo il modello relazionale il contenuto del singolo campo o *record* della tabella.

- tipo di dato (*data type*): specifica un determinato dominio di valori e le operazioni ammesse sugli stessi nel dominio.

3.1. RDBMS

Progettazione concettuale: il modello E/R

La progettazione concettuale del DBMS secondo il modello E/R (*Entity-Relationship*) [18] fa uso di una serie di costrutti principali o strutture per descrivere i dati e il loro comportamento. Questi sono: entità, associazioni e attributi.

Entità

Rappresentano gli oggetti della realtà da rappresentare e sono costituite da insiemi di occorrenze che corrispondono alle tabelle del modello relazionale. A differenza però del modello relazionale, dove le righe o tuple rappresentano le relazioni degli oggetti, nel modello E/R le entità sono modellate separatamente rispetto alle relazioni che le qualificano. I valori che ciascuna entità può assumere vengono chiamate occorrenze dell'entità. Le occorrenze delle entità nello schema concettuale E/R rappresentano gli oggetti della realtà nella loro fisicità e unicità a prescindere dalle relazioni che intercorrono tra essi[2]. Un'occorrenza di un'entità quindi è sufficiente per identificare e rappresentare un singolo oggetto facente parte di un insieme omogeneo. Nella rappresentazione grafica dei diagrammi E/R viene rappresentata con un rettangolo contenente il nome dell'entità.

Associazione

Il secondo costrutto principale del modello E/R è l'associazione definita come un legame tra entità diverse[3]. Essa è rappresentata graficamente con un rombo legato alle corrispondenti entità tramite una linea. Esse possono legare sia entità diverse sia un'entità a se stessa, in questo caso si parla di relazione ricorsiva. Le associazioni sono rappresentabili dal punto di vista matematico come un prodotto cartesiano esprimibile attraverso una matrice. L'associazione tra entità può quindi essere espressa come un sottoinsieme del prodotto cartesiano tra le occorrenze delle entità coinvolte. Il sottoinsieme definisce l'ambito in cui l'associazione tra le entità è valida. La formula è la seguente:

$$A \times B = \{(x, y) \, : \, x \in A \, \wedge \, y \in B\}$$

Si definisce prodotto cartesiano di due insiemi A e B l'insieme formato dalle coppie ordinate x,y tali che x appartiene a A e y a B e può essere estesa a più insiemi nella forma seguente:

$$A_1 \times A_2 \times \cdots \times A_n = \{(x_1, x_2, \ldots, x_n) \, : \, x_i \in A_i \forall i = 1, \ldots, n\}$$

Questa formalizzazione matematica implica che una singola occorrenza di un'entità non possa partecipare più volte alla stessa occorrenza di una associazione. Associazioni ripetute vanno rappresentate come entità diverse.

[2]Nel modello logico relazionale, invece, non è possibile rappresentare un oggetto senza conoscerne anche le proprietà, cioè l'oggetto viene definito tramite le occorrenze della relazione.

[3]Nel contesto della progettazione concettuale verrà usato il termine associazione per non creare ambiguità con la relazione del modello logico relazionale

Attributi

Gli attributi definiscono le proprietà di ciascuna entità o associazione e sono rappresentati da un cerchio con accanto il nome dell'attributo collegato alla relativa entità o associazione tramite una linea. Ogni attributo è valido per un determinato intervallo chiamato dominio. Il dominio, che rappresenta tipo di dato, definisce l'insieme dei valori che l'attributo può assumere. Gli attributi possono essere raggruppato nel caso descrivano caratteristiche simili, in tal caso si parla di attributi composti.

Cardinalità

La cardinalità esprime il numero minimo e massimo di istanze di una associazione cui un'istanza di un'entità può partecipare. Nel caso degli attributi esse definiscono il numero minimo e massimo di valori dell'attributo cui l'occorrenza dell'entità o della associazione partecipa. La cardinalità viene solitamente espressa tramite una coppia di elementi racchiusi tra parentesi: il primo elemento definisce la cardinalità minima e il secondo la cardinalità massima. I valori utilizzati sono 0,1,n. Per esempio una cardinalità $[0, 1]$ tra entità e associazione stabilisce che ogni occorrenza dell'entità può partecipare alla associazione nella misura di 0 oppure 1 volte, la partecipazione è cioè opzionale. Nel caso invece di una cardinalità $[1, 1]$ ogni occorrenza dell'entità può partecipare ad una e una sola istanza della associazione e descrive così una funzione biunivoca tra i due insiemi formati dalle istanze dell'entità e della associazione. Nel caso invece di cardinalità $[0, n]$ il numero di occorrenze della relazione cui l'entità può partecipare è indefinito e la partecipazione è opzionale, mentre con $[1, n]$ è obbligatoria, invece nel caso di cardinalità $[n, n]$ sia il numero di occorrenze dell'entità che quello dell'associazione cui esse partecipano è indefinito. Per quanto riguarda la cardinalità degli attributi il discorso è analogo, si parla infatti di attributi a valore singolo (*single valued*) nel caso di cardinalità massima pari a 1 e multi valore (*multi valued*) nel caso di cardinalità massima pari a n.

Identificatori

Gli identificatori sono un altro dei costrutti fondamentali del modello E/R. Essi stabiliscono per ciascuna delle occorrenze delle entità una sequenza di valori che permettono di identificarla univocamente. Gli identificatori o chiavi possono essere rappresentati dai valori di uno o più attributi dell'entità coinvolta, oppure comprendere i valori di occorrenze di entità diverse, che però devono essere in relazione con la prima. Nel primo caso si parla di chiave interna, mentre nel secondo di chiave esterna. In entrambi i casi naturalmente gli identificatori devono avere cardinalità $[1, 1]$ per determinare univocamente l'entità.

Generalizzazione

La generalizzazione introduce nella progettazione concettuale del DBMS un concetto tipico del linguaggio umano. Questa caratteristica è presente anche nel modello E/R ed è utile per descrivere il comportamento di oggetti complessi formati da aggregazioni di oggetti più semplici. Le generalizzazioni sono classificate a seconda delle loro proprietà ortogonali, cioè le proprietà valide per tutti gli elementi. Si definiscono generalizzazioni totali quelle che prevedono che ad ogni occorrenza dell'entità genitore corrisponda

un'occorrenza di almeno una delle entità figlie. Sono parziali se vi sono occorrenze figlie che non appartengono all'entità genitore. Si parla invece di generalizzazioni esclusive se ad ogni occorrenza dell'entità genitore corrisponde al massimo una sola occorrenza dell'entità figlia, mentre si definiscono sovrapposte quando le occorrenze dell'entità genitore possono appartenere a più di una occorrenza dell'entità figlia.

Progettazione logica: il modello relazionale

Nel modello relazione vi è una ristrutturazione dei dati che corrisponde ad un livello più basso di definizione degli stessi nel quale quindi un modello più astratto viene tradotto in una forma logica che è più facilmente implementabile fisicamente. Il principale presupposto su cui si basa questa ristrutturazione dei dati è che è possibile definire il contenuto delle informazioni unicamente attraverso le relazioni eliminando cioè il concetto di entità che abbiamo introdotto nel modello concettuale E/R.

Il modello relazionale [23] ha le sue radici nella logica matematica e si avvale degli strumenti dell'algebra relazionale. Esso si basa sul concetto di relazione che viene tradotta matematicamente come tupla. Una singola occorrenza di una relazione corrisponde quindi ad una tupla. Esso è stato il primo DBMS a dividere la struttura logica dei dati da quella fisica, che nei modelli precedenti non era nettamente separata da quella logica. I primi DBMS utilizzavano un modello gerarchico in cui la struttura dei dati era organizzata secondo una gerarchia unica che si prestava molto facilmente ad essere implementata fisicamente nei *file system*. I database reticolari invece introdussero un sistema di puntatori per rappresentare le relazioni tra i dati. Questi DBMS utilizzavano sistemi diversi per collegare le informazioni che però erano sempre rappresentate da un unica riga contenente una determinata serie di valori (corrispondenti agli attributi dell'oggetto). La grande rivoluzione del modello relazionale è stata l'idea di poter rappresentare i dati tramite tabelle costituite da più righe di dimensione finita. Questa formalizzazione permette al sistema di normalizzare i dati in modo da eliminare ridondanze, *record* vuoti oppure duplicazioni. Questo sistema permetteva, grazie agli strumenti dell'algebra relazionale, di essere applicato facilmente a diverse tipologie di dati e ha segnato l'inizio della grande fortuna delle applicazioni dei DBMS che sono diventati un importante specializzazione dell'informatica che riceve contributi da un insieme diverso di discipline.

Il modello concettuale E/R (*Entity-Relationship*) venne proposto come un modello in grado di descrivere i concetti astratti della realtà con un linguaggio più ricco di valori semantici e come base unificante per il superamento dei limiti imposti dalla struttura dei modelli logici allora in uso. Se è vero che già Chen aveva individuato questi limiti e si proponeva di risolverli con il modello E/R bisogna tenere conto che il modello concettuale deve essere tradotto comunque nel modello logico e quindi sottostare alle regole imposte dai costrutti logici utilizzati. Nella progettazione logica di un RDMS (*Relational Database Management System*) il modello concettuale E/R viene ristrutturato per rispondere ai criteri si efficienza e semplicità e tradotto nel linguaggio matematico del modello logico.

Nel modello relazionale altri costrutti propri del modello E/R come ad esempio le gerarchie e gli attributi multivalore non possono essere rappresentati e pertanto vanno prima tradotti in uno schema concettuale che è direttamente traducibile in termini logici. L'eliminazione delle gerarchie rappresenta il primo passo della ristrutturazione

logica dello schema concettuale. Ci sono sostanzialmente due approcci: il primo prevede degli accorpamenti tra le entità genitore e figlia, mentre il secondo prevede una separazione delle relazioni. Nel primo caso sia che sia accorpata l'entità figlia nel genitore o viceversa la rappresentazione delle entità viene ricondotta ad attributi e quindi vi è una perdita di informazioni. Nel secondo invece il legame tra l'entità genitore e le entità figlie viene replicato per ognuna di esse e non vi è perdita di informazione. Un approccio analogo viene utilizzato per eliminare gli attributi multivalore che vengono scomposti in tabelle diverse.

3.2. OODBMS

Per superare questi limiti rispetto alla descrizione del valore semantico della realtà bisogna quindi partire dal modello logico e dai suoi costrutti: infatti con lo sviluppo dei linguaggi di programmazione ad oggetti sono stati definiti nuovi operatori logici le cui regole sono state applicate anche nella progettazione dei database. Il modello dei dati ad oggetti rispetto a quello relazionale è più recente. Infatti, sebbene i primi linguaggi di programmazione ad oggetti risalgano alla fine degli anni '70, bisognerà aspettare gli anni '80 perché venisse formulato per la prima volta il concetto di base di dati ad oggetti e circa dieci anni ancora perché sul mercato si affacciassero i primi sistemi basati su questo paradigma. I caratteri distintivi principali di un OODBMS (*Object-Oriented Database Management System*) sono stati definiti dalle *Golden Rules* nel *Manifesto* del 1989 [4] e comprendono due gruppi di requisiti fondamentali.

Nel primo gruppo vi sono le caratteristiche che rendono in DBMS in questione un OODBMS (progettazione logica), mentre nel secondo vi sono i requisiti generali propri di un DBMS (progettazione fisica) . Questo perché se è vero che i concetti propri della modellazione ad oggetti erano già da tempo noti ai programmatori di software è vero che gli stessi non erano ancora stati applicati ai DBMS e quindi per i programmatori era necessario chiarire le caratteristiche generali dei DBMS, mentre per gli studiosi di database bisognava definire quali sarebbero state le caratteristiche proprie di un OODBMS.

A partire degli stessi anni in cui vennero alla luce i primi OODBMS sono stati sviluppati dei sistemi ibridi ORDBMS (*Object-Relational Management Systems*) che utilizzano alcune delle caratteristiche proprie del modello *object-oriented* come per esempio il concetto di ereditarietà.

Progettazione concettuale

Il linguaggio di modellazione concettuale più importante e diffuso nell'approccio *object-oriented* è UML (*Unified Modeling Language*). Si rimanda al capitolo successivo 4.1 relativo agli standard nell'ambito dei DBMS per una sintesi dei principali costrutti del linguaggio.

Progettazione logica

Qui vi è una sintesi delle prime 8 *Golden Rules* definite nel *Manifesto* come caratteristiche essenziali di un OODBMS.

Oggetti complessi

Viene definita la possibilità di costruire oggetti complessi a partire da aggregazioni di oggetti più semplici secondo procedure ortogonali, cioè secondo metodi applicabili a tutti gli oggetti (questo in contrasto con i database relazionali che ad esempio prevedono aggregazioni diverse per set e tuple).

Identità degli oggetti

Ogni oggetto possiede un'esistenza propria indipendentemente dal suo valore per cui è possibile avere valori uguali appartenenti però ad oggetti diversi (nel modello relazionale invece non esistono entità indipendenti dal valore esplicato tramite la relazione).

Incapsulamento

È uno dei concetti più innovativi della teoria dei database in quanto prevede l'incorporazione delle procedure per gestire gli oggetti negli oggetti stessi e realizza pienamente l'indipendenza logica dei dati. Questo significa poter modificare separatamente i dati senza dover interagire con il substrato dei programmi che utilizzano i dati, i quali sono perciò al riparo dai cambiamenti dell'interfaccia esterna del dato. I dati si manifestano all'esterno essenzialmente attraverso le operazioni ammesse per gestirli, mentre la parte implementativa, che contiene sia i dati stessi che le procedure per modificare le operazioni dell'interfaccia, è nascosta.

Classi e tipi

Il modello prevede l'organizzazione degli oggetti con caratteristiche comuni in classi e tipi di cui gli oggetti rappresentano le istanze. Gli oggetti sono definiti come istanze della classe, analogamente alle occorrenze delle entità del modello E/R e rappresentano la realizzazione del dato secondo le caratteristiche definite al livello superiore della classe. La classe e il tipo hanno anch'essi le stesse caratteristiche di incapsulamento degli oggetti. Entrambi i termini fanno riferimento a concetti astratti, ma mentre la classe è un concetto estensivo definito dall'appartenenza ad esso di un determinato numero di membri, il tipo è un concetto universale che esiste al di là dell'appartenenza ad esso di determinate istanze (*token*). Nello specifico campo di applicazione dei DB i tipi vengono utilizzati per raggruppare oggetti con caratteristiche simili, le classi hanno più o meno la stessa funzione, ma in più possiedono gli strumenti (*object factory* e *object warehouse*) per creare e manipolare nuovi oggetti. Al di là delle differenze l'aspetto comune a questi due concetti è quello che essi definiscono il dominio degli oggetti che comprendono.

Ereditarietà

Questo regola introduce il concetto di ereditarietà di classi e tipi. Tramite questo concetto è possibile definire a partire da una classe o tipo specifica una serie di sottoclassi o sottotipi che ereditano gli attributi della classe o del tipo da cui discendono. Questo concetto oltre ad essere molto simile alla strutturazione del pensiero umano ha un importante conseguenza dal punto di vista dell'organizzazione dei DB: mentre nel modello relazionale quando ci troviamo in presenza di oggetti simili per determinati

attributi è necessario scrivere le procedure per ciascuno di essi separatamente, tramite l'ereditarietà delle classi e dei tipi è sufficiente definire una volta per tutte gli attributi della classe o del tipo che vengono automaticamente ereditati da tutte le sotto classi o sottotipi che da esse discendono.

Polimorfismo (*overloading*, *overriding* e *late binding*)

È una caratteristica strettamente correlata con l'incapsulamento e l'ereditarietà. Secondo questa caratteristica si determina la possibilità che gli stessi nomi di procedure possano determinare comportamenti diversi a seconda della sottoclasse o sottotipo con cui si interfacciano (*overloading*). La procedura non viene perciò definita nel programma che accede ai dati, bensì viene definita direttamente al livello della classe superiore e poi ridefinita per ogni sottoclasse o sottotipo che viene implementato (*overriding*). Questa caratteristica fa si che la traduzione delle procedure non sia incorporata nel programma ma deve essere tradotta in corso d'opera per ogni sottotipo o sottoclasse (*late-binding*).

Estensibilità

L'estensibilità del DBMS è una caratteristica dell'architettura dei database è viene incontro all'esigenza di adattare il DBMS alle specifiche esigenze delle varie applicazioni in cui i database trovano oggi largo impiego. Questa caratteristica si è dimostrata necessaria proprio perché la vastità dei campi di applicazione rende impossibile studiare un DBMS che si presti ad essere applicato in tutti gli specifici domini di interesse. Da questo presupposto risulta evidente che un buon DBMS deve prevedere la possibilità di introdurre nuove tipologie di oggetti e nuovi operatori logici per estendere le sue funzionalità. In questo aspetto i DBMS relazionali sono più rigidi in quanto non prevedono la possibilità di aggiungere nuove classi di oggetti (entità) senza dover ristrutturare l'intero DBMS. Questo perché la struttura logica del modello relazionale è basata unicamente sulla relazione e perché le procedure di accesso e modifica delle entità sono scritte nel linguaggio dell'applicazione (nel caso il linguaggio di interrogazione). Negli OODBMS, invece, il concetto di gerarchia permette di poter implementare le sottoclassi a partire dalle caratteristiche della superclasse che li contiene, senza cioè dover ristrutturare l'intera architettura del database. Inoltre, grazie al concetto di incapsulamento, è possibile definire le stesse procedure di accesso ai dati direttamente nelle caratteristiche dell'oggetto e quindi non è necessario dover riscrivere i linguaggi di interrogazione [85].

Completezza computazionale

Questo requisito fa riferimento alla necessità di poter esprimere attraverso il linguaggio di manipolazione dei dati (DML - *Data Manipulation Language*) ogni possibile funzione operante tra i dati stessi e poterla calcolare.

Progettazione fisica

Le seguenti ultime 5 *Golden Rules* si riferiscono agli aspetti implementativi della progettazione fisica dei database.

Persistenza

Definisce la caratteristica di un DBMS per cui i dati devono sopravvivere al loro utilizzo. Questa caratteristica deve essere ortogonale e cioè essere applicabile a ciascun dato indipendentemente dalla sua tipologia.

Gestione della memoria secondaria

Questo aspetto si riferisce ad una serie di caratteristiche tipiche dei DBMS come per esempio l'indicizzazione, il *clustering* e il *buffering* dei dati[4], la selezione dei percorsi di ricerca e l'ottimizzazione delle interrogazioni. Si tratta di aspetti che hanno a che fare essenzialmente con le caratteristiche performative dei DBMS, le quali però sono essenziali perché il sistema possa effettuare le operazioni richieste in maniera efficiente.

Concorrenza

Secondo questa regola un DBMS deve permettere a più utilizzatori di poter accedere contemporaneamente ai dati al massimo livello permesso dal sistema.

Recupero delle informazioni

Secondo questa caratteristica si definisce la proprietà del sistema di recuperare le informazioni in caso di perdita delle stesse dovute a *crash* di scrittura su disco o di computazione da parte del processore.

Facilità di interrogazione

Questa caratteristica, che è una delle più importanti di un database, esplicita la necessità per un sistema di gestione dei dati di garantire la presenza di un coerente sistema di interrogazione degli stessi. Secondo la definizione del *Manifesto* l'interrogazione del database deve essere espressa attraverso un linguaggio di alto livello, essere efficiente e infine essere indipendente dall'applicazione, cioè poter essere applicata a diversi DBMS.

3.3. Componenti del DBMS

Linguaggi di interrogazione

Tra i linguaggi principali utilizzati in un DBMS vi è il *Data Definition Language* (DDL) per definire la struttura degli oggetti del database e il *Data Control Language* (DCL) per definire gli accessi e i relativi permessi. I linguaggi di interrogazione fanno parte della famiglia di linguaggi chiamata *Data Manipulation Language* (DML) che consente di accedere, implementare e modificare i dati in un database.

Come è stato messo in luce per quanto riguarda la traduzione del modello E/R in quello relazionale è necessario procedere ad una mappatura dei dati per garantire la corrispondenza tra la descrizione astratta del modello concettuale a quella logica basata

[4] Il *clustering* si riferisce all'unità di allocazione del supporto fisico deve vengono memorizzate le informazioni, il *buffering* invece si riferisce a quella parte di memoria fisica destinata all'uso temporaneo, per esempio durante lo spostamento dei dati.

sull'algebra relazionale. La maggior parte dei RDBMS utilizza linguaggi di interrogazione standardizzati basati sull'algebra relazionale come SQL (*Structured Query Language*). SQL è un linguaggio dichiarativo che consente di specificare cosa cercare e come cercarlo. Sul versante degli OODBMS mancano ad oggi dei precisi standard per la definizione di un linguaggio di interrogazione, è stato fatto un tentativo da parte del ODBMG (Object Database Management Group) di definire uno standard OQL (*Object Query Language*) che però ha avuto scarso seguito. Parallelamente allo sviluppo e al consolidamento dei RDBMS come modello più diffuso nella gestione delle basi di dati si svilupparono altrettanto diffusamente i linguaggi di programmazione orientati ad oggetti e quindi sorse il problema della traduzione delle informazioni del DB dal modello logico relazionale a quello ad oggetti utilizzato dai programmi per le operazioni sui dati stessi. Il problema della traduzione delle informazioni da questi due modelli diversi prende il nome di *impedance mismatch.*

4. Gli standard per l'archiviazione e l'interscambio dei dati

La ricerca verso la modellazione degli schemi di rappresentazione del pensiero e la loro traduzione in termini logici è un ambito di ricerca multidisciplinare che coinvolge diverse discipline scientifiche e umanistiche, in primis l'informatica e la linguistica. In questo insieme ampio e multidisciplinare la logica descrittiva insieme all'informatica è una delle discipline che ha contribuito maggiormente alla strutturazione formale e logica della rappresentazione della conoscenza umana in un ambito dominio di applicazione. Le applicazioni sono notevoli e vanno dall'intelligenza artificiale ai sistemi informativi e le tecnologie ad essi correlate. I contributi di tutte queste discipline hanno permesso la formalizzazione e strutturazione logica dei dati, premessa fondamentale per affrontare il problema della gestione di un archivio informatico e quindi della traduzione dal linguaggio umano a quello delle macchine secondo un meccanismo a cascata. Questo processo di traduzione, secondo una definizione in uso in ambito informatico, parte da una rappresentazione dei dati attraverso un linguaggio di alto livello, il linguaggio naturale dell'uomo, quindi attraverso una processo di astrazione, classificazione e specializzazione viene prima tradotta in termini formali e poi logico-matematici. L'ultima fase del processo e quindi il più basso livello di definizione del linguaggio è la memorizzazione fisica del dato.

Le definizione di linguaggi per la modellazione dei dati rappresenta sotto questo aspetto l'aspetto più interessante nell'ottica delle sue applicazioni alla gestione dei dati spaziali. La maggior parte delle specifiche tecniche che definiscono le norme per la codifica e lo scambio dei dati spaziali sono infatti formalizzate secondo i linguaggi utilizzati nell'ambito informatico. Le due fonti normative principali nell'ambito informatico che hanno contribuito a definire questi linguaggi sono il W3C (*World Wide Web Consortium*) e l'OMG (*Object Management Group*), cui naturalmente si affianca l'attività multidisciplinare dell'ISO (*International Standard Organization*) e di altre fonti specialistiche.

4.1. UML

Il linguaggio UML (*Unified Modeling Language*) [64], uno dei più importanti standard per i linguaggi di programmazione orientati ad oggetti, è stato definito dall'*Object Management Group*, organizzazione internazionale per la definizione di modelli e standard per i sistemi *object-oriented*, su un progetto originario definito nel 1996 da Grady Booch (cui si deve anche l'omonima notazione per i diagrammi), Jim Rumbaugh, Ivar Jacobson [11, 12]. Questo potente linguaggio di modellazione è uno dei più importanti e diffusi nell'ambito informatico per la formalizzazione delle caratteristiche e del comportamento di sistemi complessi. Esso è utilizzato dalle più importanti organizzazioni internazionali come l'ISO e l'OGC per la modellazione concettuale dei dati. Gli stan-

dard per l'informazione geografica ISO/TC211 e quelli OGC GML e CityGML fanno uso di questo approccio alla modellazione per rappresentare in forma schematica il contenuto delle specifiche.

> *«A metamodel is an instance of a meta-metamodel. The primary responsibility of the metamodel layer is to define a language for specifying models. Metamodels are typically more elaborate than the meta-metamodels that describe them, especially when they define dynamic semantics. Examples of metaobjects in the metamodeling layer are: Class, Attribute, Operation, and Component.*
>
> *A model is an instance of a metamodel. The primary responsibility of the model layer is to define a language that describes an information domain. [...]*
>
> *User objects (a.k.a. user data) are an instance of a model. The primary responsibility of the user objects layer is to describe a specific information domain.»*[1]

Il linguaggio UML è un metamodello cioè un modello del modello: la modellazione può essere considerata come un'astrazione della realtà ovvero la rappresentazione di un particolare punto di vista sulla stessa, la metamodellazione a sua volta studia le modalità con cui questa rappresentazione viene definita e organizzata. Un metamodello quindi descrive la rappresentazione astratta del modello. Questo concetto è stato formalizzato dall'OMG tramite la definizione dello standard MOF (*Meta Object Facility*). Secondo questo standard l'architettura di un metamodello è costituita da almeno due livelli che corrispondono alla struttura classi/istanze. Le specifiche del linguaggio UML in questa formalizzazione della gerarchia dei metamodelli corrispondono al livello M2, il terzo a partire dal basso. Al di sotto di questa vi è il modello dati utente (M1), quello che corrisponde al modello concettuale e logico dei dati, mentre l'implementazione fisica del database corrisponde al livello più basso della gerarchia (M0). [63]

> *«The Unified Modeling Language (UML) is a general-purpose visual modeling language that is used to specify, visualize, construct, and document the artifacts of a software system. It captures decisions and understanding about systems that must be constructed. It is used to understand, design, browse, configure, maintain, and control information about such systems. It is intended for use with all development methods, lifecycle stages, application domains, and media.»*[2]

Questo potente linguaggio nato per la modellazione ad oggetti di applicazioni software si è rivelato nel tempo uno strumento utile per tutte quelle applicazioni dove sia necessario strutturare dati e procedure in un linguaggio di alto livello secondo un modello grafico semplice e comprensibile. Le possibili applicazioni di questo linguaggio sono numerose: la definizione dei requisiti e del campo di applicazione di sistemi, il design

[1] OMG - Object Management Group, *Unified Modeling Language Infrastructure v.1.4.2,* Capitolo 4.2.1, p.15.

[2] Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional, Part.1 Capitolo 1, p.3

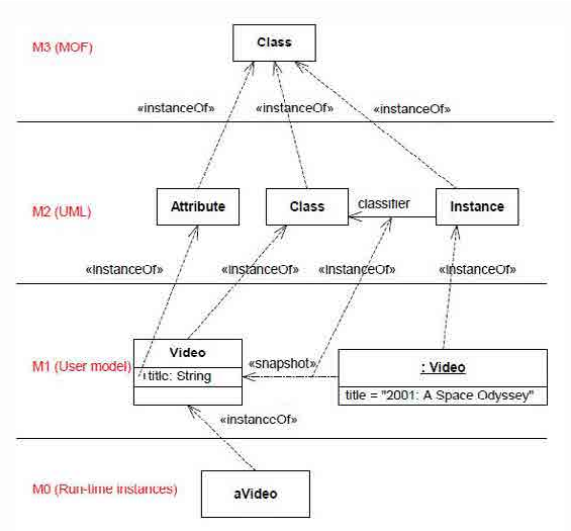


Figura 4.1.: struttura a 4 livelli di metamodelli. OMG - Object Management Group, *Unified Modeling Language Infrastructure v.2.4,* Capitolo 7.12, p.32.

di prodotti, la descrizione di procedure decisionali, la rappresentazione della conoscenza in un determinato dominio e l'organizzazione, gestione e l'accesso a grandi basi di dati.

Esempi dettagliati dei costrutti e dei meccanismi di estensione del linguaggio sono riportati nell'Appendice **Notazioni UML**.

Struttura e costrutti

La struttura di questo linguaggio è flessibile e si compone di diverse viste, che rappresentano dei sottoinsiemi dei costrutti UML e servono per definire gli aspetti del sistema in relazione ai diversi stati che questo può assumere. All'interno delle tre aree principali in cui sono raggruppate le viste (*structural, dinamic, model management, extensibility*) le viste che sono più utilizzate nella progettazione dei database sono quelle dell'area *structural*: *static view*, *use case view*, *implementation view* e *deployment view*. Queste viste, che rappresentano la parte fondativa del linguaggio UML, servono per descrivere la struttura degli oggetti cioè la rappresentazione delle informazioni di un determinato dominio e le procedure per gestire queste informazioni. Le prime due viste, *static view* e *use case view*, rappresentano la modellazione dal punto di vista logico mentre le successive, *implementation view* e *deployment view*, rappresentano due strumenti per la modellazione fisica del sistema. A ciascuna di queste viste corrisponde un determinato tipo di rappresentazione grafica sotto forma di diagramma: il diagramma di classe (*class diagram*) per la modellazione dei dati; il diagramma dei casi d'uso (*use case diagram*) per definire il comportamento del sistema ovvero come questo si relaziona con l'utenza.

Classificatori

Possono essere considerati come gli elementi costitutivi del modello ovvero la discretizzazione di concetti. Ciascuno di essi possiede un'identità, comportamenti e relazioni proprie. Essi possono descrivere classi di oggetti, tipologie di dati oppure concetti più

astratti come gli aspetti attitudinali, condizioni al contesto e strutture per l'implementazione. Il costrutto più utilizzato della progettazione dei database che incontreremo più spesso nella rappresentazione del modello GML e CityGML è la classe che viene rappresentata graficamente da una serie di compartimenti (solitamente tre) rappresentati da rettangoli e organizzati in una colonna verticale. Il primo compartimento contiene il nome della classe che può essere a sua volta suddiviso in una prima riga contente lo *stereotype* della classe e una seconda riga contenente il nome vero e proprio della classe. Il secondo compartimento contiene gli attributi della classe che sono espressi nella forma nome_attributo: valore_attributo, laddove i due punti rappresentano l'istanziazione dell'attributo tramite il suo valore. Il terzo compartimento infine descrive le operazioni o metodi o procedure applicabili alla classe.

Classifier	*Function*	*Notation*
actor	An outside user of a system	
class	A concept from the modeled system	
class-in-state	A class restricted to being in a given state	
classifier role	A classifier restricted to a particular usage in a collaboration	
component	A physical piece of a system	
data type	A descriptor of a set of primitive values that lack identity	Name
interface	A named set of operations that characterize behavior	
node	A computational resource	
signal	An asynchronous communication among objects	
subsystem	A package that is treated as a unit with a specification, implementation, and identity	
use case	A specification of the behavior of an entity in its interaction with outside agents	

Tabella 4.1.: classificatori e notazione della classe. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual,* Parte2 p.43.

Classi concrete e astratte

La classe rappresenta il costrutto centrale del linguaggio formale UML che corrisponde ad una determinata categoria di oggetti che per caratteristiche simili vengono raggruppati e definiti da attributi e relazioni comuni. Le classi concrete sono istanziabili mentre quelle astratte non lo sono. Queste ultime infatti sono uno strumento formale per le definizione di attributi e relazioni comuni a diverse classi. Le classi astratte sono solitamente scritte in forma corsiva e sempre precedute da il trattino basso _ .

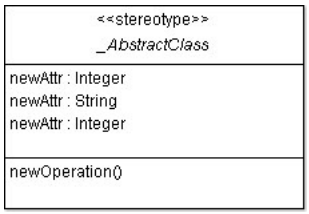


Figura 4.2.: esempio di classe astratta

Relazioni

Le relazioni tra le classi, che insieme ai classificatori costituiscono i principali costrutti del linguaggio UML, definiscono le modalità di connessione tra i dati. Tra le varie tipologie di relazione vi è l'associazione e la generalizzazione che definiscono le due modalità principali di connessione tra istanze delle classi. La generalizzazione formalizza il concetto di ereditarietà proprio dell'approccio a oggetti e mette in relazione un classificatore genitore (superclasse) con uno o più classificatori figli (sottoclassi) che ereditano gli attributi e i metodi della classe da cui discendono. Le associazioni descrivono invece le relazioni tra le istanze delle classi. Esse sono arricchite da particolari simbolismi grafici che ne denotano le caratteristiche come per esempio la cardinalità (*multiplicity*). Le associazioni possono avere attributi propri che, nel caso in cui questi siano identificatori primari di una determinata classe, assumono la denominazione di qualificatori (*qualifier*). I qualificatori associando un valore unico ad una determinata classe assumono un'importanza notevole nelle operazioni di indicizzazione. Tra le varie tipologie di associazione vi sono l'aggregazione (*aggregation*) e le composizioni (*composition*) che rappresentano la relazione di parte-intero: l'aggregazione rappresenta il legame più debole in cui le parti rappresentate non completano l'aggregato, mentre la composizione è totalmente suddivisibile nelle sue parti. L'aggregato è rappresentato da un rombo vuoto, mentre la composizione da un rombo pieno. La relazione di dipendenza (*dependency*) invece definisce la relazione tra elementi o moduli diversi di un modello.

Meccanismi di Estensione

UML prevede alcuni strumenti di estensione del linguaggio che permettono agli operatori la specializzazione di alcune proprietà dei costrutti base del linguaggio senza dover modificare la struttura del linguaggio. Alcuni di questi strumenti sono utilizzati nelle estensioni di questo linguaggio per descrivere i dati geografici (.GML e .CityGML) descritti nel Capitolo 10.2.

- *constraint*: rappresentano delle particolari restrizioni che possono essere applicate ai costrutti come classe e relazioni per definire un ambito specifico in cui essi si esplicano e restringere quindi l'immissione dei valori a quello specifico dominio. Essi vengono rappresentati tramite espressioni matematiche o in linguaggio informatico. Le espressioni sono precedute dalla descrizione dell'attributo cui si applicano e sono comprese tra parentesi graffe secondo la notazione nome_attributo: valore_attributo {*constraint's_ expression*}.

Relationship	*Function*	*Notation*
association	A description of a connection among instances of classes	
dependency	A relationship between two model elements	
flow	A relationship between two versions of an object at successive times	
generalization	A relationship between a more general description and a more specific variety of the general thing, used for inheritance	
realization	Relationship between a specification and its implementation	
usage	A situation in which one element requires another for its correct functioning	

Tabella 4.2.: tipologie di relazioni. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual,* Parte 2 p.46.

- *tagged values*: trattasi di una coppia di stringhe di attributi opzionali di cui la prima rappresenta il *tag* e la seconda il suo valore, secondo la notazione nome_tag=valore_tag. Essi solitamente utilizzati per immettere informazioni relative al progetto (metadati).

- *stereotypes*: sono lo strumento per adattare il linguaggio UML a determinate esigenze e contesti applicativi. Essi permettono di definire una determinata tipologia di elemento, già definita nel linguaggio, cui però aggiungono particolari restrizioni. Gli *stereotypes*, che possono essere applicati a tutti i costrutti (p.e. classi o relazioni), vengono utilizzati come riferimento base per la modellazione di uno specifico dominio applicativo, infatti ciascun stereotipo possiede una determinata serie di *constraints* e *tagged values*. Nella modellazione di un elemento ricorrente in un determinato ambito applicativo si può quindi fare ricorso agli *stereotypes* per descriverlo senza dover specificare ogni volta le restrizioni. Essi vengono indicati tramite la notazione seguente $<<stereotype's_name>>$ e sono seguiti dal nome dell'elemento base utilizzato per la creazione dello *stereotype*.

4.2. XML

Il metalinguaggio XML (*eXtesible Markup Language*) [96] è uno standard del W3C (*World Wide Web Consortium*), organizzazione internazionale per la definizione degli standard per il web fondata nel 1994 su iniziativa di Tim Berners-Lee che ne è il direttore. La sua missione è di sviluppare protocolli e linee guida per la diffusione e lo sviluppo del Web e le sue iniziative riguardano principalmente lo sviluppo dell'interazione da parte degli utenti del Web, la codifica della struttura dei dati scambiati e le caratteristiche semantiche degli stessi dati (Web semantico).

Tim Berners-Lee è universalmente conosciuto nell'ambiente informatico per essere uno dei padri fondatori del World Wide Web. Lee, quando era ricercatore al CERN di

Ginevra, si occupò di sviluppare sistemi distribuiti basati sulla tecnologia ipertestuale per permettere lo scambio di informazioni tra i ricercatori e, insieme a Robert Cailliau, è considerato l'inventore del Web. La prima idea di questo progetto risale al 1980 quando Lee sviluppò un programma chiamato ENQUIRE in grado di gestire ipertesti in sistemi distribuiti e che avesse la massima compatibilità per quanto concerne il formati di memorizzazione dei dati e la codifica della struttura dei testi. Questo progetto fornì la base per lo sviluppo della prima proposta nel 1989 [8] e la realizzazione del primo browser nel 1990 che fu poi implementato e reso pubblico nel 1991 con la nascita del primo web server e della prima pagina web. A Lee si deve inoltre la codifica del linguaggio di descrizione degli ipertesti HTML (*HyperText Markup Language*) e il protocollo di trasferimento HTTP (*HyperText Tranfer Protocol*).

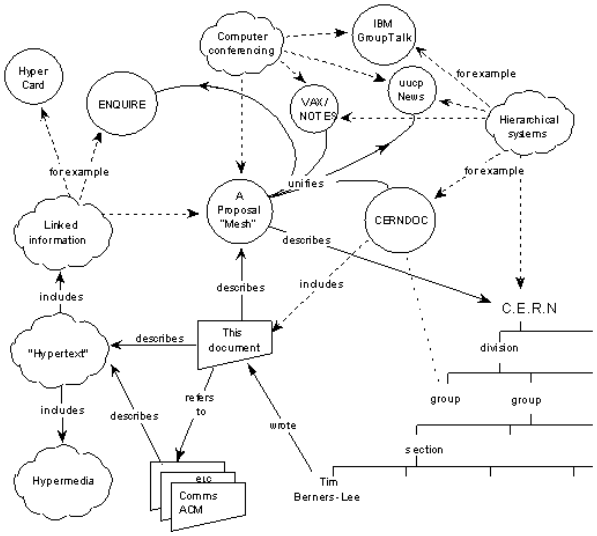


Figura 4.3.: diagramma da Berners-Lee, *Information Management: A Proposal*, CERN 1989

Tra i linguaggi sviluppati da questa organizzazione vi sono l'RDF (*Round Description Framework*), per la modellazione dei metadati e l'OWL (*Web Ontology Language*) per la rappresentazione formale di dominio di interesse tramite strumenti logico-computazionali, permettendo l'automazione dei processi di accesso e modifica dei dati da parte delle macchine.

Questi linguaggi insieme all'XML costituiscono le basi per la realizzazione del Web semantico. Essi sono gli strumenti che permettono la formalizzazione della struttura logica delle informazioni, i meccanismi di relazione e le modalità di accesso alle stesse. Uno degli aspetti più interessanti, che è alla base dello stretto legame che intercorre tra il World Wide Web e i sistemi informativi è rappresentato dallo sviluppo del web semantico che ha portato all'elaborazione di numerosi linguaggi per la modellazione di specifiche tipologie di dati in diversi contesti applicativi. Nel campo delle informazioni spaziali questo contributo è evidente dallo sviluppo di numerosi linguaggi basati su XML: COLLADA (*COLLAborative Design Activity*), IFC (*Industry Foundation Classes*), VRML (*Virtual Reality Markup Language*), il suo successore X3D, KML (*Keyhole Markup Language*) e soprattutto GML (*Geographic Markup Language*) e CityGML (*City Geographic Markup Language*) .

> «*The main idea of the Semantic Web is to delegate many current human-specific Web activities to computers. They can do them better and quicker*

> *that any individuals. But to enable computers to do their new jobs, humans need to express Web data in a machine-readable format suitable for completely automated transactions that do not require human intervention. This can be achieved by (1) identifying all Web and real-world resources in a unique way; (2) adding more and more metadata to Web data using XML, RDF, and other technologies; (3) creating general and domain-specific ontologies using RDF Schemas, OWL, and similar technologies; and (4) enabling computers to use simple logic in order to deal with Web data in a meaningful way [...].»*[3]

Tra altri gli standard definiti dal W3C si annoverano quelli per l'interscambio dei formati grafici: il formato vettoriale SVG (*Scalable Vector Graphics*) e il formato raster PNG (*Portable Network Graphics*).

Il linguaggio marcatore XML è stato sviluppato a partire dal 1998 per avere una maggiore flessibilità nella definizione dei metadati associati agli ipertesti e può essere considerato il successore del'HTML. Un linguaggio marcatore è un linguaggio per descrivere la strutturazione di un testo e i suoi meccanismi di rappresentazione. XML analogamente al suo predecessore HTML (*HyperText Markup Language*) è un linguaggio descrittivo, ma si differenzia da quest'ultimo in quanto è un metalinguaggio, cioè un linguaggio per mezzo del quale è possibile la definizione di nuovi linguaggi atti a strutturare i dati da rappresentare. Il linguaggio XML è un'estensione del SGML (*Standard Generalized Markup Language*) ISO 8879:1986 e come esso prevede la separazione tra la struttura logica e fisica, la separazione di dati e metadati (elementi e attributi) e i meccanismi di validazione tramite gli schemi XML (DTD *Document Type Definition* per l'SGML, XSD *XML Schema Definition* per l'XML).

> *«The design goals for XML are:*
>
> 1. *XML shall be straightforwardly usable over the Internet.*
> 2. *XML shall support a wide variety of applications.*
> 3. *XML shall be compatible with SGML.*
> 4. *It shall be easy to write programs which process XML documents.*
> 5. *The number of optional features in XML is to be kept to the absolute minimum, ideally zero.*
> 6. *XML documents should be human-legible and reasonably clear.*
> 7. *The XML design should be prepared quickly.*
> 8. *The design of XML shall be formal and concise.*
> 9. *XML documents shall be easy to create.*
> 10. *Terseness in XML markup is of minimal importance.»*[4]

Il metalinguagggio XML consente di caratterizzare semanticamente e strutturare logicamente le informazioni secondo schemi completi e consistenti dal punto di vista formale, permettendo inoltre la modellazione di linguaggi specifici per determinati contesti

[3] Vladimir Geroimenko, *The Concept and Architecture of the Semantic Web*, Springer-Verlag 2006, p.7

[4] W3C World Wide Web Consortium - *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*

applicativi e tipologie di dati. Il metalinguaggio XML è allo stesso tempo un modello concettuale per rappresentare i dati, uno schema logico e un formato di memorizzazione degli stessi. La forma in cui si presenta il dato è quella testuale che per essere correttamente interpretata necessita di uno schema, lo schema XML che è l'elemento chiave per comprendere questo linguaggio di modellazione dei dati. Lo schema XML è infatti il vocabolario che permette di interpretare il contenuto del dato e nello stesso tempo rappresenta la base logica per mezzo della quale è possibile estendere lo schema per comprendere nuove tipologie di dati e relazioni. Quest'ultima è appunto la caratteristica di un metalinguaggio, ovvero un linguaggio per descrivere il linguaggio.

Il metalinguaggio XML, insieme alle sue estensioni *X-Link* e *X-Query,* è un sistema per mezzo del quale è possibile costruire uno schema di rappresentazione logica della realtà per la gestione automatica delle informazioni. Queste caratteristiche permettono di collocare il metalinguaggio XML e la tecnologia ad esso associata come uno degli approcci alla modellazione logica dei dati. Più specificatamente l'approccio XML si colloca nell'ambito dei database NoSQL ovvero non relazionali. I database che si basano sulla tecnologia XML o XML database sono stati applicati in un primo momento alla gestione di informazioni testuali strutturate e collocandosi nella sottocategoria dei *document-oriented database*. Questi sono caratterizzati dall'orientamento alla gestione delle informazioni espresse per mezzo del documento ovvero un codice testuale direttamente accessibile dal sistema e utilizzato anche per lo scambio delle informazioni. Dal punto di vista dell'implementazione nel *file system* quest'approccio si concretizza nella memorizzazione delle informazioni in un unico file, a differenza del modello relazionale basato sulle cartelle.

Come abbiamo visto nel Capitolo 3 esistono due principali approcci alla gestione dei dati: quello ad oggetti, di cui UML rappresenta una formalizzazione concettuale e quello relazionale con gli strumenti del modello E/R per la progettazione concettuale. Molti dei costrutti del metalinguaggio XML sono simili a quelli del linguaggio concettuale UML permettendoci di definire XML come un livello logico del linguaggio caratterizzato da molti aspetti in comune con il livello concettuale di UML. Oltre al meccanismo dell'ereditarietà XML incorpora molti concetti propri della modellazione ad oggetti tra i quali ad esempio il *late-binding* che permette di definire nello schema alcune procedure da realizzare nella fase implementativa. Ad esempio l'xlink:show permette di definire se e come si vuole che sia presentato il risultato richiesto, ad esempio se nella stessa finestra oppure no. La traduzione di un linguaggio concettuale ad uno logico dipendono molto dall'approccio che i due seguono nella modellazione dei dati. Uno schema UML è implementabile in un DBMS relazionale, a patto di operare una ristrutturazione profonda nella struttura dei dati resa necessaria proprio dall'approccio diverso dei due linguaggi. Uno schema UML è invece traducibile automaticamente in uno schema XSD e viceversa permettendo quindi operazioni di ingegneria inversa che a partire da una realizzazione logica di uno schema ne riescano a restituire la versione di progetto ovvero concettuale.

Le potenzialità dell'utilizzo del linguaggio XML sono dimostrate dalla sua adozione da parte di enti di tutela nazionali, come le schede catalografiche SIGEC del ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione) e internazionali, come il modello semantico CIDOC (*Conceptual Reference Model*) sviluppato dal ICOM (*International Council of Museums*), analizzato nella Capitolo 2.2.

Schema XML

Viene utilizzato per dare una descrizione formale di un documento XML, fornire uno schema in linguaggio naturale dello stesso, definire il vocabolario base presente in documento XML, le tipologie di dato presenti e stabilire restrizioni relative alle modalità di espressione di determinati dati. Il ruolo dello schema XML è fondamentale per la definizione della struttura logica dei dati e le modifiche della stessa. Tramite esso è possibile interpretare il contenuto di un documento XML e quindi rappresentare le informazioni in modo corretto. Tutte le tipologie di relazioni che strutturano il modello e i relativi domini vengono espressi in modo logico. La traduzione di uno schema concettuale in uno logico comporta la formalizzazione delle relazioni tra le classi UML che vengono definite a livello delle stesse classi, rendendo implicite le stesse relazioni. In altre parole non è più possibile vedere direttamente lo schema concettuale che sta alla base del modello, ma è possibile derivarlo in modo automatico.

Il formato di schema XML raccomandato dal W3C è lo XSD (*XML Schema Definition*). Questo schema definisce un *namespace* (*xmlns*) ovvero uno spazio dei nomi cioè un ambito nel quale il nomi degli oggetti, delle relazioni o degli attributi implementati nei documenti XML sono univoci e definiti. Ad ogni *namespace* è associata una stringa che specifica il percorso per recuperare il contenuto dell'XSD. Questa stringa contiene un prefisso che codifica il namespace cui segue il percorso, separato dal prefisso tramite i due punti. Il *namespace* e la *schemaLocation* devono essere dichiarati nell'intestazione di ogni documento XML per permettere di interpretare correttamente il significato dei dati e validarne il contenuto. Lo schema dell'XSD, definito dallo standard del W3C, è qualificato dal *namespace xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"*. Questo namespace è definito dal prefisso xs che precede la definizione dell'elemento. Il namespace *xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance*" invece serve per codificare lo spazio dei nomi degli attributi e il relativo prefisso utilizzato è xsi. In questo schema XSD sono definiti i costrutti fondamentali di ogni schema XSD: tipi semplici e complessi (*simple type* e *complex type*), che formalizzano la struttura fondamentale dei dati e le relazioni che li qualificano [95], i tipi di dato (*data type*) che definiscono il contenuto dei dati e gli elementi o *element*. Gli *element* sono un'insieme di oggetti con caratteristiche simili. A differenza delle classi possiamo considerarli come una bottiglia senza etichetta, cioè non definiscono le relazioni che sono invece definite dai *complex type* invece sono un meccanismo di astrazione che permette di modellare anche le relazioni tra gli *element*. I *simple type* sono i mattoni base del linguaggio, quelli cioè con i quali è possibile definire e qualificare sia gli elementi che le relazioni. Ad esempio nel modello GML, *MeasureType* è il tipo semplice con cui è possibile definire una lunghezza. Il meccanismo dell'*extension* è una delle caratteristiche più importanti del linguaggio XML che è simile al meccanismo di ereditarietà del modello ad oggetti: viene definito una relazione di ereditarietà tra l'elemento e la sua *base*, definita tramite il parametro *derivedBy* attraverso il quale è possibile specificare se un elemento deriva da un altro per estensione o restrizione. Lo schema XML è quindi anche un costrutto del metalinguaggio XML per mezzo del quale possono essere effettuate modifiche alla struttura logica dei dati che si vogliono implementare.

La codifica delle informazioni nel linguaggio XML avviene in forma testuale, nella quale le diverse definizioni ed istruzioni sono strutturate tramite l'indentazione ed è possibile facilmente risalire alla struttura gerarchica degli elementi. L'indentazione delle righe è utilizzata infatti per esprimere le relazioni parentali tra gli elementi.

Un elemento che presenta un indentazione rispetto a quello della riga precedente è detto *child*, mentre il precedente è *parent* dello stesso. Se l'elemento viene ulteriormente specializzato in un altro *child* allora esso diventa anche il *descendant* del primo, che è il suo *ancestor*. Due elementi che si presentano su righe tra di loro non indentate sono detti *sibling*. Il seguente esempio è tratto dallo schema XSD del W3C *xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"*

xsi:schemaLocation="http://www.w3.org/2001/XMLSchema.xsd". Esso mostra la versione testuale del codice relativo alla definizione del tipo di dato *float* (numero in virgola mobile) tramite l'elemento *xs:simpleType*. L'elemento *xs:simpleType* definisce il contenitore di oggetti più semplice, l'elemento *xs:annotation* invece serve per inserire una serie di istruzioni suddivise in *xs:appinfo* per il processamento automatico e *xs:documentation* per la descrizione testuale. In blu sono evidenziati i marcatori di formattazione, in magenta gli elementi del *namespace* xs, in verde quelli con un *namespace* diverso, in rosso i nomi degli attributi e in nero i valori degli stessi.

```
<xs:simpleType name="float" id="float"
<!–tag di apertura dell'elemento xs:simpleType e definizione degli attributi name e id
corrispondenti al valore "float"; l'elemento xs:simpleType è parent rispetto all'elemento
xs:annotation e ancestor rispetto all'elemento xs:appinfo–>

    <xs:annotation>
    <!–tag di apertura dell'elemento xs:annotation utilizzato per le informa-
zioni non codificate dallo standard; annotation è child rispetto a xs:simpleType.–
>
    <xs:appinfo>
    <!–tag di apertura dell'elemento xs:appinfo che da inizio alla sequenza di
istruzioni. xs:appinfo è descendant rispetto a simpleType.–>
    <hfp:hasFacet name="pattern"/>
    <!–primo di una serie di di elementi caratterizzati dal namespace hfp,
definiscono una serie di restrizioni o facet.–>
    <hfp:hasFacet name="enumeration"/>
        <hfp:hasFacet name="maxInclusive"/>
            <hfp:hasFacet name="maxExclusive"/>
            <hfp:hasFacet name="minInclusive"/>
            <hfp:hasFacet name="minExclusive"/>
            <hfp:hasProperty name="ordered" value="total"/>
        <!–primo di una serie di elementi che definiscono le proprietà
        di xs:appinfo, gli attributi specificati qualificano lo specifico tipo di
        dato numerico–>
            <hfp:hasProperty name="bounded" value="true"/>
            <hfp:hasProperty name="cardinality" value="finite"/>
            <hfp:hasProperty name="numeric" value="true"/>
    </xs:appinfo>
    <!–tag di chiusura dell'elemento appinfo–>
        <xs:documentation source="http://www.w3.org/TR/xmlschema-
        2/#float"/>
</xs:annotation>
    <xs:restriction base="xs:anySimpleType">
    <!–tag di apertura dell'elemento xs:restriction che definisce l'elemento da
cui xs:simpleType è derivato per restrizione.–>
    <xs:whiteSpace value="collapse" fixed="true" id="float.whiteSpace"/>
    </xs:restriction>
```

```
</xs:simpleType>
  <!–tag di chiusura dell'elemento xs:simpleType–>
```

Lo schema seguente è estratto dallo schema XSD del W3C. Esso specifica le caratteristiche del tipo complesso (*Complex Type*) che è un elemento contenente altri elementi (*Simple Type*) - xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xsi:schemaLocation='http://www.w

```
<xs:complexType name="complexType" abstract="true">
<!–tag di apertura dell'elemento xs:complexType. La definizione dell'attributo abstract
come "true" permette di definire il tipo di classe astratta–>
    <xs:complexContent>
        <xs:extension base="xs:annotated">
            <xs:group ref="xs:complexTypeModel"/>
            <xs:attribute name="name" type="xs:NCName">
                <xs:annotation>
                    <xs:documentation> Will be restricted to
                    required or forbidden</xs:documentation>
                </xs:annotation>
            </xs:attribute>
                <xs:attribute name="mixed" type="xs:boolean" use="optional"
            default="false">
                <!–viene definito l'uso dell'operatore booleano–>
                    <xs:annotation>
                        <xs:documentation> Not allowed if simple-
                        Content child is chosen. May be overriden by
                        setting on complexContent child.</xs:documentation>

                    </xs:annotation>
            </xs:attribute>
                <!–vengono definiti gli attributi–>
                <xs:attribute name="abstract" type="xs:boolean" use="optional"
            default="false"/>
                <xs:attribute name="final" type="xs:derivationSet"/>
                <xs:attribute name="block" type="xs:derivationSet"/>
        </xs:extension>
    </xs:complexContent>
</xs:complexType>
```

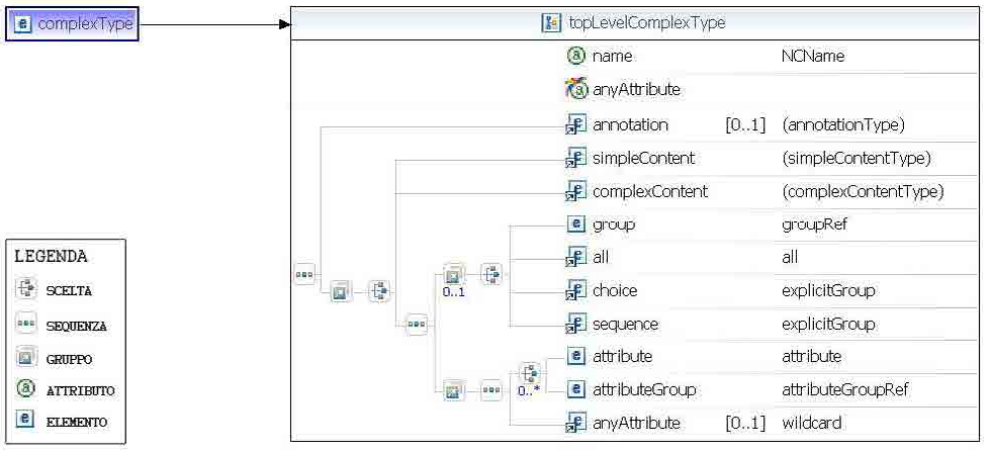


Figura 4.4.: visualizzazione schematica del *ComplexType*.

Gruppi di sostituzione

Il gruppo di sostituzione (*substitutionGroup*) costituisce un altro meccanismo di estensione presente nello schema XML. Esso si configura come un collegamento aperto, presente in ogni documento XML, che permette di sostituire elementi o tipi di dati con altri nei quali è specificato il gruppo di sostituzione, cioè il *namespace* e il nome dell'elemento di cui prenderanno il posto. Questo meccanismo permette la possibilità di associare diverse classi di oggetti alla stesso gruppo di sostituzione consentendo di specializzare la definizione delle classi a seconda di esigenze specifiche.

Meccanismi di estensione

XLink

Questa estensione del metalinguaggio XML permette la creazione di collegamenti semantici interni ed esterni tra diversi documenti XML. Simili agli *Hyperlink*, utilizzati nel linguaggio HTML, gli *X-Link* [97] si differenziano per essere multidirezionali e pertanto contribuiscono a strutturare in maniera più completa la topologia di un insieme di informazioni. Questo meccanismo, come avremo modo di analizzare nella sua applicazione nel linguaggio GML e CityGML, è molto importante perché ci permette di definire anche le relazioni topologiche tra gli oggetti geometrici. I collegamenti, o *XLink*, permettono infatti di definire una strutturazione dei rapporti topologici direttamente integrata nel contenuto stesso dell'informazione.

XQuery

> «*XML is a versatile markup language, capable of labeling the information content of diverse data sources including structured and semi-structured documents, relational databases, and object repositories. A query language that uses the structure of XML intelligently can express queries across all these kinds of data, whether physically stored in XML or viewed as XML via middleware. This specification describes a query language called XQuery, which is designed to be broadly applicable across many types of XML data sources.*»[5]

XQuery [100] è un linguaggio di interrogazione dei dati sviluppato per formulare istanze di interrogazione verso un documento o un insieme di documenti XML. La sua formulazione prevede una serie di espressioni che specificano la tipologia dei dati da ricercare, il percorso, gli operatori logici e matematici e permettono inoltre alcuni costrutti per modificare il contenuto e la struttura dei dati. Uno di questi è il FLWOR (*For Let Where Order Return*) [99], una sequenza di istruzioni che consente processi di iterazione e *binding* (collegamento statico e dinamico) su diverse variabili e il filtraggio dei risultati.

XPath *XPath* [98] è un sottoinsieme del linguaggio *XQuery* che consente la navigazione all'interno della struttura del documento XML tramite la specificazione del percorso di ricerca. La struttura XML è infatti esprimibile in termini topologici e

[5] W3C World Wide Web Consortium - *XQuery 1.0: An XML Query Language (Second Edition)*

quindi è possibile effettuare delle interrogazioni su determinate classi di oggetti. Tramite la specificazione dei nodi e/o dei valori atomici è possibile restituire una lista di risultati basati sullo specifico percorso di ricerca impostato.

XML Data Binding

Il *DataBinding* consiste nel processo di traduzione dei dati da un linguaggio di definizione ad un altro. L'*XML Data Binding* si riferisce alla traduzione dallo schema XML a quello ad oggetti UML e viceversa. La modellazione dei dati ad oggetti UML rappresenta il livello più alto di definizione del linguaggio di definizione dei dati e quindi il livello di astrazione maggiore e più vicino al linguaggio naturale. Lo schema XML corrisponde ad una strutturazione logica dei dati.

Il processo di traduzione dallo schema XML verso quello ad oggetti viene denominato *unmarshalling* mentre quello inverso *marshalling* o serializzazione[6]. Il procedimento di *unmarshalling* è dunque un processo di retro-ingegneria applicato ai software che a partire dalla realizzazione tecnologica di un prodotto ne riesce ad estrapolare lo schema di progetto.

[6]Il procedimento di serializzazione si riferisce più precisamente alla traduzione di una struttura dei dati ad oggetti in un formati fisico di memorizzazione. Nel caso dell'XML i termini *marshalling* e serializzazione coincidono.

Parte III.

MODELLAZIONE SPAZIALE

5. Approcci alla modellazione dei dati

L'informazione geografica descrive i processi antropici e naturali che si svolgono in prossimità della superficie terrestre per mezzo di sistemi per compiere operazioni su queste informazioni. Le informazioni geografiche possono essere ricondotte all'associazione di due diverse componenti: quella tematica e quella geometrica. La componente tematica rappresenta la modellazione delle caratteristiche del fenomeno geografico. La componente geometrica o spaziale[1] ne descrive la forma dell'oggetto nello spazio.

Lo studio dell'informazione geografica comprende gli apporti di un'insieme di discipline che contribuiscono alla modellazione di questi dati e una serie di sistemi applicativi per gestire gli stessi.

Essa viene chiamata anche GIS, laddove nell'acronimo il duplice aspetto descrittivo e applicativo viene rappresentato dal doppio significato che la S può assumere: si può parlare infatti sia di *Geographic Information Science* che di *Geographic Information Sistems*. Nel corso del tempo sono state suggerite infatti diverse definizioni che di volta in volta fanno riferimento all'aspetto applicativo del sistema oppure tentano di darne una definizione più ampia di scienza. Uno dei pionieri della ricerca sul GIS, Burrough autore di uno dei primi manuali di GIS [16] ha dato questa definizione che sottolinea gli aspetti applicativi del sistema:

> «*...a powerful set of tools for storing and retrieving at will, transforming and displaying spatial data from the real world for a particular set of purposes...*»[2]

Altri studiosi come Michael Goodchild hanno sottolineato come l'applicazione di questi sistemi abbia cambiato radicalmente l'approccio all'analisi dell'informazione geografica e vi sia la necessità di passare da una definizione di *Geographical Information Systems* a quella di *Geographical Information Science* e cioè di passare da un approccio puramente applicativo ad una visione più ampia dove i sistemi informativi spaziali vengono visti come l'intersezione di un gruppo di discipline con interessi in comune, supportate dall'applicazione della tecnologia, con il contributo che la tecnologia stessa porta alla ricerca di base [34].

> «*We need to move from system to science, to establish GIS as the intersection between a group of disciplines with common interests, supported by a toolbox of technology, and in turn supporting the technology through its basic research.*»[3]

[1] Il termine spaziale verrà utilizzato come sinonimo di geometrico, analogamente all'uso che si fa in ambito anglosassone del termine *spatial*

[2] Peter A. Burrough, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press 1986.

[3] Michael F. Goodchild, Geographical information Science, in *Proceedings of the Second European Conference on Geographical Informations Systems (EGIS)* 1991.

Quello che Goodchild sottolinea a proposito dei GIS è che lo strumento contribuisce a modificare la rappresentazione della realtà che chi lo utilizza si è creato. I GIS infatti in quest'ottica hanno effettivamente rivoluzionato la cartografia e le altre discipline legate alle trasformazioni del territorio, ma hanno anche contribuito a modificare la rappresentazione dello stesso che nel tempo si era consolidata attorno alle tradizionali forme di rappresentazione. La possibilità di mettere in relazione una serie numerosa di dati e di aggiungere a questi un nuovo contenuto frutto delle stesse relazioni che li legano ha aperto una serie di possibilità nuove per gestire e rappresentare la complessità che caratterizza i dati geografici.

Dal punto di vista dei fenomeni oggetto della modellazione dei dati e considerando i contributi che le altre scienze hanno dato al problema, essi si possono suddividere in due grandi classi fondamentali [36][54]. I processi appartenenti alla prima classe possono essere rappresentati direttamente con una funzione continua che associa ad una determinata posizione nello spazio un determinato valore in funzione dell'intensità del fenomeno modellato:$y = f(x)$ laddove y rappresenta il fenomeno da modellare mentre x la posizione nello spazio dell'oggetto. I fenomeni geografici sono quindi considerati direttamente dipendenti dalla loro componente geometrica. L'approccio continuo, chiamato anche *field approach*, prevede una diretta corrispondenza tra la componente spaziale dell'informazione e quella tematica. Il tematismo, che nella base di dati è definito tramite gli attributi, viene direttamente messo in relazione con la posizione spaziale dell'elemento in questione. Un simile approccio è maggiormente indicato per descrivere i fenomeni naturali che sono solitamente facilmente esprimibili tramite una relazione diretta tra la componente spaziale e il dato tematico. L'approccio continuo ci permette di modellare i fenomeni geografici in modo più facilmente esprimibile in termini matematici ed è infatti utilizzato nella modellazione dei fenomeni fisici tramite le equazioni differenziali, che sono uno strumento per descrivere la continuità dello spazio in termini matematici. Le caratteristiche del suolo sono un tipico esempio di fenomeno naturale che è facilmente esprimibile tramite una approccio diretto [35]. Questo approccio si rivela invece generalmente poco efficiace per esprimere la struttura articolata delle relazioni che intercorrono tra i manufatti dell'uomo e il territorio.

La seconda classe di processi invece fa riferimento ad un modello dello spazio sostanzialmente vuoto e discreto in cui cioè gli elementi che descrivono il fenomeno sono rappresentati da oggetti definiti da una precisa forma geometrica. In questo tipo di approccio lo spazio viene concepito come vuoto e le entità spaziali sono rappresentate da oggetti discreti che vanno a popolare il contenitore spaziale rappresentato dal sistema di riferimento. L'approccio discreto o *object-sctructured approach*[4] [54] introduce una categoria astratta di oggetti che realizza il collegamento indiretto tra tematismo e geometria. A differenza dell'approccio continuo l'informazione geometrica non è collegata direttamente agli attributi che rappresentano il contenuto tematico. Questo collegamento viene realizzato indirettamente tramite l'introduzione di una categoria astratta di oggetti che hanno il compito di mettere in relazione la componente tematica e quella geometrica. Questi oggetti hanno il compito di definire univocamente l'informazione geografica a prescindere dal suo tematismo o dalla sua rappresentazione geometrica. Questo tipo di approccio, a differenza del precedente, è più vicino alla strutturazione

[4]In questo contesto il termine *object*, associato a *structured,* fa riferimento alle caratteristiche dell'informazione spaziale e non all'accezione del termine in ambito informatico come *software objects* trattato precedentemente.

del pensiero umano, data la sua tendenza a mappare lo spazio come una segmentazione di oggetti discreti.

Il collegamento tra l'oggetto e la geometria rappresenta, in forma sintetica, una serie di formalismi per mezzo dei quali è possibile definire in termini astratti le categorie di oggetti da rappresentare o una parte di tutti quelle possibili. I formalismi, tramite una serie di postulati e regole, permettono di tradurre matematicamente la struttura geometrica e semantica degli oggetti e le loro relazioni reciproche. Il collegamento con la posizione nello spazio pertanto non è esplicito in questo schema di flusso, ma è implicito nella relazione che sussiste tra geometria e oggetto. Entrambi i due approcci sono stati formalizzati logicamente e matematicamente, ma mentre il primo presenta una struttura più semplice che si presta ad una traduzione matematica diretta il secondo presuppone l'introduzione di una categoria astratta di oggetti che definiscono appunto il contenuto dell'informazione geografica a prescindere dalla sua posizione e dalle sue caratteristiche.

> «*The earth's surface can be considered as a spatio-temporal continuum in which processes of different kinds take place.[...]*
>
> *Two major classes of processes can be distinguished:*
>
> *1. The first class refers to the processes with a field caracteristic, i.e. the strenght of the interacting forces is a function of the position and the resulting pattern can also be expressed in term of position dependent field values.*
>
> *2. The second class of processes is based on behaviour of (spatially interacting) objects, the resulting pattern of such a process can be expressed by the spatial distribution and the state of theese objects.*»[5]

> «*Two fundamentally distinct ways of conceptualizing spatial variation are recognized in GIS. In the discrete-object view, the Earth's surface is analogous to an empty table-top, on which are distributed a countable collection of features. The features may overlap, but between them is emptiness. [...] In the continuous-field view variation over the Earth's surface is described by a series of functions f of location x, where f may be a measure, as in the case of elevation or temperature, or a class or name, as in the case of maps of soils or counties.*»[6]

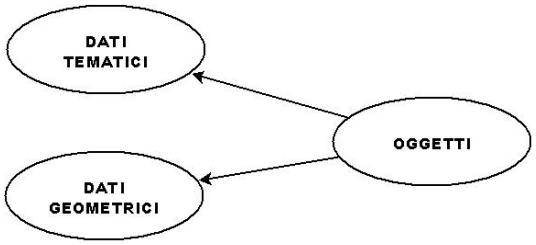


Figura 5.1.: approccio discreto.

[5] Martien Molenaar, *An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling for GIS*, Taylor and Francis 1998.

[6] Michael F. Goodchild, *Geographic Information System*, Springer - Verlag 2009, pp. 1231-1236.

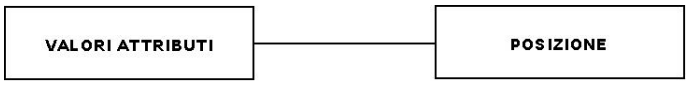


Figura 5.2.: approccio continuo.

Quale dei due approcci seguire è una sccelta che dipende naturalmente dalla tipologia dei processi da descrivere e precisamente se si tratta di fenomeni naturali oppure antropici. Quelli naturali possono essere modellati in entrambi i sistemi, anche se solitamente l'approccio continuo è quello più semplice da utilizzare per la maggior parte dei fenomeni che sono facilmente formalizzabili matematicamente. Se immaginiamo di dover implementare i dati geografici in un database secondo il modello relazionale, precedentemente descritto, possiamo sintetizzare lo schema delle relazioni tra i dati secondo l'approccio continuo. Semplificando il meccanismo possiamo affermare che le coordinate delle entità geometriche sono implementate in una tabella nella quale ad ogni identificativo viene fatto corrispondere l'attributo che definisce la posizione nello spazio dell'entità. Ad esempio un punto nello spazio cartesiano $\mathbb{R}^3$ verrà univocamente definito da un identificativo cui corrispondono tre attributi X, Y, Z. Un database spaziale presuppone necessariamente un'informazione tematica. Quindi come implementare l'informazione tematica? Una soluzione molto semplice è aggiungere un'altra tabella con attributi e quindi definire il contenuto tematico dell'informazione spaziale tramite i valori di questi attributi. Ogni tabella secondo meccanismo della chiave primaria avrà un suo codice univoco che permette la formalizzazione matematica delle relazioni tra gli attributi e i valori tramite la tupla. La rappresentazione del dato corrisponde al *join* tra le due tabelle sulla base della selezione di una lista di valori e una serie di operatori[7] . I dati antropici, come per esempio il tema edificato, presentano una strutturazione più complessa che può essere rappresentata secondo un approccio continuo solo con una perdita di gran parte delle relazioni che descrivono la struttura. Per poter gestire un'insieme più articolato di relazioni tra il dato tematico e quello geometrico è invece necessario introdurre una diversa categoria di oggetti, più astratta, che ci permette di introdurre nel meccanismo uno schema per strutturare i dati e inoltre ci permette di mediare il rapporto tra tematismo e geometria che appunto non è più diretto[8].

A partire da questa prima essenziale rappresentazione dei rapporti tra i dati spaziali e tematici nei successivi capitoli verranno analizzate nel dettaglio la struttura geometrica dei dati, i modelli spaziali per definirla e le modalità con le quali questi modelli permettono di rappresentare le informazioni geografiche e quindi anche il contenuto tematico. I modelli spaziali, che si basano su una serie di formalismi che definiscono l'insieme delle relazioni che sussistono tra gli oggetti geometrici, sono infatti il modo con cui la logica formale viene utilizzata per descrivere queste relazioni sulla base appunto di un modello astratto dello spazio e delle sue caratteristiche. Questi strumenti

[7] Questa descrizione è appunto una semplificazione dei rapporti tra il dato geometrico e quello spaziale che in realtà nei sistemi GIS sono solitamente implementati in una serie di tabelle diverse, ma a livello più generale lo schema delle relazioni è riconducibile a quello descritto.

[8] Questo schema di modellazione dei dati geografici si riferisce al livello concettuale della modellazione che è legato alla struttura logica dei dati indipendentemente dal formato di rappresentazione (raster o vettoriale) dei dati spaziali con cui questi vengono implementati. Il formato di rappresentazione infatti si riferisce al livello più basso di modellazione dei dati.

sono come vedremo fondamentali per determinare le stesse possibilità con le quali nei vari livelli di definizione del dato questo viene arricchito di significati per rispondere alle esigenze di descrivere le caratteristiche dell'informazione geografica. Verranno analizzati in particolare i modelli discreti o *object-structured* che sono alla base della maggior parte dei sistemi per la gestione dell'informazione geografica e non solo. Infatti questi approcci sono alla base di tutti i sistemi che permettono la gestione dei dati geometrici secondo i meccanismi di implementazione raster e vettoriale.

6. Spazio metrico e spazio topologico

La componente geometrica dell'informazione spaziale può essere suddivisa in due parti. La prima comprende una serie di informazioni che si riferiscono allo spazio metrico delle entità descritte, che sono: posizione e orientamento e dimensione. La seconda parte comprende invece le informazioni relative alle invarianti metriche, cioè a tutti quegli elementi determinati dalle relazioni spaziali tra le entità che non sono influenzati dalle precedenti caratteristiche metriche come ad esempio la forma di un oggetto. Questi elementi costituiscono la parte topologica dell'informazione geometrica.

Formalmente lo spazio metrico è un sottoinsieme dello spazio euclideo. Le rappresentazioni della componente geometrica dei dati spaziali sono definite univocamente nello spazio euclideo tramite i concetti di distanza, lunghezza e angolo. Il sistema di riferimento cartesiano è invece una rappresentazione dello spazio per mezzo di tre assi di riferimento che definiscono tre piani tra loro perpendicolari attraverso i quali è possibile definire univocamente la posizione di un punto nello spazio. Grazie al sistema di riferimento cartesiano è stato possibile applicare gli strumenti dell'analisi matematica alla geometria permettendo quindi ai concetti di distanza, lunghezza e angolo di essere facilmente esprimibili matematicamente.

La topologia utilizza gli strumenti della matematica per descrivere la forma degli oggetti spaziali e le loro relazioni nel modo più generale possibile. È stata definita da Frank e Khun come «*the general study of continuity*»[1]. I concetti che introduce posso apparire molto lontani dall'idea che siamo abituati ad avere dello spazio che ci circonda, ma il suo contributo è stato essenziale per lo sviluppo delle applicazioni della Scienza dell'Informazione Geografica. La costruzione di un formalismo logico che descriva il comportamento degli oggetti geometrici, intesi nella loro forma più astratta possibile, permette infatti di risolvere complesse analisi spaziali in termini di semplici operazioni logiche di identità o disuguaglianza. Questi formalismi si basano su una serie di costrutti basati su assiomi che permettono appunto di descrivere in termini logici alcune delle più importanti relazioni spaziali quali l'adiacenza tra gli oggetti, l'inclusione di un oggetto in un altro o l'intersezione tra due oggetti diversi. Lo spazio topologico è lo spazio definito in questo ambito tramite i concetti come la continuità, l'aperto, lo spazio connesso o le invarianti topologiche che permettono proprio di ridurre in forma logica le relazioni spaziali [52].

Un modello topologico permette una strutturazione dei dati spaziali secondo una formalizzazione degli elementi che la costituiscono. La rappresentazione di oggetti complessi viene definita dall'insieme di rapporti che legano le primitive geometriche tra di loro e permettono i meccanismi di aggregazione delle stesse. La forma dell'oggetto viene pertanto definita unicamente dalle sue proprietà intrinseche anzichè estrinseche.

[1] Frank e Kuhn, Cell Graphs: a Provable Correct Method for the Storage of Geometry in *Proceedings of the II International Symposium on Spatial Data Handling*, 1986.

La presenza di rapporti tra le forme geometriche più semplici che fossero indipendenti dalla loro rappresentazione nello spazio era nota fin dai tempi dell'antichità anche se essa non era stata dimostrata e formalizzata. Ad esempio le proprietà geometriche dei 5 solidi platonici erano già state, oltre che ampiamente descritte, anche dimostrate dal matematico greco Teèteto, citato appunto in un famoso dialogo di Platone. Questi studi sono stati poi integrati in uno dei più importanti libri della storia della geometria, gli "Elementi" di Euclide. Dovranno passare ancora molti secoli prima che venissero dati alla geometria di Euclide gli strumenti per descrivere le forme più complesse come per esempio le curve. Cartesio nella sua opera La Geometria, che è un appendice del celebre *Discorso sul Metodo*, formalizzò il sistema che prende il suo nome con lo scopo di riuscire a dare un senso più ampio alla disciplina che prescindendo dalle forme geometriche classiche permettesse ad esempio di riuscire a calcolare curve complesse come le coniche. Applicando gli strumenti del calcolo infinitesimale Cartesio riuscì a calcolare analiticamente queste forme.

Eulero, uno dei più grandi matematici di tutti i tempi, ha dato la prima definizione analitica di curvatura di una superficie come il prodotto della sua curva minima e massima determinata secando la superficie con due piani ortogonali tra loro. Ad Eulero si deve anche la formalizzazione della nota relazione che porta il suo nome e che lega le facce, gli spigoli e i vertici dei poliedri. Eulero è considerato uno dei padri della topologia per essersi posto per primo il problema di risolvere un problema geometrico unicamente dal punto di vista logico. Egli si pose il problema di dimostrare una credenza diffusa e cioè che nella città di Königsberg non fosse possibile attraversare tutti i ponti che la componevano senza passare due volte dallo stesso ponte. La città era formata da un isola centrale collegata ad altre tre zone per mezzo di cinque ponti secondo le schema nella figura. Eulero riuscì a dimostrare che non era possibile formalizzando logicamente queste relazioni. Lo strumento utilizzato per formalizzare queste relazioni che si sviluppano nel piano cartesiano è il grafo planare, composto da nodi e spigoli, detti anche cammini. Egli arrivò a stabilire che per percorrere un percorso, detto poi euleriano, passando solo una volta per ciascuno spigolo è necessario che esistano al massimo due nodi di grado dispari[2]. La sua elegante dimostrazione a questa relazione è diventata una pietra miliare della topologia [30].

Eulero è ricordato anche per un'altra importante caratteristica geometrica, la relazione tra spigoli, facce e vertici dei poliedri convessi che porta il suo nome. Questa relazione era in realtà già stata scoperta da Cartesio, ma questa informazione rimase nascosta fino alla fine del 1800, quando fu appunto riscoperta e dimostrata dal matematico svizzero. La caratteristica di Eulero è importante in topologia per formalizzare le relazioni geometriche nei modelli spaziali. Caratteristiche di alcuni tipi di poliedri erano già note ai Greci che avevano scoperto alcune proprietà invarianti in alcuni poliedri regolari, cioè equilateri ed equiangoli. Questi solidi, detti platonici poiché il filosofo greco ne parlò per primo nel *Timeo*, sono cinque: il tetraedro, il cubo, l'ottaedro, il dodecaedro e l'icosaedro. In un solido platonico tutte le facce sono poligoni regolari convessi e congruenti, nessuna delle sue facce interseca le altre se non negli spigoli e in ogni vertice si incontrano lo stesso numero di facce.

La formulazione della relazione di Eulero:

$$F - S + V = 2$$

[2]Il grado di un nodo è costituito dal numero di spigoli che insistono sullo stesso.

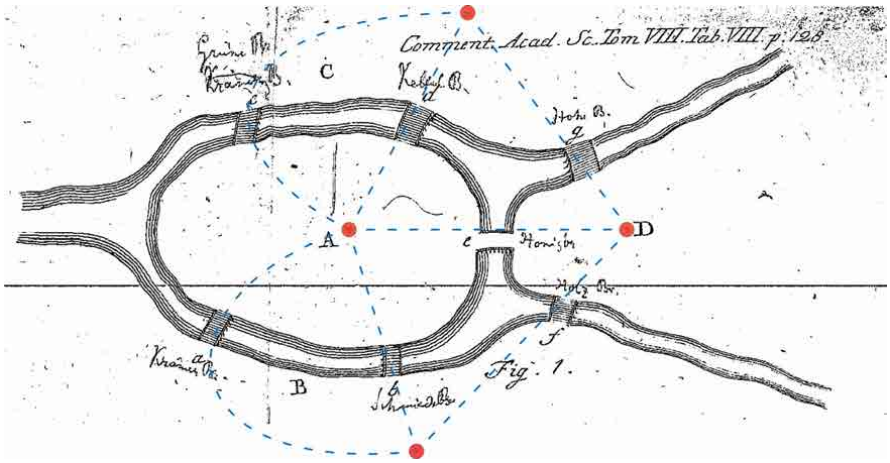


Figura 6.1.: il grafo dei ponti di Königsberg da Leonhard Euler *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*, 1741. Gli archi in azzurro identificano i percorsi o commini e i nodi in rosso le zone o facce collegate.

dove F sta per il numero di facce, V per vertici e S per spigoli. Definisce un invariante che caratterizza tutti i poliedri convessi indipendentemente dal numero di facce o spigoli ed è utilizzata in molti modelli spaziali per verificare la consistenza del modello.

Carl Friedrich Gauss, è un altro matematico che ha dato contributi importanti alla geometria e soprattutto alla cartografia. Egli mentre si occupava di rilevare il regno di Hannover, pubblicò nel 1828 il famoso *Teorema Egregium* che, insieme alle altre pubblicazioni scritte in quegli anni, rappresenta uno dei contributi più importanti della matematica allo studio e rappresentazione delle superfici e in particolare alla formalizzazione delle sue caratteristiche intrinseche come la curvatura. Uno dei problemi di Gauss era infatti quello di dimostrare che esiste un tipo di geometria superiore o assoluta che comprende quella euclidea, ma nella quale non sono validi i suoi postulati come per esempio quello delle parallele. La dimostrazione di queste teorie purtroppo non fu pubblicata da Gauss per timore delle reazioni degli illuministi kantiani, anche se è riconosciuta la sua paternità. Egli riuscì nel problema generale che per secoli era stato uno dei problemi principali della Geometria proiettiva ovvero quello di determinare lo sviluppo di una superficie sferica su un piano. Gauss appunto dimostrò che un piano ed una superficie non possono condividere la stessa geometria basandosi proprio sul concetto di curvatura della superficie. Definì la curvatura costante proprio come quella caratteristica intriseca di una superficie che permette lo spostamento nello spazio senza subire deformazioni. Egli stabilì inoltre che tra le superfici a curvatura costante solo quelle che hanno la stessa curvatura possono condividere la stessa geometria. Egli aveva perciò dimostrato le caratteristiche intrinseche che differenziano ad esempio una sfera dal piano. La sfera avendo una curvatura non nulla non può avere la stessa geometria di un piano e quindi essere proiettabile su esso. Nel suo nuovo modo di considerare il bordo di una superficie vi è l'inizio di un nuovo modo di considerare la geometria e soprattutto le geometrie non euclidee come quella proiettiva e sferica gettando le basi della cartografia moderna [55].

I concetti che introdusse Gauss portarono ad un radicale innovazione nel modo di approccio alla rappresentazione dello spazio. Essi furono ulteriormente sviluppati da Bernhard Riemann nel 1851, altro celebre matematico e allievo dello stesso Gauss, che

introdusse per primo un concetto nuovo nella Geometria per permettere di definire quelle forme che possiedono determinate proprietà invarianti dalla loro rappresentazione nello spazio. Questo concetto è la varietà o *manifold* proprio da lui definita nel tentativo di definire delle rappresentazioni nello spazio n-dimensionale che avessero un equivalente in quello euclideo. L'introduzione di questi concetti portò ad una ristrutturazione della Geometria. La scoperta della geometria iperbolica era già stata strutturata in un sistema più generale che comprendeva la geometria euclidea, la cosiddetta geometria assoluta. Le geometrie proiettive e sferiche invece non erano ancora state classificate, anche se era evidente che non facessero parte di quella assoluta. Il contributo di Gauss e Riemann è stato quello di chiarire che la geometria proiettiva e sferica non sono altro che sottoinsiemi della geometria ellittica.

I primi concetti che la topologia introduce sono omeomorfismo e spazio topologico che sono i primi tasselli di uno schema più ampio che, a partire dalla definizione delle caratteristiche dello spazio e delle trasformazioni che lo spazio può subire, qualifica le proprietà invarianti delle forme che sono la ratio della topologia. Per definire queste proprietà si fa uso di definizioni più generali possibili, definizioni che formalizzate matematicamente definiscono alcune proprietà fondamentali che sono molto vicine come significato a ciò che noi intendiamo con lo stesso termine. Termini come omeomorfismo separazione, compattezza, sono infatti nient'altro che la traduzione matematica di concetti che noi usiamo comunemente per qualificare queste caratteristiche degli oggetti geometrici.

- separazione: l'assioma di separazione permette di definire il primo mattone della topologia ovvero una delle proprietà delle forma che devono essere per forza invarianti.
- connessione: componente connessa espressa con la seguente notazione: $V \subset X$ ovvero V connesso a X.
- compattezza: uno spazio topologico si dice compatto se gli unici sottoinsiemi allo stesso tempo aperti e chiusi di X sono 0 e X. In altre parole è compatto uno spazio nel quale ogni suo ricoprimento aperto possiede un sottoricoprimento finito.
- aperto: si definiscono aperti una famiglia di sottoinsiemi di uno spazio topologico X tali per cui 0 e X sono aperti, l'unione arbitraria di aperti è ancora un aperto e l'intersezione di due aperti è sempre un aperto. In altre parole nessuna di queste operazioni può definire una chiusura all'interno dello spazio topologico X.
- parte interna: il più grande aperto contenuto in un sottoinsieme dello spazio topologico.
- chiusura: il complementare dell'aperto viene detto chiusura del sottoinsieme ovvero i punti aderenti ad esso, chiamato anche bordo o contorno.
- frontiera: l'intersezione tra i due insiemi.
- Spazio di Hausdorff è uno spazio che verifica l'assioma di separazione ovvero spazio chiuso dove cioè due punti distinti appartengono sempre ad intorni diversi.
- omeomorfismo:

«Un omeomorfismo è un'applicazione (funzione) continua e biiettiva con inversa continua [...].»[3]

Questo concetto è utilizzato per esprimere la proprietà di una forma di poter essere deformata e poi poter ritornare nella forma precedente. In altre parole è possibile applicare delle deformazioni che non strappino o buchino la forma e passare da una varietà topologica ad un altra.

- spazio topologico

  «Sia X un insieme, una topologia su X è una famiglia T di sottoinsiemei di X, detti aperti, che soddisfa le seguenti condizioni:
  (A1) 0 e X sono aperti
  (A2) Unione arbitraria di aperti è un sottoinsieme aperto.
  (A3) Intersezione di aperti è un sottoinsieme aperto.»[4]

- rivestimento o ricoprimento: dati X spazio topologico connesso ed E spazio totale viene definito ricoprimento di X una funzione continua e surgettiva $p : E \to X$ se per ogni $x \in X$ esiste un aperto $V \subset X$ tale per cui

  – $x \in V$;

  – se $U \subset E$ è una componente connessa di $p^{-1}(V)$ allora $p : U \to V$ è un omeomorfismo. E viene detto base mentre $p^{-1}(x)$ fibra o laccio[5].

  La traduzione di questo formalismo esprime la possibilità di definire appunto legami tra due insiemi diversi che soddisfino determinate relazioni, che sono poi quelle di connessione e compattezza precedentemente descritte. Il rivestimento è strettamente legato come concetto all'omeomorfismo in quanto ne specifica i meccanismi di trasformazione ovvero i lacci.

È possibile applicare questi concetti al sottoinsieme dei numeri reali $\mathbb{R}^n$ che significa tradurre in termini numerabili le proprietà precedentemente descritte. Questo equivale alla formulazione matematica della relazione tra uno spazio topologico (inteso come spazio di Hausdorff cioè come spazio connesso) e il particolare spazio topologico rappresentato dalla geometria euclidea. Esiste infatti un ramo della topologia chiamato topologia classica o indotta dalla distanza. In questo campo i concetti generali che formano le basi della formalizzazione topologica dello spazio vengono tradotti nello spazio della geometria euclidea, nel quale cioè è sempre possibile definire univocamente una distanza. Questa formalizzazione ci permette di inquadrare il problema del passaggio da una geometria ellittica ad una euclidea con una prospettiva più vasta ovvero quella della possibilità di modellare uno spazio a più dimensioni. I concetti molto generali e astratti che la topologia introduce per definire le relazioni spaziali applicati alla geometria euclidea assumono quindi un significato più vicino a quello che noi conosciamo. Il rivestimento di un insieme di punti nello spazio $\mathbb{R}^n$ può essere espresso in termini insiemistici come l'inviluppo convesso degli stessi punti, ovvero come la più piccola forma geometrica che è possivile 'avvolgere' attorno ad un insieme di punti. Un'altro

[3]Marco Manetti, *Topologia*, Springer-Verlag 2008, p.45.
[4]Marco Manetti, *Topologia*, Springer-Verlag 2008, p.38.
[5]Marco Manetti, *Topologia*, Springer-Verlag 2008,p.198.

concetto che viene introdotto nella topologia classica è la varietà o *manifold* che possiamo definire come uno spazio topologico che è possibile 'tradurre' in un sottoinsieme dello spazio euclideo.

- una varietà n-dimensionale è uno spazio topologico se è uno spazio topologico di Hausdorff, se ogni suo punto possiede un intorno aperto omeomorfico ad un sottoinsieme aperto dello spazio $\mathbb{R}^n$ e se le sue componenti sono a base numerabile. Questo concetto, fondamentale nella topologia, ci permette di modellare delle forme a più dimensioni. Un importante corollario che segue dalle caratteristiche precedentemente descritte è che la varietà rappresenta l'invarianza della dimensione.

Tralasciando tutti i corollari e cercando di dare un sintetico riepilogo delle applicazioni e del significato della topologia vogliamo riassumere proprio nella definizione di varietà l'elemento essenziale per capire come la topologia definisce lo spazio e quali sono i mattoni fondamentali per mezzo dei quali lo costruisce. Applicando questo concetto alle forma geometriche che conosciamo e che ci sono più familiari possiamo capire il linguaggio della topologia. Definita una superficie orientabile come una superficie nella quale è sempre possibile un vettore normale perpendicolare ad essa le superfici topologiche vengono classificate secondo un genere e una dimensione. La dimensione si riferisce alle caratteristiche invarianti della forma, mentre il genere rappresenta una classificazione tipologica delle superfici. Esso definisce sostanzialmente il numero di 'tagli' che è possibile effettuare su una superficie orientabile senza dividerla in due parti sconnesse. Equivale al numero di tori in cui è possibile decomporre una superficie connessa. Il genere è un invariante topologico delle superfici. È chiamato anche 'maniglia'.

Ecco che possiamo classificare topologicamente alcune forme: il punto è una varietà $0-dimensionale$ di genere 0. La linea e la circonferenza o anello sono varietà $1-dimensionali$ rispettivamente di genere 0 e 1. La circonferenza inoltre possiede anche un bordo. Sono varietà $2-dimensionali$ di genere 0 la sfera e il piano. È invece una superficie $2-dimensionale$ di genere 1 il toro che infatti a differenza della sfera è possibile taglire lungo una delle sue due direttrici. La sfera invece non è proiettabile sul piano, caratteristica che come abbiamo visto, dipende dalla sua curvatura positiva, che invece nel caso del toro è nulla. Una sfera sarebbe proiettabile sul piano solo uscendo dallo spazio dei numeri reali $\mathbb{R}$ e usando i numeri complessi $\mathbb{C}$. Questi sono stati utilizzati da Riemann per formalizzare la sfera $1-dimensionale$. Possiamo rappresentarlo immaginando di bucarla nel punto antipolare rispetto al punto di tangenza con il piano e allargare man mano il bordo che si viene a creare estendendolo all'infinito. La $3-sfera$, chiamata anche ipersfera, è invece rappresentabile nello spazio euclideo. Dal punto di vista matematico vengono chiaramente distinte le superfici dai volumi che esse possono contenere che sono invece definiti come solido. Il volume contenuto in una sfera è detto infatti palla e rappresenta una varietà $3-dimensionale$ sempre di genere 0 equivalente al disco $2-dimensionale$ (ovvero la parte racchiusa dalla circonferenza o anello). Queste caratteristiche vengono formalizzate attraverso uno strumento chiamato gruppo fondamentale il quale permette la formalizzazione algebrica di queste relazioni. La parte di topologia che descrive le dimensioni fino alla quarta è detta topologia della dimensione bassa.

La relazione euleriana, estesa e applicata a tutte le superfici chiuse e orientabili diventa la seguente:

$$F - S + V = \chi$$

dove χè definito come segue:

$$\chi = 2 - 2g - b$$

dove g definisce il genere della varietà e b il numero di contorni.

L'aspetto più significativo dal punto di vista della strutturazione di un database spaziale è la formalizzazione delle relazioni tra gli stessi oggetti spaziali (o le parti costituenti gli oggetti). Lo spazio metrico e quello topologico conducono a due approcci alla descrizione delle relazioni spaziali differenti: mentre nello studio delle relazioni metriche di un oggetto spaziale la formalizzazione di queste relazioni deve nessariamente fare uso di un sistema di riferimento esterno per rappresentarle, la formalizzazione delle relazioni topologiche, prescindendo dalla componente metrica e cioè numerabile delle proprietà degli oggetti, viene fatta a partire dalla struttura stessa della forma geometrica per mezzo di semplici operazioni logiche.

Nel campo della modellazione dei dati spaziali queste teorie hanno avuto un'importanza determinante nel fornire i presupposti per una strutturazione logico matematica delle forme spaziali a prescindere dalla loro collocazione in un qualsiasi sistema di riferimento. Questi presupposti hanno permesso la costruzione di formalismi per definire i legami tra le forme geometriche a partire proprio dalla definizione di simplesso, ovvero la forma geometrica più elementare che è possibile costruire in ciascuno spazio $n - dimensionale$. Questo permette di costruire a partire da forme più semplici aggregati di esse per ciascuna dimensione e di poter definire in termini chiari le relazioni che sussistono. Abbiamo visto come nei DBMS le relazioni tra diversi oggetti possano essere rappresentate logicamente. Uno dei più grandi contributi della matematica moderna è stata sicuramente l'Algebra di Boole che tramite l'introduzione di operatori logico-matematici ha permesso di tradurre le operazioni insiemistiche esprimendo tutte le relazioni che sussistono tra insiemi diversi tramite i valori di verità Vero e Falso ovvero 0 e 1. Il contributo di questa teoria all'informatica è stato determinante in molti settori, incluso quello dei DBMS e la sua importanza è evidente anche nei modelli di rappresentazione spaziale, basti pensare all'utilizzo di questi operatori nella modellazione per CSG (*Solid Constructive Geometry)*, analizzata nel Capitolo 7.3.

In letteratura nel corso del tempo sono stati studiati e sviluppati diversi modelli topologici, ciascuno dei quali si presta meglio per descrivere determinate tipologie di oggetti tridimensionali. Dall'analisi delle caratteristiche principali dei vari modelli si evince chiaramente come non sia possibile determinare a priori un modello unico in grado di descrivere una qualsiasi tipologia di geometria 3D, piuttosto determinare quale modello è più indicato per rappresentare una determinata tipologia di geometria, come per esempio gli oggetti antropici o quelli naturali. [**?**].

7. Le rappresentazioni spaziali

7.1. Introduzione

In questo capitolo saranno analizzate le caratteristiche dei principali sistemi di rappresentazione dei dati spaziali nello spazio euclideo $\mathbb{R}^3$, nel quale come abbiamo visto le relazioni spaziali sono esprimibili metricamente, cioè sulla base di concetti numerabili come le distanze e gli angoli. I modelli geometrici definiscono le modalità con cui viene costruita la sua struttura dei dati a partire dalla definizione delle sue componenti elementari o celle che concorrono alla costruzione dell'oggetto geometrico. Il modello topologico rappresenta un sottoinsieme di quello geometrico e formalizza logicamente le relazioni di un determinato sottoinsieme modelli geometrici permettendo di compiere operazioni di analisi prescindendo pertanto dalla componente metrica. Esso ha quindi una stretta relazione con il modello geometrico definito dalla rappresentazione spaziale.

Nei capitoli precedenti abbiamo introdotto alcuni concetti molto astratti utilizzati dalla topologia mentre in questo capitolo, riferendoci al sottoinsieme dello spazio euclideo $\mathbb{R}^3$ rappresentato dal sistema di riferimento cartesiano $\{X, Y, Z\}$, siamo nell'ambito delle rappresentazioni metriche cioè numerabili. È comunemente utilizzata nell'ambito della modellazione dei dati spaziali in generale la distinzione tra le rappresentazioni per superfici e per solidi. Le prime fanno parte delle cosiddette varietà $2-$*dimensionali* che abbiamo precedentemente descritto e che si possono sviluppare nello spazio $\mathbb{R}^3$, mentre le seconde fanno parte delle varietà $3-$*dimensionali* ovvero definiscono oltre al contorno dell'oggetto anche il suo interno. Nell'ambito dello spazio $\mathbb{R}^3$ definito dal sistema cartesiano possiamo inoltre fare una distinzione in relazione alla modalità con la quale vengono messi in relazione i valori che il dato assume nelle sue tre coordinate $\{X, Y, Z\}$. A prescindere dalla dimensione intrinseca dell'oggetto geometrico, ovvero la varietà $n-$*dimensionale*, abbiamo visto che esso si può rappresentare omemorficamente in un sottoinsieme dello spazio euclideo. Una sfera $2-$*dimensionale* ovvero una superficie sferica può essere rappresentata nello spazio $\mathbb{R}^3$ (così come il piano, la retta o il punto). I solidi $3-$*dimensionali* come la palla sono naturalmente rappresentabili solo nello spazio $\mathbb{R}^3$. Tralasciando le dimensioni più basse ci occuperemo qui delle superfici e dei solidi che si possono rappresentare in modalità diversa nello spazio $\mathbb{R}^3$ e cioè le rappresentazioni 2.5D e quelle 3D.

Formalmente possiamo definire quindi le rappresentazioni 2.5D come segue:

dato un determinato insieme di coordinate:

$$C = X, Y, Z$$

e la tripla

$$< x, y, z > \in C$$

$$\forall_z(\exists! < x, y > | < x, y, z > \in C,\ z > 0)$$

per ogni valore di z esiste una sola coppia $< x, y >$ tale che la tripla $< x, y, z >$ appartiene all'insieme C delle coordinate {X,Y,Z}.

Una superficie 2.5D, in un sistema di riferimento cartesianoR^3 dove i tre assi $\{X, Y, Z\}$ definiscono tre piani tra loro perpendicolari, può essere rappresentata esclusivamente per mezzo dei valori $< x, y >$ di ciascun punto proiettati ortogonalmente sul piano definito dagli assi XY a patto di associare a questi il valore $< z >$ che è pari alla distanza del punto rispetto al piano di proiezione XY. Immaginando di secare la superficie con una serie infinita di piani tutti paralleli al piano XY ad ognuna delle proiezioni sul piano XY di queste sezioni corrisponderà un solo piano secante, cioè un solo valore della z. Le rappresentazioni 2.5D possono pertanto essere considerate un'estensione di quelle 2D, nelle quali il tematismo rappresenta l'elevazione ovvero la distanza ortogonale delle *feature* rispetto al piano di proiezione della mappa.

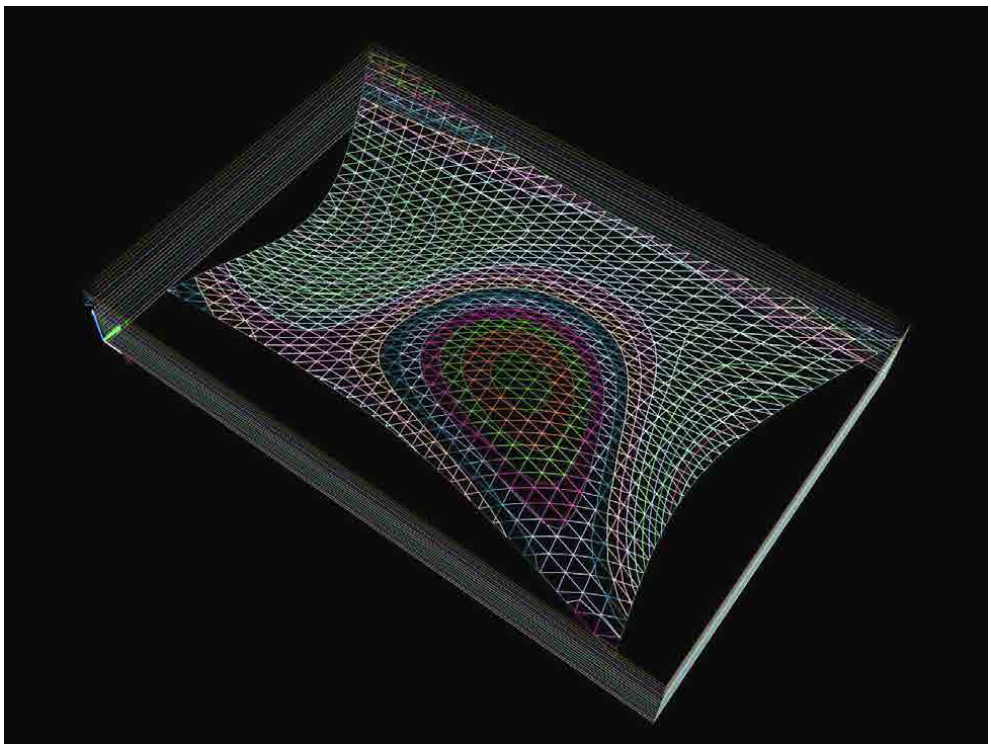


Figura 7.1.: rappresentazione 2.5D: i rapporti tra la rappresentazione e $C = X, Y, Z$, dominio dei valori delle coordinate $< x, y, z >$, è rappresentato dal vincolo dei piani paralleli a XY che possono avere un unico valore di $< z >$ in corrispondenza dell'intersezione con la superficie. Per ogni punto del piano XY non ci saranno mai infatti due valori diversi della coordinata $< z >$.

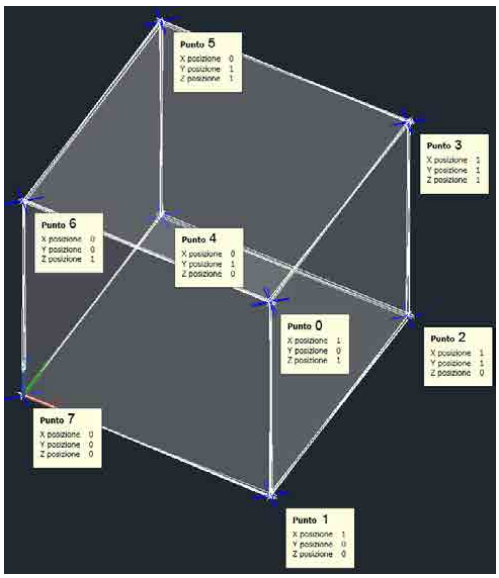
Questo meccanismo è utilizzato nella rappresentazione della componente altimetrica dell'informazione geografica che è uno degli strati informativi più importanti in un database cartografico. Le rappresentazioni 2.5D come i modelli a facce o le *grid* consentono un'accurata restituzione della superficie del terreno e permettono una serie di analisi spaziali come il calcolo delle linee di minima e massima pendenza. Non essendo

una rappresentazione 3D ovviamente non permette di modellare gli oggetti che stanno al di sotto della superficie terrestre o le cavità come i tunnel.

Un'altro degli strati informativi più importanti nella cartografia è il tema edificato rappresenta i manufatti frutto dell'attività antropica. Questo tema nelle scale di rappresentazione solitamente utilizzate che arrivano fino all'1:1000 viene rappresentato nello spazio cartografico bidimensionale per mezzo di una serie di poligoni che rappresentano la proiezione della sezione orizzontale dei parallelepipedi che rappresentano simbolicamente gli edifici. Questo tipo di rappresentazione come abbiamo visto prevede la contemporanea presenza di due valori di $< z >$ per ciascun punto proiettato sul piano XY. La presenza di questo doppio valore colloca questo tipo di rappresentazione spaziale nell'ambito di quelle che vengono identificate come rappresentazioni tridimensionali, ma come vedremo essa è ancora un'estensione delle rappresentazioni bidimensionali. Abbiamo visto nel nostro precedente excursus sulla nascita della topologia che molte tipologie di superfici tridimensionali che noi conosciamo come le geometrie ellittiche possono essere assimilate, entro certi limiti, a delle geometrie euclidee. La topologia infatti chiama giustamente queste tipologie di superfici varietà $2-dimensionali$ proprio perchè sono localmente sviluppabili sul piano. Quindi anche molte superfici che noi comunemente definiamo tridimensionali sono in realtà $2-dimensionali$. Nello spazio euclideo definito dal sistema cartesiamo possiamo quindi facilmente realizzare che anche una superficie tridimensionale può essere considerata bidimensionale a patto che essa sia sviluppabile sul piano. Ritornando alla rappresentazione del tema edificato possiamo immaginare di rappresentarlo in maniera simbolica per mezzo delle superfici che formano l'involucro di un parallelepipedo. Un parallelepipedo è un solido perchè contiene anche il suo interno, ma noi per il momento consideriamo solo le superfici che lo delimitano. Se consideriamo un parallelepipedo formato da un insieme di superfici parallele e perpendicolari al piano XY, come del resto succede nella cartografia, esso può essere facilmente visto come una superficie nel piano XY cui corrisponde un determinato valore della $< z >$. Esso infatti è definibile come con un profilo orizzontale cui corrisponde una determinata elevazione e che quest'elevazione rappresenta il moltiplicatore dell'estrusione del profilo di sezione secondo una direzione prestabilita che è sempre ortogonale al piano XY e quindi anche al profilo che appartiene ad esso. Possiamo quindi considerare anche questa tipologia di superficie tridimensionale come un estensione dello spazio bidimensionale.

Questo in accordo con la formalizzazione precedente: se infatti per ciascun punto del piano XY noi abbiamo un unico valore di $< z >$allora è facile intuire che è possibile anche rappresentare tramite questo meccanismo un parallelepipedo a patto di rappresentare solo la superficie che è definita dalle tuple contenenti i valori di $< x, y, z >$ più quelli di $< z >$ cioè in altre parole solo la faccia superiore del parallelepipedo. Tutte le altre informazioni che servono per descrivere le superfici del parallelepido sono implicitamente definite in questa relazione tra i valori di $< x, y >$ e $< z >$, in altre parole sono ridondanti. Tutte le aree delle superfici laterali sono infatti facilmente calcolabili proiettando la superficie sui piani XZ e YZ e calcolando l'area sottesa alle linee, mentre il volume è quello sotteso alla superficie. In altre parole possiamo dire che abbiamo ridotto un parallelepipedo alle sue tre proiezioni ortogonali. A questo punto ci è chiaro che siamo ancora nell'ambito delle superfici bidimensionali estese allo spazio tridimensionale. Questa semplice constatazione è alla base di quasi tutte le estensioni allo spazio tridimensionale dei sistemi GIS che infatti ammettono la possibilità di

estrudere i contorni degli edifici secondo la direzione normale al piano cartografico. In termini informatici questo valore però non è implementato nella stessa tabella dove sono contenute i valori degli attributi $< x, y >$ ma in una tabella diversa insieme cioè agli altri attributi delle entità geometriche. Le superfici che non sono rappresentabili sul piano XY sono quindi quelle per ogni punto registrano più di un valore della $< z >$(assumendo i valori di $< z >$ come sempre positivi). Nel caso della rappresentazione della cartografia urbana le superfici che non sono rappresentabili come un estensione dello spazio 2D, cioè che non sono rappresentazioni 2.5D, sono per esempio gli aggetti sulle facciate degli edifici, gli sporti dei tetti, le parti interrate, tutte le intersezioni tra diversi livelli stradali sopra e sotto la superficie del terreno.



Attributes of NODES.dxf Point

FID	Entity	Elevation	Angle	ExtX	ExtY	ExtZ	DocName	DocType	Scale	Scale	Scale
1	Point	1	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
2	Point	0	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
3	Point	0	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
4	Point	1	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
5	Point	0	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
6	Point	1	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
7	Point	1	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1
8	Point	0	0	0	0	1	NODES.dxf	DXF	1	1	1

Record: 0 Show: All Selected Records (0 out of 8 Selected) Options

Figura 7.2.: rappresentazione schematica dell'implementazione di un semplice parallelepipedo in un database secondo lo schema descritto: il parallelepipedo, o meglio le sue superfici, sono definite dall'associazione di questa tabella con con l'altra tabella contenente i valori di $< x, y >$.

Da questa semplice constatazione possiamo infatti fare alcune considerazioni riguardo l'implementazione dei dati in un database spaziale. La prima, è che anche gli strumenti tecnologici che permettono l'implementazione dei dati contribuiscono a definire le possibilità applicative degli stessi. Questi strumenti tecnologici sono essenzialmente degli strumenti di calcolo. I sistemi GIS sfruttano notevolmente le capacità computazionali delle macchine, sia perchè le informazioni spaziali sono relative alla superficie terrestre, che sappiamo essere rappresentabile solo localmente nella forma cartografica (cioè in uno spazio euclideo $\mathbb{R}^3$), sia perchè solitamente sono costituite da una mole notevole

di informazioni, sia geometriche che tematiche. Oggigiorno, ad esempio, la maggior parte degli strumenti applicativi dei GIS sono in grado di calcolare le trasformazioni da una geometria ellittica ad una cartesiana all'altra solo per quanto riguarda la componente bidimensionale del dato spaziale. Pertanto le potenzialità applicative dei GIS sono state nel passato fortemente condizionate dalle caratteristiche dei dati spaziali. Il GIS 3D è un esempio di questo meccanismo. I primi modelli spaziali tridimensionali risalgono ad alcune decine di anni fa, nel frattempo ne sono stati elaborati altri, di cui noi abbiamo fatto una rapida sintesi, i quali hanno contribuito a fornire gli strumenti per modellare diverse tipologie di dati spaziali in ambiti diversi. Nonostanti questo il GIS 3D come sistema applicativo non è ancora una realtà concreta e questo come abbiamo visto è dovuto essenzialmente ad un fattore tecnologico di sviluppo dei sistemi software che supportino i modelli spaziali 3D.

La seconda conseguenza è che lo sviluppo dei modelli spaziali e delle loro rappresentazioni nello spazio tridimensionale, permettendo una formalizzazione matematica della struttura geometrica, ha contribuito ad ampliare le possibilità applicative dei sistemi GIS. Uno dei principali problemi della cartografia è stato la rappresentazione della forma della terra. Essa, come sappiamo, non è precisamente definibile in termini matematici. Esistono dei modelli analitici che rappresentano la forma della terra nello spazio, tramite la misura della direzione della forza di gravità terrestre, ma vengono utilizzati solo per determinare il profilo altimetrico in una determinata zona mentre per la rappresentazione cartografica sono necessari dei modelli matematici che approssimino la forma della superficie terrestre. Essi sono sono gli elissoidi che fanno parte della famiglia delle quadriche, ovvero superfici complesse che appartengono alla geometria ellittica e vengono rappresentate nello spazio euclideo $\mathbb{R}^3$ tramite equazioni polinomiali. Il problema del passaggio da una geometria ellittica è stato risolto, come abbiamo visto, grazie agli strumenti del calcolo infinitesimale che hanno permesso il passaggio da una geometria all'altra per porzioni finite dello spazio. È stato quindi possibile quindi sviluppare su un piano (quindi nello spazio euclideo) porzioni di una geometria ellittica tali per cui la deformazione fosse localmente trascurabile. Se analizziamo più nel dettaglio le rappresentazioni per superficie possiamo vedere come la struttura logico-matematica sia alla base di molte possibilità applicative degli strumenti GIS nella gestione dei dati spaziali e in particolare per quanto concerne la gestione della componente 3D del dato geometrico. Le rappresentazioni 2.5D come quelle a facce o a griglia sono le più diffuse per la rappresentazione dei fenomeni geografici, ad esclusione del tema edificato e degli altri temi antropici, grazie al loro semplice ed efficace sistema di implementazione e sono anche quelle che la maggior parte degli strumenti tecnologici supportano.

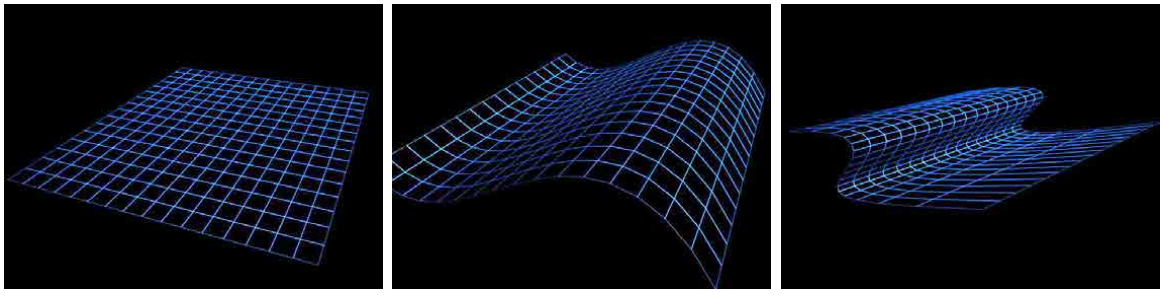


Figura 7.3.: da sinistra a destra: rappresentazioni 2D, 2.5D, 3D.

7.2. Modelli di superficie

Grid

Il *grid* è una rappresentazione 2.5D che si basa su un modello a griglia bidimensionale nel quale lo spazio è suddiviso in celle tutte uguali tra loro per forma e dimensione. Solitamente esse sono rappresentate da una serie di intervalli regolari sugli assi X,Y che descrivono una maglia a base quadrata analoga all'implementazione dei supporti bidimensionali raster. Questo modello di rappresentazione viene esteso allo spazio 2.5D con il meccanismo descritto precedentemente. Ad ogni cella della griglia raster, che rappresenta la proiezione in pianta dell'andamento della superficie, viene associato un attributo di elevazione che definisce la scostamento della superficie della cella rispetto al piano di proiezione secondo la normale allo stesso. Essi possono essere indifferentemente implementati mendiante rappresentazioni raster o vettoriali. Nell'implementazione raster questo attributo può venire rappresentato con un codice RGB associato ad una determinata mappa di colori. I comuni modelli di elevazione o DEM (*Digital Elevation Model*) si basano su questo schema. Una caratteristica di queste rappresentazioni dette anche raster per l'analogia con il formato di codifica dei dati è che le relazioni geometriche tra gli elementi non sono esplicitate tramite una discretizzazione formale degli elementi geometrici. Le relazione tra le celle cioè definiscono quelle che nell'approccio discreto sono considerate *feature* cioè caratteristiche geometriche discrete come punti o linee. Una relazione di adiacenza tra celle diverse caratterizzate dallo stesso valore di un attributo, come per esempio il colore, può essere calcolata e utilizzata per discretizzare una linea o un contorno. Il meccanismo di indicizzazione è semplice perchè si basa su uno schema regolare dove tutte le relazioni sono facilmente traducibili in termini logico-matematici, ma la formulazione di relazioni complesse non è possibile.

Modelli di Forma

Il modello di forma come il *grid* è una rappresentazione 2.5D che definisce l'andamento di una superficie per mezzo di una griglia di nodi bidimensionale alla quale viene associato un attributo di pendenza anziché di elevazione. Dato un determinato valore di pendenza è infatti facile costruire la normale in quel punto e quindi generare la superficie che interpola i punti. Lo stesso procedimento può essere utilizzato per ricavare la pendenza a partire da valori noti della quota. Esso infatti è ottenuto per mezzo della derivata, che come è noto definisce la tangente alla curva in un determinato punto. È possibile quindi facilmente passare da un modello di forma ad una delle altre rappresentazioni 2.5D. L'efficacia di questo modello è strettamente correlata alla possibilità di determinare la pendenza della superficie, solitamente misurata mediante procedimenti fotogrammetrici. Questo modello è stato efficacemente applicato alla modellazione delle superficie dei letti dei fiumi o dei fondali marini [70].

Facce

Il modello a facce definisce la forma di un oggetto tramite la sua scomposizione in superfici piane che possono avere differente forma e dimensione. La posizione nello spazio delle facce è definita tramite i nodi che compongono il contorno i quali sono univocamente definiti da un set di coordinare x, y e un attributo di elevazione z. Uno

dei modelli a facce più noti è la TIN (*Triangulated Irregular Network*) molto diffuso per la rappresentazione del terreno. Esso descrive una superficie 2.5D tramite una rete irregolare di facce triangolari. I modelli a facce sono facilmente trasformabile in un modello a griglia tramite una suddivisione dello spazio in celle regolari e una successiva interpolazione di valori di quota della faccia corrispondente ad ogni cella. Essi sono un sottoinsieme delle rappresentazioni per contorni (B-Rep) in quanto le superfici sono definite appunto dai piani passanti per i contorni delle facce.

Questo modello può essere ottenuto con procedure automatiche di interpolazione a partire da un insieme di elementi discreti quali punti e linee che definiscono alcune caratteristiche della superficie in un determinato punto. In questi modelli la superficie da descrivere viene scomposta attraverso le caratteristiche geometriche di punti e linee in un intervallo discreto di spazio. I punti identificano la caratteristica metrica della superficie che è rappresentata dallo scostamento del valore di z rispetto al piano di riferimentoXY. Questo scostamento o elevazione della superficie in un determinato punto viene solitamente associato ad un'informazione geometrica di tipo topologico ovvero la discretizzazione di un bordo che delimita una superficie da un'altra. Vengono selezionati degli insiemi di punti che descrivono con sufficiente approssimazione porzioni continue della superficie e vengono così determinate le zone in cui la variazione della curvatura della superficie è più marcata. Queste zone vengono rappresentate con linee di rottura o *breakline*[1] che rappresentano delle discontinuità, ovvero delle porzioni di superficie che non possono essere infinitamente derivabili, cioè approssimabili, e quindi vengono rappresentate in modo discreto tramite degli elementi geometrici. Questi elementi sono appunto le *breakline* che vengono utilizzate insieme ai punti per interpolare la superficie. Negli algoritmi di correlazione che mettono in relazione la distanza reciproca delle *feature* è possibile per mezzo delle *breakline* limitare il raggio d'azione delle analisi sulle distanze delimitando le zone di influenza reciproca dei punti. Questi algoritmi contengono solitamente meccanismi di suddivisione dello spazio come la triangolazione di Delaunay che rendono il più possibile omogenei gli angoli interni dei triangoli.

Superfici parametriche

Appartengono a questa categoria tutte le superfici parametrizzabili, cioè esprimibili generabili come primitive geometriche e le loro derivate come le superfici rigate o *ruled surfaces*. In genere questi sistemi sono utilizzati per la modellazione di superfici con curvatura costante o nulla per mezzo di equazioni di 2° o 3° grado. Appartengono a questa categoria anche tutte le superfici ottenute per mezzo di estrusione di profili di sezione.

[1] Questo termine viene utilizzato in modo generico per definire tutte le tipologie di linee che vengono utilizzate per discretizzare le variazioni di curvatura di una superficie. Negli algoritmi di calcolo che interpolano le coordinate delle linee con quelle dei punti è possibile classificare questi elementi in funzione del loro grado di discontinuità rispetto all'insieme. Questa classificazione permette di attribuire un peso diverso ad alcune di queste proprietà, peso che può essere utilizzato per smorzare o enfatizzare l'effetto di discontinuità rappresentato dalla *feature* geometrica. Le *breakline* sono solitamente classificate *softline*, ovvero piccole variazioni e *hardline* ovvero linee di rottura cioè punti in cui la curvatura di una superficie passa bruscamente da un valore ad un altro.

B-Rep

Le B-Rep (*Boundary Representation*) sono rappresentazioni 3D della superficie di un oggetto per mezzo della scomposizione in porzioni esprimibili matematicamente a partire dal loro contorno. Questo sistema, ampiamente utilizzato nei sistemi CAD, si basa sulla parametrizzazione della curvatura delle superfici che vengono utilizzate nella modellazione. A partire dalla modellazione delle curve che definiscono il telaio del modello vengono poi interpolate le superfici definite appunto per mezzo dei loro contorni. Questo sistema tra tutti quelli analizzati è quello che permette la maggior flessibilità per la modellazione di superfici con curvatura variabile. La parametrizzazione della curvatura delle superfici viene effettuata tramite equazioni polinomiali, come per esempio le curve di Bezier. Queste equazioni permettono di parametrizzare la curvatura in ogni punto tramite dei punti addizionali detti di controllo i quali, analogalmente ai punti di controllo utilizzati per le trasformazioni della geometria proiettiva, hanno la funzione di fornire i parametri incogniti per risolvere i polinomi. Una curva quadratica può essere pertanto definita dal punto iniziale e finale più un punto di controllo, le cubiche hanno due punti di controllo e così avanti. Le *B-spline* sono invece una generalizzazione delle curve di Bezier che permettono di approssimare anche curve definite da polinomi di ordine elevato senza produrre errori elevati negli estremi dell'intervallo analizzato. La modellazione di superfici con curvature variabili viene quindi effettuata estendendo il meccanismo dei punti di controllo al piano XY. Le superfici modellate con questo sistema vengono anche dette *patch*.

Tramite la scomposizione delle superfici per mezzo dei contorni è possibile ridurre ciascuna porzione delle superfici che compongono la forma da modellare a curve il che rende le B-Rep un insieme di rappresentazioni che si presta ad una facile formalizzazione topologica. Per quanto riguarda la formalizzazione delle relazioni tra la superficie e suoi nodi questa può essere esplicitata tramite un apposito attributo oppure essere implicita nella relazione tra il bordo e i suoi nodi. A questo proposito possiamo citare le ricerche condotte sulla struttura topologica delle B-Rep applicata al formalismo delle relazioni spaziali *9-Intersection Model* nelle quali si evidenzia come indicizzando opportunamente le relazioni tra le facce e i nodi i tempi di ricerca nelle analisi spaziali si riducono notevolmente [28]. Altre ricerche sono state condotte sulla relazione tra i modelli topologici 3DTIN e TEN, le rappresentazioni B-Rep e le classi spaziali GML evidenziando come una rappresentazione per superfici sia più efficiente e meno ridondante, potendo sempre essere integrata con una rappresentazione per solidi al momento opportuno [109].

A differenza della Geometria Solida Costruttiva, dove per la rappresentazione di oggetti complessi la struttura ad albero delle relazioni spaziali tra le componenti dell'oggetto aumenta all'aumentare delle sue componenti, nelle B-Rep la profondità della struttura topologica dell'oggetto è costante e indipendente dalla complessità dell'oggetto. Tuttavia tutte le operazioni di modifica dell'oggetto sono particolarmente complesse in quanto ciascuna operazione sulle primitive geometriche che lo compongono presuppone una ridefinizione delle relazioni topologiche associate a ciascuna primitiva, relazioni che nel caso della Geometria Solida Costruttiva sono invece automaticamente definite dagli operatori booleani. La sua capacità di rappresentare superfici irregolari e la sua maggiore efficienza computazionale negli algoritmi di renderizzazione l'ha resa insieme uno degli strumenti più utilizzati nell'ambito della modellazione solida, in particolare nei sistemi CAD/CAM. Molti sistemi di modellazione infatti utilizzano la

Geometria Solida Costruttiva nella fase di modellazione e la B-Rep per ottimizzare il modello nella fase di visualizzazione [108].

7.3. Modelli solidi

Spatial partitioning systems

Questa famiglia di modelli può essere essere considerata come un'estensione tridimensionale del modello bidimensionale a griglia. In questo tipo di rappresentazione lo spazio occupato dall'oggetto viene decomposto in unità elementari o celle le quali possono avere forma, dimensioni e rapporti reciproci diversi a seconda nel sistema utilizzato, ma tutti hanno in comune la totale scomposizione dello spazio in unità elementari parametrizzabili che sono una adiacente all'altra e non si intersecano mai reciprocamente. Le *cell cecomposition*, di cui il *3d array* rappresenta il modello più diffuso, costituiscono la tipologia di rappresentazione più semplice di questa famiglia mentre l'*Octree* presenta una struttura che permette la formalizzazione di determinate relazioni topologiche. Questi sistemi presentano lo svantaggio di aumentare notevolmente la mole dei dati immagazzinati e non consentono una definizione di forme e strutture geometriche complesse. La struttura di questo modello infatti, essendo molto semplice, non permette una formalizzazione articolata delle relazioni geometriche tra gli elementi. Esistono diversi modelli che descrivono la strutturazione per nodi e linee sulla base dei rapporti tra le celle che li contengono, ma è evidente che questo schema mal si adatta ad una rappresentazione discreta dello spazio per mezzo di primitive geometriche più complesse. Per questi motivi essi sono utilizzati soprattutto nella modellazione solidi non strutturati come ad esempio quelli derivanti da processi naturali come i depositi geologici o i fenomeni atmosferici [50].

Spatial occupancy enumeration (3D array)

Rappresenta uno dei sistemi di partizione spaziale nel quale le celle sono le unità elementari in cui viene suddiviso lo spazio occupato dall'oggetto. Questo sistema fa in realtà parte di una famiglia di sistemi a scomposizione regolare dello spazio *(cell decomposition)* di cui rappresenta il caso particolare nel quale lo spazio occupato dall'oggetto viene suddiviso in unità elementari identiche tra loro aventi tutte le stesse dimensioni in x, y, z. Questa unità elementare viene chiamata *voxel* per analogia con il *pixel* della griglia bidimensionale dei supporti raster. Analogalmente alle rappresentazioni raster bidimensionali i rapporti spaziali tra le celle possono essere facilmente formalizzati sulla base dei valori di determinati attributi, ma non consentono una rappresentazione di relazioni spaziali più complesse. In questo sistema come il precedente le relazioni tra le celle non vengono indicizzate.

Octree

Questo modello rappresenta, all'interno della famiglia delle partizioni spaziali, il sistema più articolato e efficiente sia dal punto di vista geometrico che topologico. Esso infatti, a differenza delle *cell decomposition*, presenta una strutturazione gerarchica dello spazio interno agli oggetti. La struttura formale del modello può essere considerata un'estensione tridimensionale dello schema bidimensionale del *Quadtree* secondo

il quale lo spazio viene suddiviso in quadranti o nodi ciascuno dei quali può contenere 4 nodi figli. Esso si basa sull'utilizzo dell'inviluppo dell'oggetto (MBR o MBV) per definire un meccanismo di aggregazione per contenitori sempre più grandi. Nello spazio tridimensionale dell'*Octree* ciascun nodo viene suddiviso in 8 figli (ottanti) i quali occupano pienamente lo spazio del nodo genitore secondo una struttura logica e geometrica chiara ed efficace. Esso nonostante presenti lo svantaggio della grande mole di dati da memorizzare e computare, presenta una struttura efficace per l'indicizzazione spaziale grazie alla sua struttura gerarchica [70]. Questo sistema è utilizzato anche nei processi di trattamento di dati metrici non strutturati come per esempio nella segmentazione delle nuvole di punti.

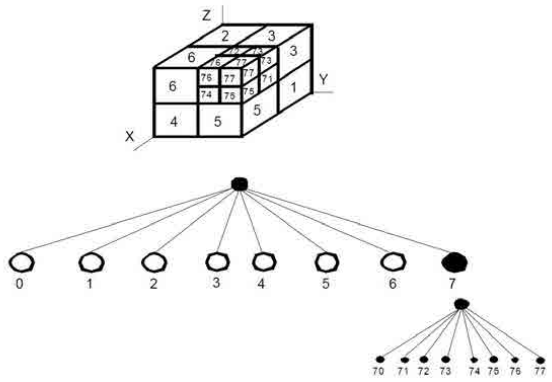


Figura 7.9.: esempio di strutturazione dei dati nell'*Octree* da Rahman e Pilouk, *Spatial Data Modelling for 3D GIS*, Springer-Verlag 2008, p. 34

Sistemi parametrici

Sono tutti quei sistemi nei quali la costruzione del solido viene fatta attraverso la definizione di una serie di regole geometriche precise. Sono simili alla modellazione per superfici parametriche.

Sweeping

Esso rappresenta una sottofamiglia di sistemi parametrici che hanno in comune la costruzione della geometria 3D a partire da una o più sezioni caratteristiche, una direzione o un percorso di trascinamento oppure un asse di rotazione. A questa sottofamiglia appartiene anche la rivoluzione, considerata come un'estrusione attorno ad un asse e tutti gli altri sistemi simili come l'estrusione secondo un percorso o il *lofting* che rappresenta il caso nel quale il profilo di sezione varia durante il percorso. Tutti questi sistemi, utilizzati per lo più nell'ambito della modellazione meccanica, presentano limiti nella possibilità di definire spazi topologici più complessi come per esempio un oggetto che interseca se stesso. Essi si limitano a descrivere solo determinate costruzioni geometriche regolari e sono più che altro applicati in ambiti particolari come il settore manifatturiero dove vengono utilizzati per valutare ad esempio la rimozione di materiale o la possibile intersezione di oggetti durante i movimenti del processo produttivo.

Fanno parte di questo gruppo l'estrusione di superfici secondo una direzione nota solitamente normale al piano contenente la sezione che è uno dei sistemi attualmente più diffusi nell'ambito delle applicazioni dei sistemi CAD. Esso mantiene un forte legame con la rappresentazione bidimensionale degli oggetti: i profili di estrusione sono assimilabili ad una proiezione in pianta dell'oggetto mentre la direzione di estrusione rappresenta l'estensione allo spazio 2.5D. È facile fare un parallelo tra questo sistema di modellazione e i modelli di elevazione raster nei quali lo spazio tridimensionale è limitato all'attributo di elevazione associato all'informazione bidimensionale.

Parameterized primitive instancing

Prevede la costruzione del modello solido per mezzo di primitive parametriche. Si parla di primitive geometriche nell'ambito della modellazione solida come di quelle forme geometriche ottenibili per mezzo di poche e semplici regole o parametri di generazione. In altri termini sono rappresentazioni che possono essere facilmente espresse tramite formule algebriche. Anche questo sistema è utilizzato prevalentemente in ambito industriale dove la modellazione di forme geometriche semplici è di gran lunga prevalente.

Geometria Solida Costruttiva

La Geometria Solida Costruttiva o CSG (*Constructive Solid Geometry*) è insieme alla B-Rep uno dei più utilizzati perché è uno dei più versatile. Esso è applicato soprattutto nella progettazione architettonica, ma anche in alcuni ambiti del design. Questo sistema si basa come i precedenti sull'utilizzo di una serie di primitive geometriche definite tramite opportuni parametri, le quali però vengono combinate tra di loro tramite l'utilizzo degli operatori booleani per ottenere il risultato finale. Attraverso operazioni di sottrazione, intersezione e addizione tra solidi diversi è possibile creare un'ampia varietà di geometrie 3D le quali mantengono una precisa relazione esprimibile in termini matematici con le componenti originali che sono state utilizzate per la creazione. Tramite la formalizzazione di queste relazioni è possibile tradurle in termini topologici e creare un insieme di indici che mettano in relazione le diverse primitive che sono state utilizzate per modellare il risultato delle booleane. All'aumentare della profondità di queste relazioni, ovvero quando gli strati di operazioni booleane sono numerosi, i costi a livello computazionale e di memorizzazione dei dati aumentano notevolmente. I numerosi studi e applicazioni suggeriscono che la CSG si rivela particolarmente efficace in tutti quei casi dove l'oggetto da modellare presenta una forma geometrica regolare e il numero delle primitive coinvolte nel processo di modellazione è limitato [70]. Questo sistema è naturalmente utilizzato anche in altre tipologie di rappresentazione come le B-Rep per calcolare le intersezioni tra oggetti diversi.

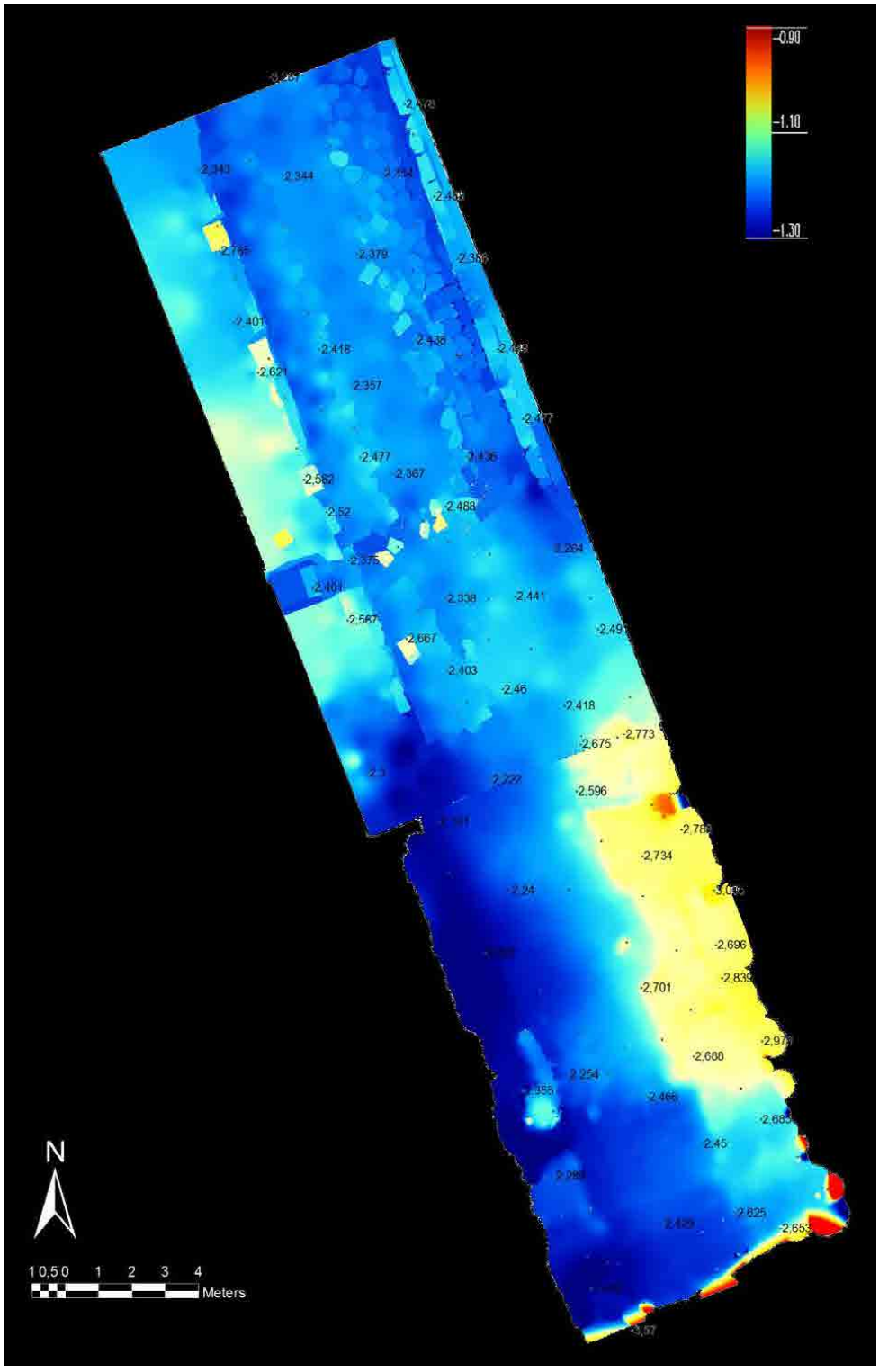


Figura 7.4.: esempio di modello di elevazione *grid* che descrive una porzione di una strada pavimentata romana di epoca tardo-imperiale, i dati provengono dalle acquisizioni effettuate sul sito archeologico di Aquileia (UD) grazie ad una collaborazione tra il Politecnico e l'Università degli Studi di Trieste [83].

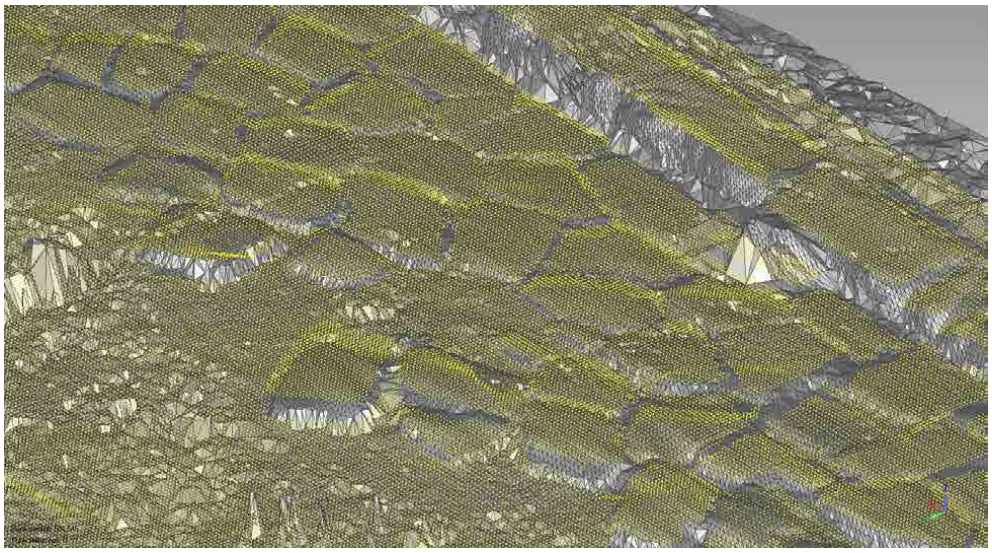


Figura 7.5.: esempio di trasformazione di un modello a *grid* in una TIN: la griglia di punti (giallo) è sovrapposta alla superficie triangolata ottenuta per interpolazione (grigio). Il modello di superficie descrive una porzione di una strada pavimentata romana di epoca tardo-imperiale, i dati provengono dalle acquisizioni effettuate sul sito archeologico di Aquileia (UD) grazie ad una collaborazione tra il Politecnico e l'Università degli Studi di Trieste [83].

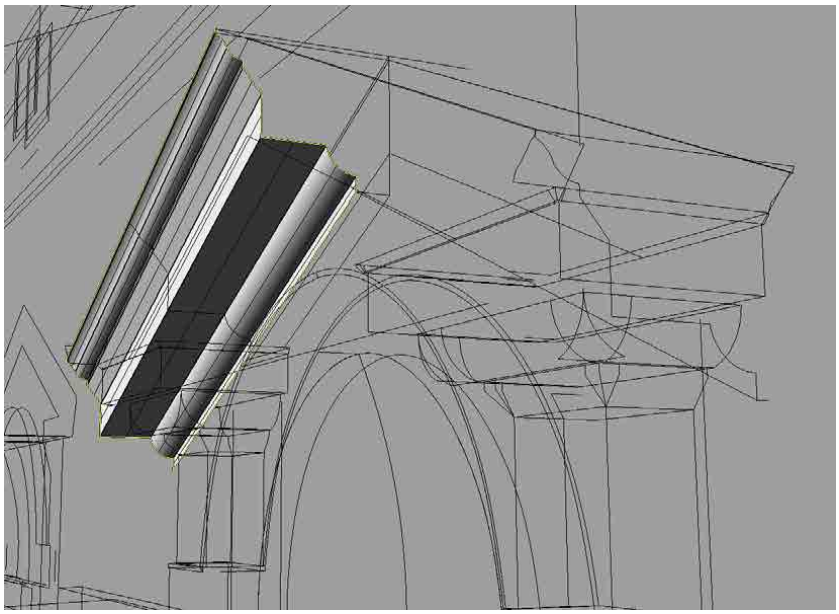


Figura 7.6.: esempio di modellazione per estrusione. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione.

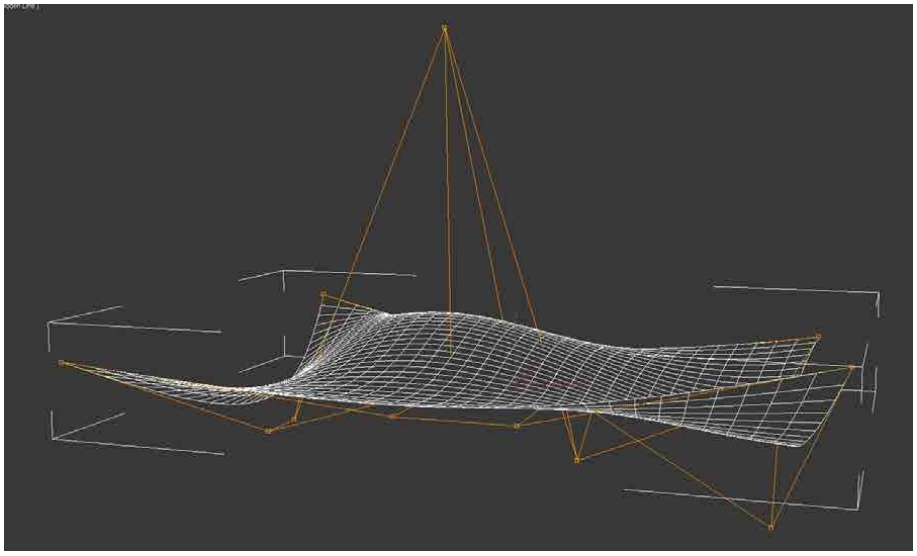


Figura 7.7.: esempio di modellazione di superfici tramite *patch*.

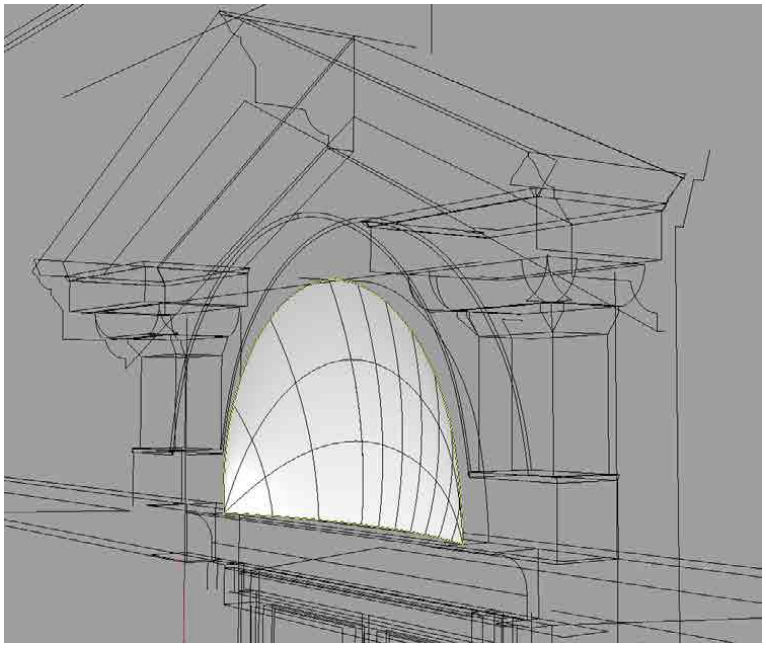


Figura 7.8.: esempio di rappresentazione tramite B-Rep di una porzione un particolare architettonico: la superficie da rappresentare non ha una curvatura costante ed è stata pertanto modellata tramite le *spline* che ne definiscono i bordi e il profilo e quindi interpolata. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione.

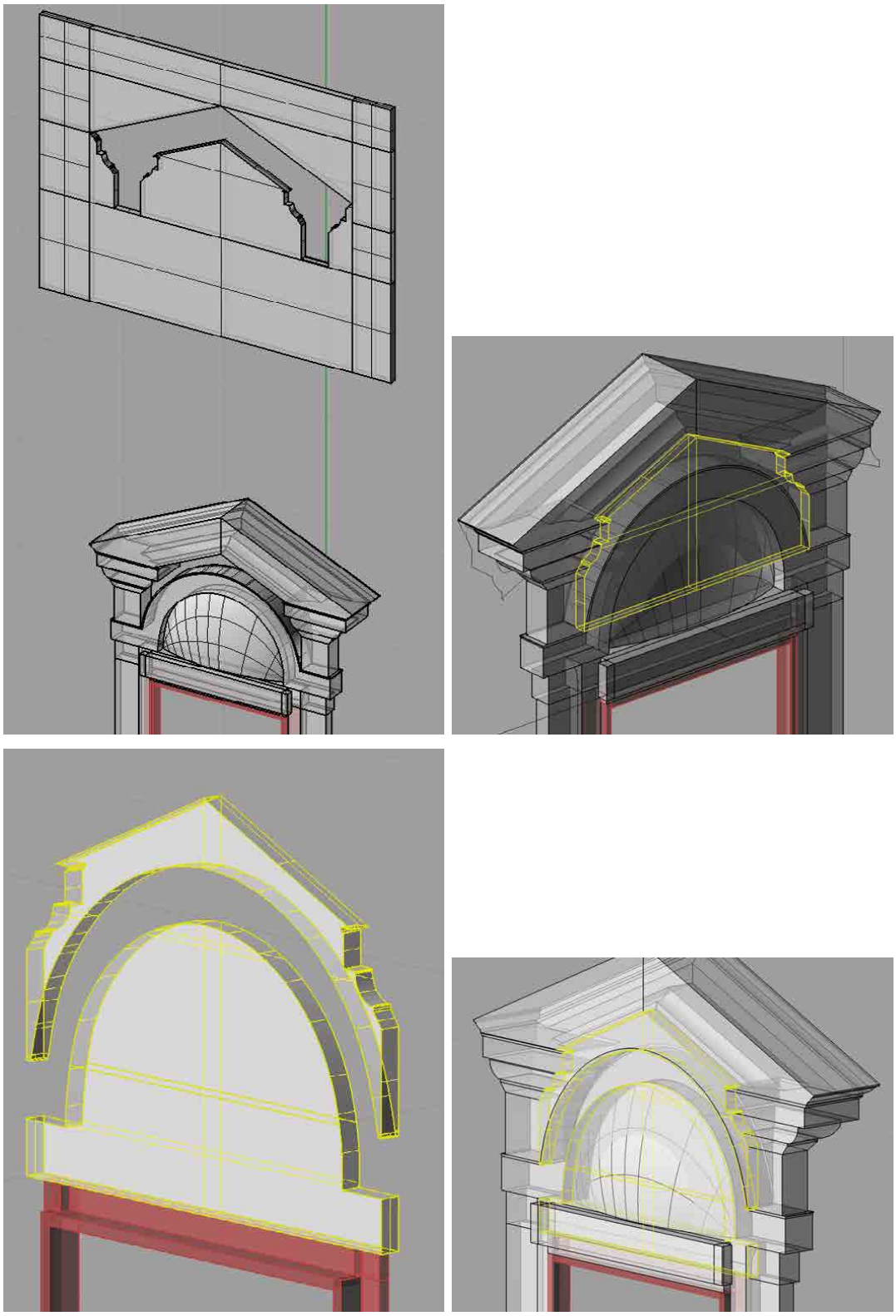


Figura 7.10.: utilizzo degli operatori booleani per la modellazione di oggetti definibili tramite l'intersezioni di altri oggetti ovvero i riempimenti o tamponamenti delle cornici. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione.

8. Modelli topologici

In questa sezione verrà fatto un breve riepilogo dei principali formalismi utilizzati per la modellazione delle strutture dei dati spaziali l'approccio *object-structured*. I modelli spaziali che formalizzano il meccanismo di relazione con i dati spaziali secondo l'approccio continuo, come abbiamo visto, sono utilizzati prevalentemente nella modellazione di fenomeni naturali che hanno un basso grado di strutturazione delle informazioni e una facile modellizzazione matematica delle relazioni.

8.1. *Cell graph*

Questo formalismo è stato uno dei primi ad essere formulati per la strutturazione discreta e topologica dello spazio per elementi discreti. Esso formalizza una strutturazione geometrica per mezzo di celle definite sulla base delle loro proprietà topologiche di connessione e separazione. Questa simbologia introdotta da Frank e Khun [32] si propone di definire un metodo per l'archiviazione dell'informazione spaziale che permetta la gestione separata della parte topologica rispetto a quella metrica e analitica. Nel 1986 egli sottolineava l'esigenza di definire un modello topologico caratterizzato da una rigorosa formulazione matematica che fosse in grado di essere facilmente applicato alla gestione dei dati spaziali per superare i limiti tecnici derivanti dall'utilizzo degli strumenti della geometria analitica le ricerche e indicizzazioni sul contenuto metrico.

> «*The basis objective of analytical geometry is the mapping from the two-dimensional plane to the space of tuples formed by two numbers (or a corresponding mapping for higher dimensions)*»[1]

Questo formalismo definisce la struttura di oggetto geometrico come composto da nodi, spigoli e facce. Le facce sono definite dagli spigoli che compongono il suo contorno e questi come segmenti che uniscono due vertici. Secondo questo formalismo tutte le relazioni che definiscono la sua struttura possono essere ridotte a rapporti tra queste componenti fondamentali. Per esempio due poligoni adiacenti dovranno condividere almeno uno spigolo comune e quindi due nodi. Lo spigolo condiviso da due poligoni che costituiscono un oggetto geometrico composto può essere quindi registrato in un apposita tabella topologica insieme alle relazioni dello spigolo con gli altri spigoli che compongono i poligoni adiacenti. Definite le celle ovvero i più semplici oggetti geometrici per ciascuna dimensione vengono formalizzate le relazioni che legano le aggregazioni delle celle per rappresentare oggetti geometrici complessi nei quali le relazioni tra le parti che li compongono sono strutturate secondo regole precise.

Per raggiungere il primo obiettivo vengono innanzitutto definiti i simplessi (*simplices*) come i più semplici poliedri per ciascuna dimensione e i complessi simpliciali (*simplicial complex*) come una collezione dei primi.

[1] Frank e Kuhn, Cell Graphs: a Provable Correct Method for the Storage of Geometry, *Proceedings of the II International Symposium on Spatial Data Handling*, 1986.

I simplessi sono inviluppi convessi $n-dimensionali$:

- $0-Simplex$: punto vertice o nodo è l'unico elemento della sua dimensione ed è quello che è legato alla componente metrica.
- $1-Simplex$: arco o spigolo. L'unico segmento che connette due punti è l'inviluppo convesso di due nodi. I nodi degli spigoli possono avere solo due orientamenti.
- $2-Simplex$: rappresenta l'inviluppo convesso più semplice $2-dimensionale$. Viene anche chiamato triangolo definito come contorno chiuso formato da tre spigoli nello spazio a 2 dimensioni. il contorno del triangolo è definito dall'insieme dei tre nodi e tre spigoli che lo compongono. Ciascuno spigolo condivide i propri vertici con uno dei vertici degli altri due spigoli i quali vengono ordinati in senso orario. I triangoli possono avere come gli spigoli solo due possibili orientamenti. Si assume che il verso orario sia positivo e lo si associa ad un valore positivo per l'area della superficie.

Questo formalismo può essere utilizzato per rappresentare inviluppi convessi e segmenti rettilinei nella loro rappresentazione più semplice. Per permettere la rappresentazione di forme più complesse come inviluppi concavi viene introdotto il concetto di cella tramite il quale viene generalizzato il simplesso per permettere di definire i complessi. Una cella è definita come spazio omeomorfico al simplesso. Si assume che le ogni cella sia costituita da un aperto e che quindi ciascuna cella non contenga il suo contorno. Ogni punto del piano appartiene ad uno e uno solo dei tre tipi di cella: $1-dimensionale$, $2-dimensionale$ e $3-dimensionale$. Se due spazi sono omeomorfici allora si può identificare i complessi come una combinazione di simplessi e caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- un complesso è connesso se ogni coppia di nodi è legata da uno spigolo;
- in un complesso l'unione di nodi è rappresentatata da tutti gli spigoli che lo delimitano cioè i suoi inviluppi convessi;
- i complessi di celle devono essere superfici chiuse quindi non sono ammessi nodi, spigoli o triangoli isolati, ogni spigolo delimita quindi solo due triangoli.

I complessi possono essere quindi considerati come collezioni di celle ovveri di simplessi. La definizione di un complesso $n-dimensionale$ è quindi quella più generale possibile di aggregazione tra elementi, ovvero quella per la quale le celle possono essere simplessi $n-dimensionali$ e ciascuna cella può appartenere a complessi diversi.

8.2. 3D TIN

La 3D TIN costituisce l'estensione allo spazio $\mathbb{R}^3$ della modellazione per celle $2-dimensionali$ rappresentata dal formalismo dei *cell graph*. Questo modello spaziale utilizza lo schema formale 3D FDS per costruire una TIN tridimensionale implementata in un DBMS a oggetti [69]. La struttura dei dati è simile a quella della TEN con la differenza nella modellazione logica secondo il paradigma ad oggetti. È stato implementato nel database commericale POET (*Persistent Object and Extended*

Technologies). Vengono definiti 3 classi di suddivisione dello spazio organizzate gerarchicamente: $TTinGen3D \rightarrow TVor3D \rightarrow TDT3D$, laddove la freccia rappresenta il rapporto di ereditarietà genitore-figlio. TTinGen3D è la 3DTIN generata; il TVor3D rappresenta la suddivisione dello spazio secondo i diagrammi di Voronoi e la TDT3D invece rappresenta la suddivisione dello spazio secondo la distanza.

Gli oggetti geometrici appartenenti alla superclasse *TSpatial object* sono i seguenti:

- Nodo
- Spigolo
- Poligono
- Solido

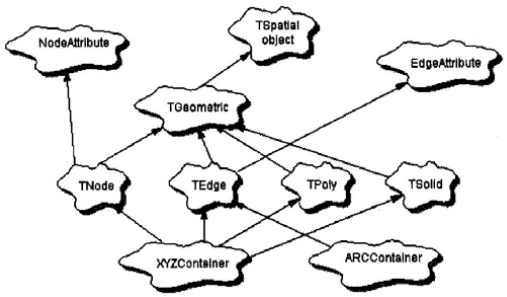


Figura 8.1.: 3DTIN da Rahman, Drummond, The Implementation of Object-Oriented TIN-Based Subsystems for GIS in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXII, 2000

8.3. TEN

Trattasi di un modello che prevede la completa scomposizione dello spazio (modello solido). La sua rappresentazione geometrica consiste in un modello solido formato dall'aggregazione di celle $3 - dimensionali$. Può essere considerato la controparte solida della 3D TIN che invece formalizza la rappresentazione della superficie esterna degli oggetti per mezzo di celle $2 - dimensionali$.

Questo modello sviluppato da Pilouk [68]si propone l'obiettivo di superare alcuni limiti imposti dalla struttura rigida elaborata da Molenaar con l'obiettivo di descrivere meglio tipologie di oggetti irregolari con contorni non ben definiti, come per esempio formazioni geologiche o fenomeni atmosferici [107].

Mentre il 3D FDS si presta abbastanza bene per descrivere oggetti complessi e geometricamente ben definibili come gli edifici, la struttura della TEN (*TEthraedal Network*) si fonda invece su una struttura più semplice che prevede una completa partizione dello spazio 3D [67]. Questo modello è basato sulla simbologia rappresentativa introdotta da Frank e Khun dei grafi a celle. Basandosi su questo schema vengono definite 3 differenti primitive geometriche, ad ognuna di esse corrisponde un relativo oggetto geometrico elementare (simplesso). Più simplessi possono essere aggregati per formare altri oggetti (complessi). Questo modello non ammette singolarità. Le primitive geometriche della TEN e i relativi simplessi sono le seguenti:

- *point features* $(0 - dimensionale)$ - *node*
- *line features* $(1 - dimensionale)$ - *edge*
- *area features* $(2 - dimensionale)$ - *triangle*
- *volume features* $(3 - dimensionale)$ - *tetrahedon*

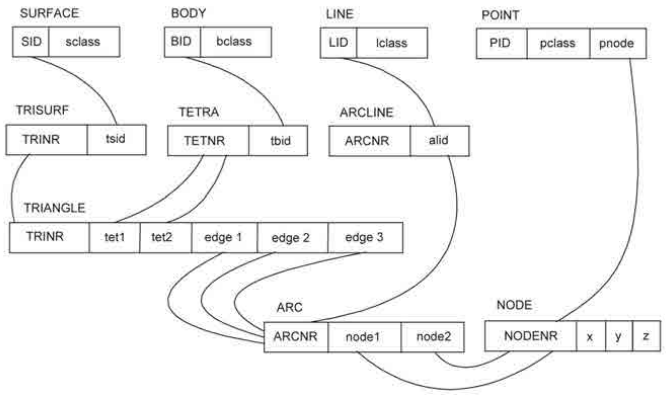


Figura 8.2.: *TEtrahedal Network* da Pilouk, *Integrated modelling for 3D GIS*, Tesi di Dottorato ITC - University of Twente 1996

Una delle caratteristiche di questa struttura dei dati è quella della completa scomposizione dello spazio in oggetti geometrici elementari o simplessi. Questa scomposizione, se da una parte presenta il vantaggio di esprimere con una struttura relativamente semplice qualsiasi tipologia di forma geometrica, d'altro canto comporta, rispetto al precedente 3DFS, un considerevole aumento della mole di dati da memorizzare. Se per esempio consideriamo un poliedro, utilizzato per rappresentare un edificio, possiamo notare che questo viene scomposto in 6 diversi tetraedri. Gli algoritmi utilizzati per decomporre oggetti complessi in tetraedri sono basati sulla triangolazione di Delaunay.

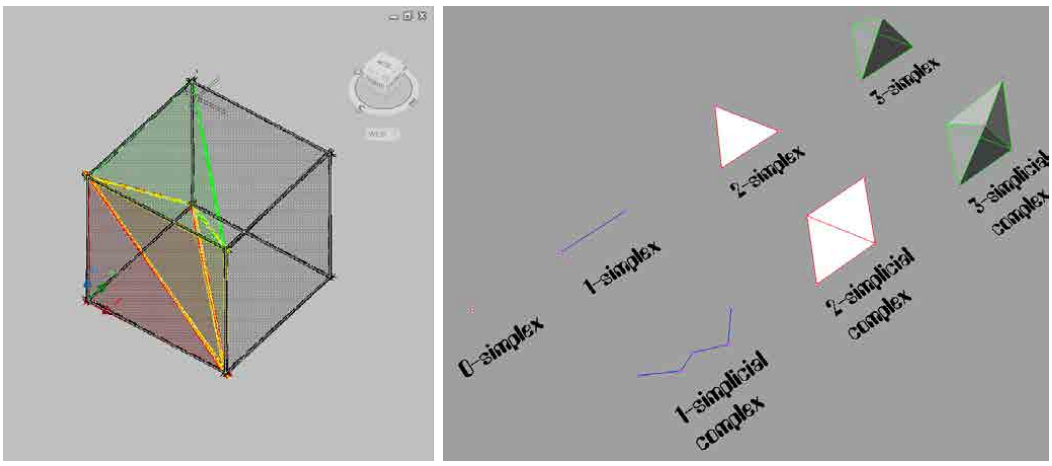


Figura 8.3.: suddivisione del cubo in tetraedri (sinistra) e la TEN in relazione al formalismo dei *cell graph* (destra).

8.4. 3D FDS

Il modello 3D FDS (*3D Formal Data Structure*) di Molenaar, basato sulla *Formal Data Structure* (FDS), è una struttura formale dei dati per descrivere oggetti geometrici tridimensionali con un singolo valore per ciascun attributo (SVVM, *Single Valued Vector Map*). Questa struttura formale è basata su una serie di assiomi o stringhe che hanno un valore relativo, stabiliti quelli viene definita la struttura che si basa su quelle regole [54].

Questi assiomi si basano sulla definizione delle seguenti primitive geometriche:

- Punto, definito univocamente dalla sua posizione.
- Arco, definita da posizione, forma e dimensione. Esso può essere rappresentato da un oggetto polilinea costituito da una serie di spigoli i cui nodi definiscono la forma e la posizione della stessa. Essi sono ricavati a partire dall'angolo sotteso ai rispettivi segmenti e alla loro dimensione. I segmenti di polilinea sono considerati nodi dello stesso oggetto.
- Aree, definite dai rispettivi contorni chiusi. Ciascun contorno definisce sempre il confine tra due aree diverse, una a destra e una a sinistra dello stesso.

1. La primitiva geometrica punto utilizzata per definire un oggetto geometrico è trattata come nodo.
2. La primitiva arco utilizzata per definire un oggetto è lo spigolo dello stesso ed è da considerarsi diritto.
    a) Il nodo iniziale e finale di un segmento non possono coincidere
3. Per ogni coppia di nodi esiste almeno uno spigolo che li unisce e questi possono essere uniti ad altri segmenti di una polilinea.
4. Gli spigoli non si devono intersecare e il nodo iniziale o finale di uno spigolo non può giacere su uno spigolo. Quest'ultimo assioma implica il soddisfacimento della caratteristica di Eulero.
    a) Nella simbologia a grafi piani i segmenti di polilinea non si devono intersecare.
5. Un nodo può rappresentare al massimo un entità punto.
6. Uno spigolo può essere parte di una sola primitiva arco e contribuisce a delimitare una primitiva area a destra e una sinistra.
    a) Un segmento di polilinea può far parte di una sola primitiva arco e come lo spigolo ha anche esso un'area a sinistra e una a destra.

La struttura dei dati *Formal Data Structure* (FDS) inizialmente definita per descrivere uno spazio 2D è stata successivamente sviluppata per essere estesa a rappresentare uno spazio 2.5D e 3D, introducendo la primitiva geometrica *body* e il corrispettivo oggetto solido. Gli assiomi precedenti vengono quindi estesi a definire tutte le relazioni tra le varie componenti degli oggetti solidi.

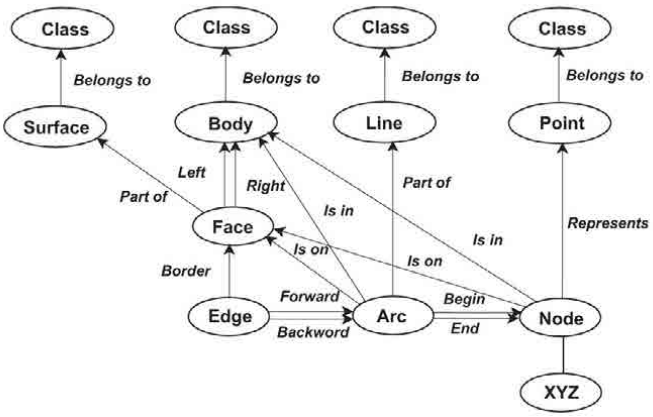


Figura 8.4.: 3D Formal Data Structure da Molenaar, *An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling for GIS*, Taylor and Francis 1998.

Ogni *feature* è identificata da un ID, la primitiva ed una singola classe tematica. Il modello prevede un valore singolo per ciascun attributo che descrive la componente tematica. Questi modelli sono definiti *Single Valued Vector Map* (SVVM). I modelli che invece prevedono la possibilità che la stessa *feature* assuma diversi valori di un determinato attributo vengono definiti *Multi Valued Vector Map* (MVVM) e permettono una rappresentazione multivalente degli oggetti per mezzo della quale è possibile filtrare le feature sulla base di una serie finita di valori degli attributi. Un esempio di modellazione multivalente, ad esempio, è quella che permette di restituire la rappresentazione dell'oggetto contemporaneamte a diversi livelli di dettaglio, come nel caso del modello CityGML analizzato nel Capitolo 10.2.

La relazione tra arco (*arc*) e nodo (*node*) definisce che un nodo è l'inizio o la fine di un'arco, quella tra spigolo (*edge*) e arco definisce che uno spigolo possiede un davanti e un dietro, cioè le due direzioni in cui può essere percorso l'arco, in avanti e indietro tramite i suoi nodi (lo spigolo è l'inviluppo convesso di due nodi). Lo spigolo è il bordo o contorno di una faccia (*face*). Una faccia è sempre destra o sinistra in un solido. Questo significa in altri termini dire che in un solido (*body*) (anch'esso inviluppo convesso) è sempre possibile definire un dentro e un fuori. Gli spigoli infatti sono sempre ordinati in senso orario per permettere di stabilire i verso della normale che è quindi sempre uscente se il verso è orario e entrante se è antiorario (regola del pollice su). La presenza di due classi di primitive, spigolo e arco che identificano la linea (*line*) permette di definire in maniera autonoma una relazione con la faccia, indipendente da quella dI spigolo. La relazione faccia e arco e nodo è infatti più generale (*is on*) e definisce solo che un arco e un nodo appartengono ad una faccia. Per questo motivo sono ammesse singolarità cioè nodi o archi su una faccia o su un solido.

8.5. SSM

Il *Simplified Spatial Model* (SSM) è stato elaborato da Zlatanova nella sua tesi di dottorato [103] con la finalità dell'applicazione alla gestione delle informazioni in ambito urbano. Esso ha quindi un orientamento specifico verso le operazioni di interrogazione e il Web. Rispetto ai precedenti modelli presenta una struttura topologica semplificata

indirizzata alla rappresentazione di oggetti geometrici regolari e ben definiti. Come il 3D FDS è un modello di superficie che non prevede la completa partizione dello spazio come la TEN. Analogalmente agli schemi precedenti gli elementi geometrici utilizzati per descrivere gli oggetti sono 4:

- punto
- linea
- superficie
- solido (*body*)

Le primitive geometriche invece sono solo due, nodo e faccia e sono definiti dalle seguenti proposizioni:

1. il nodo è definito come una collezione di un elemento geometrico identificato univocamente,
   a) due nodi non possono includere lo stesso elemento, cioè devono essere disgiunti;
2. dato uno spazio topologico la collezione dei nodi appartenenti ad esso è definita come un sotttoinsieme di tutti i punti dell'universo dei numeri reali R^3,
   a) l'intersezione di tutti i nodi è un insieme vuoto,
   b) due nodi sono connessi se tra di loro vi è una linea diritta che li unisce;
3. una faccia è definita da una collezione ordinata di x nodi laddove $3 \leq x \leq n$,
   a) Una faccia si definisce una collezione chiusa di nodi collegati,
   b) L'intersezione dei nodi appartenenti ad una faccia è un insieme vuoto,
   c) Ogni tripletta di nodi deve soddisfare l'equazione del piano $ax+by+cz+d = 0$, cioè la faccia deve essere piana,
   d) Esiste almeno una tripletta di nodi che non soddisfa l'equazione della linea $ax + by + cz = f$,
   e) Tutti i nodi sono orientati in senso antiorario,
   f) Ogni faccia è convessa e l'angolo formato dai vettori che uniscono i nodi è compreso tra 0 e 360°
   g) Si definisce l'interno di una faccia come l'area racchiusa dalla collezione di nodi; il contorno come l'insieme di tutti i nodi collegati e l'esterno come intersezione tra l'universo e l'interno;
4. una famiglia di facce è definita da una collezione di facce univocamente identificate tali che l'intersezione di due facce diverse produce sempre un insieme vuoto,
   a) Una faccia e un nodo si dicono disgiunti se l'intersezione dei nodi appartenenti alla faccia con il nodo stesso è un insieme vuoto,

b) Due facce si dicono disgiunte se per ogni coppia di nodi appartenti alle due facce l'intersezione tra gli stessi è vuota,

c) Se esiste una collezione di nodi appartenenti ad una collezione di facce, allora l'intersezione tra le facce è definita dall'insieme dei nodi,

d) Se l'intersezione tra tutti i nodi di una collezione e i nodi appartenenti alla faccia genera un insieme non vuoto allora vi sono nodi che fanno parte di una linea o cadono all'interno di una faccia;

La differenza fondamentale, rispetto agli altri modelli spaziali, è che in questo schema la relazione univoca tra spigolo e faccia è soppressa e la stessa faccia viene definita a partire dall'ordine di successione dei nodi. Sono ammesse le singolarità e l'oggetto faccia deve essere piano. Questo modello trova la sua applicazione principale nella rappresentazione del tema edificato nella cartografia urbana.

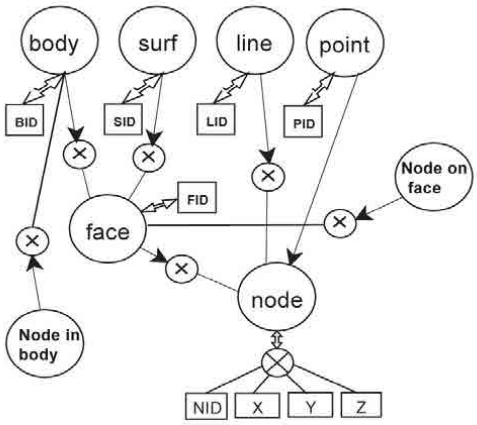


Figura 8.5.: *Simplified Spatial Model* (SSM) da Zlatanova, *3D GIS for Urban Development*, Tesi di Dottorato Graz University of Technology, 2000.

9. Le relazioni spaziali

9.1. Relazioni metriche

Questo tipo di relazioni rappresenta una delle principali famiglie di relazioni spaziali che sono utilizzate nei sistemi GIS per l'analisi spaziale e l'indicizzazione. Un GIS può essere considerato come un DBMS e come tale può essere utilizzato per compiere una serie di analisi sulle informazioni tematiche e spaziali degli oggetti. Come è stato sottolineato le analisi spaziali possono essere effettuate sulla componente metrica oppure quella topologica. Le analisi metriche sono effettuate sulle tabelle contenenti le coordinate degli oggetti geometrici e fanno uso degli strumenti della geometria analitica per calcolare queste relazioni, formalizzate tramite algoritmi. Due delle caratteristiche principali dello spazio euclideo come abbiamo visto sono la distanza e gli angoli che costituiscon quindi la base numerabile su cui vengono condotte tutte le analisi metriche. è un concetto che esprime una relazione spaziale formalizzabile matematicamente nello spazio euclideo. Lo studio delle modalità con cui è possibile esprimere in termini matematici le relazioni di distanza e angolo tra gli elementi geometrici e la formalizzazione di queste modalità consente di effettuare una scomposizione dello spazio basata su algoritmi che determinano le procedure di scomposizione e formule matematiche per rappresentare le geometria dello spazio. Vi sono diversi meccanismi di indicizzazione spaziale tra i quali quelli più importanti e utilizzati nella modellazione spaziale sono quelli basati sulle relazioni tra angoli e lati dei triangoli utilizzati nei procedimenti di scomposizione e quelli basati sul calcolo del minimo inviluppo convesso.

Relazioni angolari e basate sulla distanza

Tra i sistemi di scomposizione dello spazio in celle caratterizzate da determinate proprietà geometriche che ne determinano la forma, quali angoli e lunghezza dei lati la triangolazione di Delaunay e diagrammi di Voronoi rappresentano i sistemi più diffusi e efficaci per garantire una buona approssimazione della rappresentazione di superfici continue. La triangolazione di Delaunay permette di ottimizzare la creazione di una maglia regolare di triangoli a partire da un set di punti, anche'essi irregolarmente disposti nel piano, in modo tale che ogni cerchio circoscritto a ciascun triangolo non contenga altri vertici di triangoli. In questo modo vengono massimizzati gli angoli sottesi a ciascun vertice permettendo una suddivisione dello spazio con una maglia i cui triangoli siano caratterizzata da valori degli angoli interni abbastanza vicini tra loro. I diagrammi di Voronoi invece sono utilizzati per suddividere lo spazio che circonda un insieme di punti sulla base della loro distanza reciprova creando una maglia di poligoni regolari. Essi hanno una precisa relazione topologica con la triangolazione di Delaunay di cui rappresentano il grafo duale[1]. I vertici dei triangoli rappresentano i punti

[1] Un grafo duale un grafo planare G è un grafo G' nel quale ogni regione (i triangoli nella triangolazione di Delaunay) è rappresentata da un nodo mentre gli spigoli o archi sono rappresentati da spigoli.

generatori del diagramma di Voronoi a partire dai quali viene calcolata la distanza reciproca. I centri dei cerchi circoscritti invece rappresentano i vertiti dei poligoni nel diagramma. In altri termini la triangolazione di Delaunay di un determinato set di punti può essere vista come la proiezione nello spazio $\mathbb{R}^{n+1}$di un inviluppo convesso in $\mathbb{R}^n$, rappresentato appunto dal poligono del diagramma di Voronoi.

Questo sistema come è stato largamente applicato alla modellazione di superfici 2-dimensionali nello spazio $\mathbb{R}^2$ e $\mathbb{R}^3$. Nella sua forma più semplice come intepolazione di punti sul piano questo sistema è in realtà una generalizzazione sul piano bidimensionale di procedimenti che sono utilizzati anche per calcolare superfici che si svilupppano nello spazio euclideo R^3. Questo è possibile perchè la triangolazione di Delaunay di un set di punti nello spazio 2D è in realtà la base del paraboloide descritto dagli stessi valori di $< x, y >$. Suddividendo quindi lo spazio in piani che contengono i triangoli è possibile anche interpolare i punti nello spazio[2] $\mathbb{R}^3$.

MBR, MBV

Il MBR (*Minimim Bounding Rectangle*) e MBV (*Minimum Bounding Volume*) sono degli strumenti geometrici che facilitano l'indicizzazione delle relazioni e permettono di organizzare gli oggetti secondo delle strutture gerarchiche di contenitori. Questo meccanismo è stato applicato ai dati spaziali sulla base di quelli in uso nell'ambito informatico per indicizzare i dati di un database. L'indicizzazione viene fatta per mezzo di grafi ad albero nel quale a partire da un unico contenitore gli oggetti del database sono raggruppati secondo regole ben precise in contenitori sempre più piccoli fino ad arrivare ai singoli record. Questo meccanismo che è fondamentale nei database per ridurre i tempi di ricerca.

Essi rappresentano l'applicazione più semplice dei meccanismi di indicizzazione dei dati spaziali in un sistema di riferimento cartesiano $\mathbb{R}^3$. Viene definito il minimo inviluppo convesso che contiene un determinato numero di oggetti nello spazio, in altre parole il loro più piccolo contenitore che viene sempre utilizzato per primo nelle ricerche in sostituzione del gruppo di oggetti. Se la ricerca soddisfa questo primo requisito allora necessariamente deve soddisfare anche l'intersezione con gli oggetti contenuti. Questo per la definizione di inviluppo convesso che abbiamo dato precedentemente. Questo meccanismo inoltre è fondamentale nei database spaziale per definire un contenitore unico di tutti gli oggetti, che rappresenta il dominio di tutti gli attributi che rappresentano le coordinate spaziali. Esso permette di limitare entro limiti definiti le ricerche nel campo metrico e inoltre permette di formalizzare alcuni concetti astratti della topologia come per esempio la relazione di un oggetto con il suo spazio circostante e permette di restituire in termini metrici l'inviluppo convesso degli oggetti. Nella maggior parte dei sistemi CAD e GIS esso viene calcolato automatiamente ad ogni modifica o integrazione dei dati.

[2]Un esempio di questi sistemi per interpolare un set di punti nello spazio 3D può essere reperito presso questo sito dell'UNSW University of New South Wales (AUS) http://www.cse.unsw.edu.au/~lambert/java/3d/delaunay.html

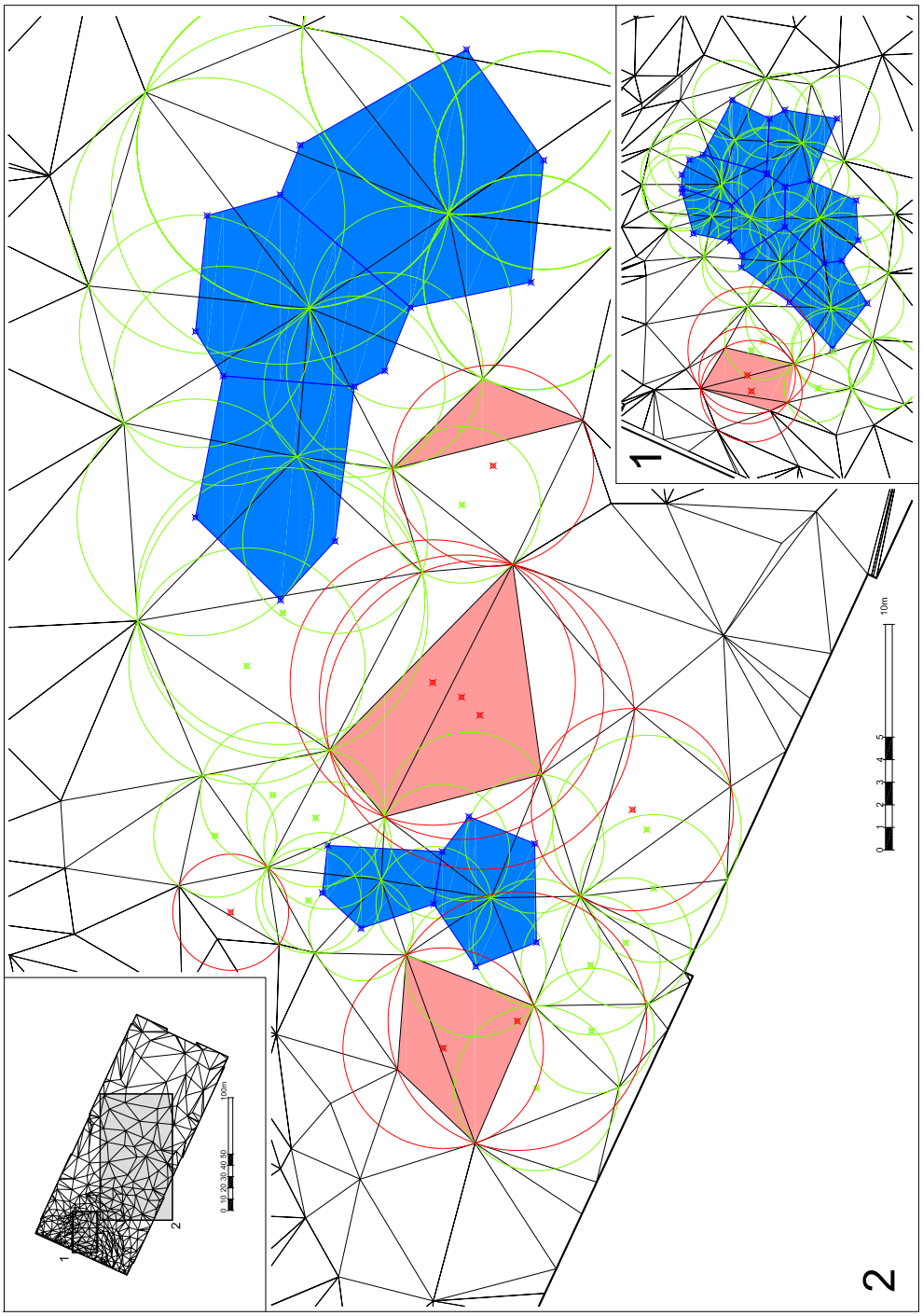


Figura 9.1.: rappresentazione dei diagrammi di Voronoi su una superficie triangolata. La superficie in oggetto si riferisce ad un modello TIN ottenuto per interpolazione di isocline. In verde i cerchi che soddisfano la triangolazione di Delaunay, in blu i corripondenti poligoni creati dal diagramma di Voronoi. In rosso sono invece rappresentati i triangoli che non soddisfano la triangolazione. L'esempio rappresenta il modello del cortile aulico del Castello del Valentino ed è stato realizzato sui dati estratti dal caso studio trattato nella Parte IV 10.2.

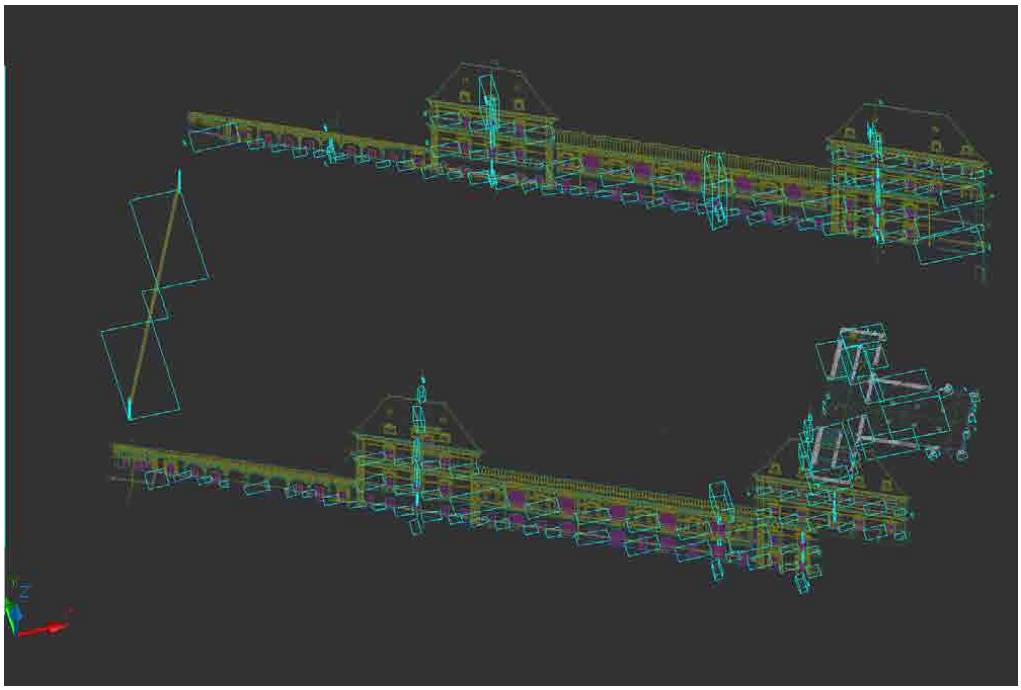


Figura 9.2.: indicizzazione per mezzo del MBR o MBV è uno dei meccanismi più diffusi in tutti i sistemi applicativi, GIS e CAD compresi, l'esempio mostra un applicazione in un sistema CAD. L'esempio mostra l'integrazione degli elaborati metrici del rilievo del caso studio trattato trattato nella Parte IV 10.2.

9.2. Relazioni topologiche

Le relazioni topologiche sono quelle che permettono di formalizzare le relazioni tra gli oggetti spaziali prescindendo dalla componente metrica, ovvero facendo uso di concetti più generali quali la connessione o la separazione tra due oggetti. I meccanismi che regolano queste relazioni costituiscono una base di regole su cui vengono impostati i modelli spaziali che hanno il compito di definire una struttura geometrica che soddisfi queste regole.

The 9-intersection model

Questo schema di intersezione spaziale definito da Egenhofer [26][27] è utilizzato per descrivere le possibili intersezioni nello spazio tra due oggetti piani. Le relazioni topologiche vengono definite a partire dai 3 elementi principali che contribuiscono a descrivere gli oggetti spaziali. Questi sono: l'interno di un poligono chiuso, il suo contorno e l'esterno. A partire da questi elementi vengono prima definite tutte le relazioni matematicamente esprimibili a livello potenziale, che sono poi ridotte a quelle realmente possibili.

Partendo da due sottoinsiemi A *e* B di uno spazio topologico X vengono definite le possibili relazioni esistenti tra i contorni e gli interni dei rispettivi sottoinsiemi che sono definite dai valori di una collezione di 4 oggetti o 4-tupla che corrispondono alle relazioni: interno-interno; interno-contorno; contorno-interno; contorno-contorno. Le relazioni binarie corispondenti alle relazioni spaziali vengono definite dai valori

vuoto ($\oslash$) *e non − vuoto* ($\neg\oslash$). La risultante matrice dei risultati presenta $2^4 = 16$ possibili valori per ognuna delle 4 relazioni indivuate. Queste 16 relazioni topologiche definiscono tutte le possibili interazioni tra i due sottoinsiemi in uno spazio euclideo R^2. Partendo da questo risultato viene dimostrato come solo 9 delle 16 relazioni possono esistere tra due regioni spaziali.

9.3. Indicizzazione

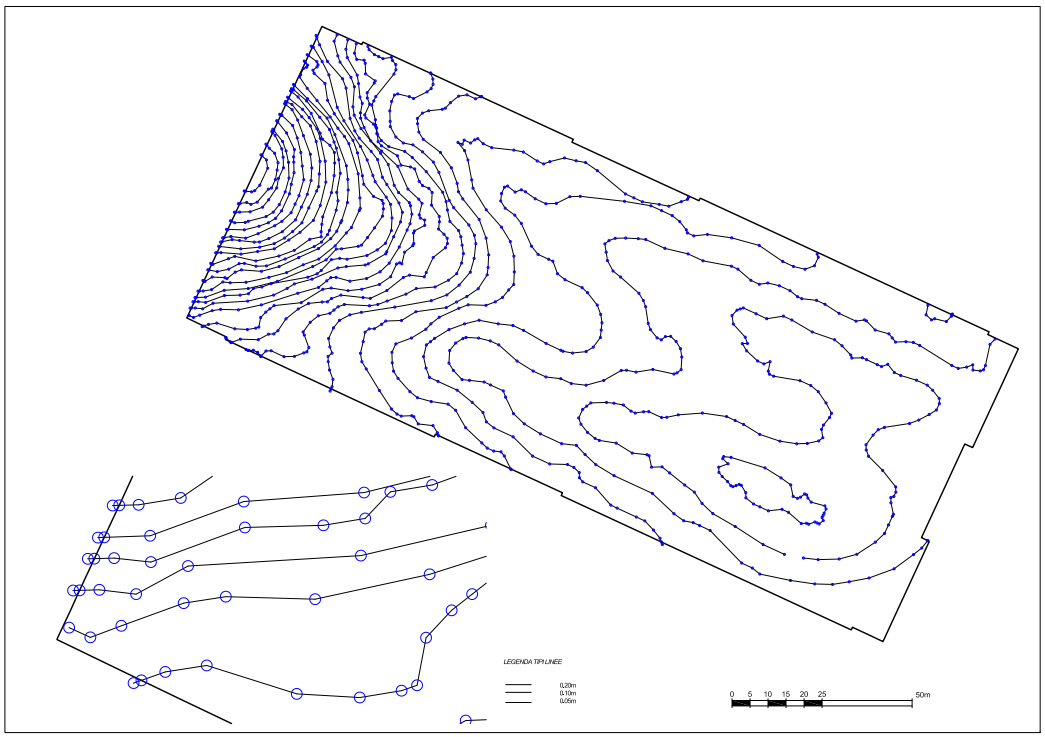
In una tabella topologica le caratteristiche di elementi geometrici n-dimensionali, dove $n > o$ le informazioni che permettono di definire la forma geometrica possono essere registrate per mezzo delle relazioni con gli altri elementi di dimensione inferiore o superiore per mezzo dei valori di una serie di attributi che qualificano queste relazioni. Uno spigolo sarà quindi definito tramite i valori degli attributi 'nodo_iniziale' e 'nodo_finale' corrispondenti al nodo sinistro e a quello destro procedendo senso orario e cioè sul verso positivo della faccia. I valori di questi due attributi corrisponderanno all'identificativo del nodo nella tabella contenente le coordinate. Questo schema di relazioni è simile al *winged-edge* o bordo alato che è un sistema molto semplice e diffuso per l'implementazione delle relazioni spaziali tra le entità geometriche nello spazio $\mathbb{R}^2$. Secondo questo meccanismo ogni spigolo che compone una faccia è direttamente collegato allo spigolo precedente secondo un verso orario positivo. Per ogni nodo sono registrate le informazioni relative agli archi che vi convergono e cioè il nodo precedente e quello successivo per ogni spigolo destro e sinistro. Tutte le relazioni topologiche sono definite al livello degli spigoli e delle facce.

Analisi topologiche ci permettono di restituire una relazione di adiacenza tra due oggetti unicamente attraverso un'operazione logico-booleana di verifica degli indici. Ad esempio la relazione di adiacenza tra due oggetti può essere computata come il luogo dove la distanza tra gli oggetti geometrici è pari a 0 oppure formalizzata per mezzo di una ricerca mirata attraverso un'apposito indice topologico, contenente la formalizzazione di queste relazioni cioè la condivisione di nodi, spigoli o facce. Queste informazioni possono essere memorizzate in modo diverso: un sistema è quello di creare una serie di tabelle separate contenti solo le informazioni topologiche, tabelle che andranno a costituire un apposito indice topologico oppure registrare le stesse informazioni associandole all'informazione geometrica con un sistema di collegamenti, come per esempio l'*XLink* di GML descritto nel Capitolo 10.2.

Le relazioni topologiche possono essere determinate in modo automatico tramite algoritmi che fanno uso di analisi spaziali sulla componente metrica. Diversi studi sono stati effettuati sul peso da dare alla componente metrica piuttosto che a quella topologica in un database in funzione della tipologia di dato e delle tipologie di analisi spaziali da effettuare [94]. Le analisi spaziali condotte nello spazio metrico sono spesso composte da una serie abbastanza complessa di funzioni che hanno inevitabilmenti degli alti costi computazionali soprattutto quando le analisi sono effettuate sullo spazio 3D e quindi senza eliminare la tabella[3] delle z. Questi costi inevitabilmente aumentano all'aumentare del livello di complessità della formulazione matematica oltre che all'aumentare della mole di dati. Studi effettuati su database urbani dimostrano che

[3]Nel Capitolo **7** verranno analizzate le differenze tra le rappresentazioni 2D, 2.5D e 3D nello spazio cartesiano $\mathbb{R}^3$

oltre un certo limite rappresentato dalla mole di dati, le ricerche topologiche sono più efficienti. Gli studi sull'implementazione delle relazioni topologiche nei database sono molto numerosi e sono anche molto indirizzati ad uno specifico utilizzo, generalmente nell'ambito di grossi enti cartografici che sono i soggetti che possono trarre più benefici da un'indicizzazione topologica dei dati [66].



_x	_y	_z	_node_number
396485,41	4989819,99	0,00	742
396485,41	4989819,99	278,37	
396485,52	4989821,02	0,00	777
396485,52	4989821,02	278,42	
396485,70	4989821,02	0,00	17
396485,70	4989821,02	278,42	
396485,70	4989821,02	278,39	
396485,93	4989821,90	0,00	808
396485,93	4989821,90	278,47	
396486,00	4989819,72	0,00	743
396486,00	4989819,72	278,37	
396486,11	4989821,90	0,00	18
396486,11	4989821,90	278,47	
396486,11	4989821,90	278,45	
396486,21	4989822,49	0,00	840
396486,21	4989822,49	278,52	
396486,25	4989821,04	0,00	778
396486,25	4989821,04	278,42	
396486,38	4989822,50	0,00	19
396486,38	4989822,50	278,52	
396486,38	4989822,50	278,49	
396486,62	4989823,38	0,00	871
396486,62	4989823,38	278,57	
396486,66	4989821,92	0,00	809
396486,66	4989821,92	278,47	
396486,80	4989823,39	0,00	20
396486,80	4989823,39	278,57	
396486,80	4989823,39	278,55	
396486,86	4989820,04	0,00	744
396486,86	4989820,04	278,37	
396487,20	4989818,45	0,00	689
396487,20	4989818,45	278,32	
396487,27	4989820,92	0,00	779
396487,27	4989820,92	278,42	

_x	_y	_z	_arc_id	_from_node	_to_node
396485,41	4989819,99	278,37	750	742	743
396485,52	4989821,02	278,42	784	777	17
396485,70	4989821,02	278,42	785	17	778
396485,93	4989821,90	278,47	816	808	18
396486,00	4989819,72	278,37	751	743	744
396486,11	4989821,90	278,47	817	18	809
396486,21	4989822,49	278,52	849	840	19
396486,25	4989821,04	278,42	786	778	779
396486,38	4989822,50	278,52	850	19	841
396486,62	4989823,38	278,57	881	871	20
396486,66	4989821,92	278,47	818	809	810
396486,80	4989823,39	278,57	882	20	872
396486,86	4989820,04	278,37	752	744	745
396487,20	4989818,45	278,32	697	689	16
396487,27	4989820,92	278,42	787	779	780

Figura 9.3.: esempio di indicizzazione delle relazione topologiche calcolate per mezzo di analisi spaziali, le relazioni sono calcolate nello spazio $\mathbb{R}^3$ e restituite in quello $\mathbb{R}^2$. L'esempio è stato condotto sugli elaborati metrici del rilievo del caso studio trattato trattato nella Parte IV 10.2.

10. Standard e linguaggi di modellazione

10.1. Gli standard per l'interscambio di formati grafici

ISO 10303 STEP

Gli standard della serie ISO 10303 - STEP (*STandard for the Exchange of Product model data*) [78], sviluppati dalla commissione tecnica ISO TC 184/SC4, definiscono le specifiche per la rappresentazione e lo scambio di informazioni sui prodotti industriali tramite i mezzi elettronici, tra i quali il linguaggio di modellazione dei dati EXPRESS. La serie ISO 10303-42:1994 definisce gli standard per la rappresentazione geometrica e topologica nei sistemi CAD-CAE-CAM. Quest'ultimo standard, particolarmente utilizzato nell'ambito dei sistemi CAD, segue l'approccio alla modellazione delle superfici B-Rep già standard ISO 10303-514 *Advanced boundary representation.*

X3D

Nato come VRML Consortium il Web3D si è occupato dello sviluppo dello standard VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) per la memorizzazione e lo scambio tramite web delle informazioni grafiche 3D. In seguito alla nascita e diffusione del linguaggio marcatore XML l'obiettivo del gruppo è diventato quello della sostituzione dello standard VRML con il X3D (*Extensible 3D*) [101] basata appunto sulla codifica XML. Quest'ultimo, oltre a estendere il il campo delle rappresentazioni anche alle superfici NURBS (*Non Unifrom Rational B-Splines*) unisce nel suo formato le caratteristiche di georeferenziazione del GeoVRML sviluppato dall'omonimo *Working Group* dell Web3D Consortium. Esso è un formato utilizzato nella grafica 3D specializzata nella realizzazione di ambienti interattivi.

COLLADA

Il formato COLLADA (*COllaborative Design Activity*) elaborato per lo scambio di modelli vettoriali 3D e basato sul metalinguaggio XML, è nato per iniziativa del Khronos Group (*Open Standards for Media Authoring and Acceleration*). Questo consorzio no-profit è stato fondato nel 2000 da una serie di compagnie informatiche di produzione hardware e software, tra i quali troviamo Intel, NVIDIA e ATI Technologies note produttrici di schede grafiche, Discreet, produttrice di 3dStudioMax poi confluita nell'Autodesk e Sun Microsystems successivamente inglobata dalla ORACLE. Questa organizzazione recentemente si è incaricata della gestione e implementazione dello standard OpenGL in uso dalle librerie grafiche utilizzate da numerose applicazioni. Il

contributo dei numerosi e importanti soggetti privati (*stakeholders*) ha contribuito a rendere questo formato un valido strumento per raggiungere un'interoperabilità tra i vari sistemi software e hardware.

IFC

Lo standard IFC (*Industry Foundation Classes* – ISO/PAS 16739) [37] è un metamodello per l'interscambio dei dati nel settore edile sviluppato dall'IAI (*International Alliance for Interoperability*), organizzazione internazionale per lo sviluppo dell'interoperabilità nel settore industriale. La strutturazione del metamodello è ad oggetti (*object-oriented*) e la codifica è basata sul linguaggio marcatore EXPRESS. Esso definisce le regole e le procedure per la creazione, l'interscambio e la gestione delle informazione relative al progetto edile in tutte le sue fasi: dalla progettazione alla gestione del costruito. I principali obiettivi di questo standard sono l'interoperabilità dei dati attraverso i vari livelli di definizione del progetto e la caratterizzazione semantica del dato grafico. Questi sono alcuni degli aspetti dell'approccio alla progettazione denominato *Building Information Model* (BIM) nel cui ambito l'IFC rappresenta uno dei primi standard che integra tutti gli aspetti: da quelli metodologici relativi all'organizzazione dei dati che a quelli procedurali relativi ai formati di interscambio.

10.2. Gli standard per l'informazione geografica

ISO TC/211 GEOGRAPHIC INFORMATION / GEOMATICS

La commissione TC211 è il comitato organizzativo ufficiale dell'ISO (*International Standard Organization*) che si occupa di produrre gli standard nell'ambito dell'informazione geografica. Per sua iniziativa, in collaborazione con l'OGC sono stati predisposti tutti i documenti normativi della serie ISO 191XX [45].

- *Infrastructure Standards*: ISO 19101:2002 - *Reference Model*; ISO/TS 19103:2005 - *Conceptual schema language*; ISO/TS19104:2008 - *Terminology*; ISO 19105:2000 - *Conformance And Testing*; ISO 19106:2004 - *Profiles;*

- *Data Model Standards*: ISO 19109:2005 - *Rules For Application Schema*; ISO 19107:2003 - *Spatial Schema*; ISO 19123:2005 - *Schema For Coverage Geometry And Functions*; ISO 19108:2002 - *Temporal Schema*; ISO 19141 - *Schema for moving features*; ISO 19137:2007 - *Core Profile Of The Spatial Schema*;

- *Geographic Information Management Standards*: ISO 19110:2005 - *Methodology for Feature Cataloguing*; ISO 19111 - *Spatial Referencing by Coordinates*; ISO 19112 - *Spatial Referencing by Geographic Identifiers*; ISO 19113:2002 - *Quality principles*; ISO 19114:2003 *Quality evaluation procedures*; ISO 19115:2003 - *Metadata*; ISO 19131:2007 *Data product specifications*; ISO 19135:2005 *Procedures for item registration*; ISO/TS 19127:2005 *Geodetic codes and Parameters*; ISO/TS 19138:2006 *Data quality measures*;

- *Geographic Information Services Standards*: ISO 19119:2005 - *Services*; ISO 19116:2004 - *Positioning Services*; ISO 19117:2005 - *Portrayal*; ISO 19125-1:2004 - *Simple*

Feature Access - Part 1: Common Architecture; ISO 19125-2:2004 - *Simple Feature Access - Part 2: SQL Option;* ISO 19128:2005 *Web map server interface*; ISO 19132:2007 *Location based services - Reference model*; ISO 19133:2005 *Location based services - Tracking and navigation*; ISO 19134:2007 *Location based services - Multimodal routing and navigation*;

- *Geographic Encoding Standards*: ISO 19118:2005 - *Encoding*; ISO 6709:2008 *Standard Representation of Geographic Location by Coordinates*; ISO 19136:2007 - *Geography Markup Language (GML)*; ISO/TS 19139:2007 - *Metadata - XML Schema Implementation;*

- *Specific Thematic Areas Standards*: ISO/TS 19101-2:2008 *Reference Model - Part 2: Imagery*; ISO/TS 19115-2:2008 - *Metadata - Part 2: Extensions for Imagery and Gridded Data.*

ISO 10101 REFERENCE MODEL

Questo documento definisce la semantica di base e la struttura delle informazioni geografiche. Esso descrive inoltre i componenti dei servizi informativi geografici e il loro comportamento. La struttura del *Reference Model* è organizzata in due moduli: il *Domain Reference Model* e l'*Architecture Reference Model.* Il primo definisce struttura e contenuti dell'informazione geografica con un linguaggio di alto livello, mentre il secondo descrive l'architettura di sistema dei componenti software utilizzati per gestire queste informazioni.

In questo documento vi è la definizione del vocabolario basilare del modello:

- *Features*: rappresentano l'astrazione dei fenomeni reali *(«abstraction of real world phenomena»)*. Questa categoria comprende gli attributi delle *features e* le loro relazioni.

- *Spatial objects*: descrivono le caratteristiche spaziali delle *features.*

- *Position of spatial objects*: componente metrica dell'informazione spaziale.

ISO 19107:2003 SPATIAL SCHEMA

> *«Vector data consists of geometric and topological primitives used, separately or in combination, to construct objects that express the spatial characteristics of geographic features. This International Standard deals only with vector data.»*[1]

Il modello spaziale dell'ISO è strutturato in modo da descrivere indipendentemente la componente topologica e quella metrica dell'informazione geometrica. Come abbiamo analizzato nei capitoli precedenti la formalizzazione dell'informazione spaziale può essere riferita alle proprietà metriche come la posizione e la dimensione oppure a quelle topologiche che che descrivono determinate proprietà geometriche in termini logici. Una qualsiasi alterazione delle proprietà metriche, come per esempio la traslazione o la deformazione prospettica, modifica le relazioni instaurate con gli altri oggetti e tra le

[1] ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards Guide,* p.30.

sue parti. Al contrario le proprietà topologiche fanno riferimento ad un concetto di legame geometrico più generale descrivendo le proprietà geometriche che sono invarianti applicando trasformazioni metriche come appunto la traslazione, rotazione o scala.

Modello geometrico Il diagramma delle classi geometriche, secondo la notazione UML descritta nel Capitolo 4.1, descrive le classi geometriche impiegater con la sola intestazione del nome nella cui prima riga è presente lo *stereotype* racchiuso tra i caratteri <<...>> (p.e. <<*Type*>>) mentre nella seconda riga troviamo il nome della classe costituito dal prefisso *GM* più il nome dell'oggetto geometrico rappresentato.

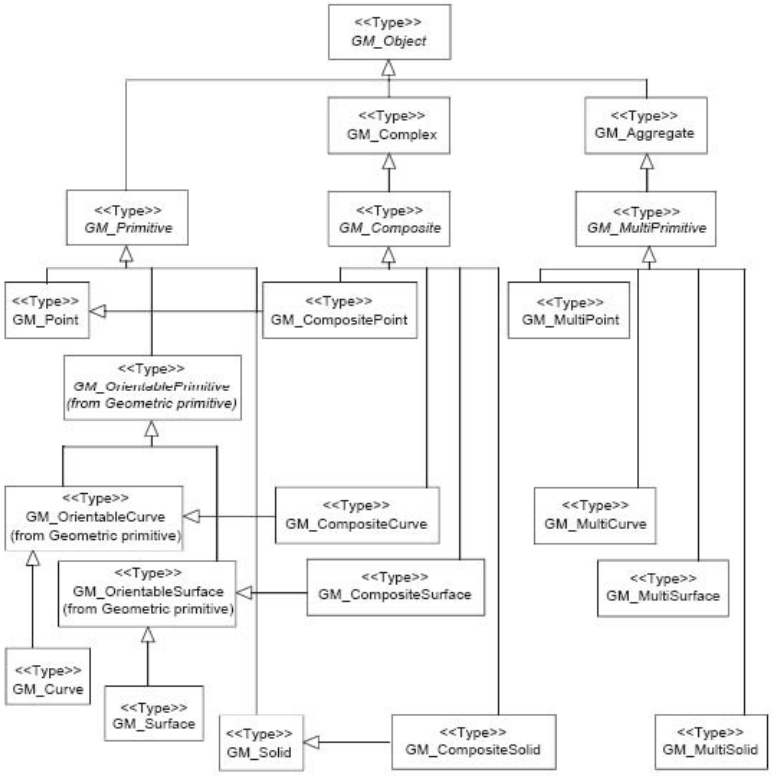


Figura 10.1.: diagramma della struttura geometrica. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards*, p. 31.

Primitive geometriche Le primitive geometriche (*GM_Primitive*) identificano la rappresentazione geometrica più semplice per ciascuna dimensione nello spazio e corrispondono ai simplessi. Esempi di primitive sono: *GM_Point*, *GM_Curve*, *GM_Surface* e *GM_Solid*. Le classi di primitive geometriche che sono state modellate nello *Spatial Schema* sono numerose e permettono la rappresentazioni di diverse tipologie di forme geometriche. Qui ne forniremo un estratto comprendente alcune delle primitive più semplici, utilizzate anche nel modello spaziale GML (*Geographic Markup Language*).

Composti Le composizioni (*GM_Composite*) identificano oggetti costitutiti da più primitive della stessa dimensione e corrispondono ai complessi simpliciali. Essi de-

vono essere strutturati topologicamente, cioè le primitive geometriche che li compongono devono essere connesse e separate. Essi sono identificati con l'identificativo *Composite* seguito dal nome della primitiva corrispondente alla dimensione (p.e. *GM_ CompositeSolid*).

Aggregati Gli aggregati (*GM_ Aggregate*) identificano come i *GM_ Composite* oggetti costituiti da più primitive della stessa dimensione, ma la relazione tra le parti è meno restrittiva: sono infatti ammesse sovrapposizioni tra le primitive che costituiscono l'aggregato oppure la non adiacenza tra le stesse. Il nome è costituito dall'identificativo *Multi* più il nome della primitiva della dimensione corrispondente (la superficie per *GM_ MultiSurface*). Le definizioni di aggregati e composti dal punto di vista geometrico hanno una loro corrispondenza nella definizione formale dei costrutti del linguaggioUML.

Complessi I complessi geometrici (*GM_ Complexe*) identificano invece oggetti costituiti da primitive di dimensioni diverse strutturate però topologicamente in modo da evitare sovrapposizioni o disgiunzioni (non adiacenza). Essi sono identificati dall'unica classe *GM_ Complex*.

OGC (*Open Geospatial Consortium*)

È un consorzio internazionale formato da rappresentanti di compagnie private, agenzie governative e università avente come obiettivo la definizione di standard per l'informazione geografica. Tra gli obiettivi e gli ambiti applicativi dell'organizzazione vi è la produzione di standard geografici aperti, l'integrazione dei contenuti e dei servizi geospaziali con i processi pubblici e privati, il Web spaziale e l'informatica d'impresa.

> *«The Mission of the OGC is to lead the global development, promotion and harmonization of open standards and architectures that enable the integration of geospatial data and services into user applications and advance the formation of related market opportunities.»*[2]

Il lavoro del OGC si svolge in stretto contatto con l'ISO per lo sviluppo di specifiche comuni per quanto concerne l'informazione geografica. A partire dal 1998 è stato siglato un accordo tra le due organizzazioni che ha portato a numerosi vantaggi reciproci quali l'adozione degli standard ISO/TC211 da parte del OGC e la proposta e adozione delle specifiche OGC da parte dell'ISO (il GML ne è un esempio). Le specifiche definite dal consorzio comprendono un vasto insieme di standard che abbracciano molti aspetti dell'informazione geografica: i formati di memorizzazione, i servizi di localizzazione mobile o LBS (*Location-Based Service*), i servizi *Web-mapping*, i linguaggi di interrogazione, il controllo sull'accesso ai dati (lo standard GeoXACML definito a partire dallo standard XACML dell'OASIS[3]) e il trattamento delle osservazioni solo per citarne alcuni.

[2] OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 0: Abstract Specification Overview,* Capitolo 1.1.2, p. 1

[3] L'OASIS è un'organizzazione internazionale no-profit che promuove lo sviluppo e l'adozione di standard aperti nell'ambito dello scambio delle informazioni. Le specificazioni introdotte riguardano principalmente le politiche di sicurezza in relazione allo scambio dei dati tramite la rete come lo standard XACML (eXtensible Access Control Markup Language), esteso ai dati spaziali con lo standard (GeoXACML) dall'OGC.

Nel campo della modellazione dei dati geografici i più importanti formati normati dall'OGC sono il KML, il GML e il CityGML. I rispettivi modelli concettuali, come quelli ISO/TC211 sono formalizzati in UML e tradotti in forma logica per mezzo del linguaggio XML. Oltre ad essere dei modelli concettuali e logici dei dati il GML e il CityGML sono anche dei metamodelli fisici in quanto formati di memorizzazione descrivono anche gli aspetti implementativi dei dati. Essi perciò possono essere utilizzati come modello sia per organizzare i dati spaziali all'interno del database (progettazione concettuale e logica) sia come formato di importazione ed esportazione dei dati. Questa caratteristica di completezza dal punto di vista della gestione dei dati rappresenta sicuramente un passo importante verso l'integrazione degli standard metodologici e procedurali con gli aspetti tecnici dell'interscambio dei dati tra i diversi settori coinvolti nella produzione e gestione dei dati spaziali.

L'attività normativa dell'OGC è basata su una serie di documenti programmatici di cui i principali sono il *Reference Model* e le *Abstract Specifications:*

- *OGC Reference Model* [60]: questo documento rappresenta il modello di riferimento, ovvero il documento programmatico che contiene la dichiarazione d'intenti con gli obiettivi generali e un'anteprima dei risultati raggiunti.

- *OGC Abstract Specification* [56]: costituiscono la base di riferimento per tutte le specifiche introdotte e rappresentano il metamodello sul quale sono fondate.

THE OPENGIS ABSTRACT SPECIFICATION

- *Topic 1: Feature Geometry.*

- *Topic 2: Spatial referencing by coordinates.*

- *Topic 3: Locational Geometry Structures.*

- *Topic 4: Stored Functions and Interpolation.*

- *Topic 5: Features.*

- *Topic 6: Schema for coverage geometry and functions.*

- *Topic 7: Earth Imagery.*

- *Topic 8: Relationships Between Features.*

- *Topic 10: Feature Collections.*

- *Topic 11: Metadata.*

Basic Types Descrive il dominio degli attributi delle classi che compongono lo standard. Sono supportate le principali tipologie di dato dello schema *xsi:XMLSchemaLocation* cui si aggiungono quelle specifiche per la modellazione dei dati spaziali come tutte le diverse unità di misura di distanze, angoli, velocità [56].

Features In questo documento viene descritto il meccanismo di astrazione che porta alla modellazione dei fenomeni spaziali secondo l'approccio discreto, ovvero la descrizione dei fenomeni spaziali per mezzo di rappresentazioni geometriche come punti, linee e superfici che in questo contesto viene definito *"Features with Geometry"* [62].

> *«There are three popular approaches for the modeling of geospatial features.*
>
> *The first models the spatial extent of a feature with point, lines, polygons, and other geometric primitives that come from a list of well-known types. Features modeled in this fashion are called "Features with Geometry."*
>
> *The second approach is called a "Feature as Coverage". This technology includes images as a special case.*
>
> *The third approach is "Feature as Observation". An Observation is an action with a result which has a value describing some phenomenon. The observation is modelled as a Feature within the context of the General Feature Model [ISO 19101, ISO 19109]. An observation feature binds a result to a feature of interest, upon which the observation was made. The observed property is a property of the feature of interest.»*[4]

Coverage La definizione dell'OGC di *coverage*, che sostanzialmente coincide con quella ISO 19123, rimanda alla distinzione tra l'approcco continuo e discreto alla modellazione dei dati e alle loro rappresentazioni vettoriali e raster. Come abbiamo visto esistono fondalmentalmente due principali approcci alla modellazione dei dati spaziali: l'approccio continuo secondo il quale i dati sono rappresentati come una funzione biiettiva della relativa posizione spaziale e l'approccio discreto nel quale invece i dati sono rappresentati tramite un'astrazione geometrica ovvero un formalismo [57].

> *«"Vector data" deals with discrete phenomena, each of which is conceived of as a feature. The spatial characteristics of a discrete real-world phenomenon are represented by a set of one or more geometric primitives (points, curves, surfaces or solids). Other characteristics of the phenomenon are recorded as feature attributes. Usually, a single feature is associated with a single set of attribute values. ISO 19107:2003 provides a schema for describing features in terms of geometric and topological primitives.*
>
> *"Raster data", on the other hand, deals with real-world phenomena that vary continuously over space. It contains a set of values, each associated with one of the elements in a regular array of points or cells. It is usually associated with a method for interpolating values at spatial positions between the points or within the cells. Since this data structure is not the only one that can be used to represent phenomena that vary continuously over space, this International Standard uses the term "coverage", adopted from the Abstract Specification of the Open GIS Consortium, to refer to any data representation that assigns values directly to spatial position. A coverage is a function from a spatial, temporal or spatiotemporal domain to an attribute*

[4] OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 5. Features*, Capitolo. 2.7 p. 10.

range. A coverage associates a position within its domain to a record of values of defined data types.».[5]

KML

Il KML (*Keyhole Markup Language*) [59] è un linguaggio sviluppato inizialmente dalla Keyhole Inc., successivamente acquisita da Google Inc. che ha proposto la codifica dello standard all'OGC. Questo linguaggio è nato inizialmente come strumento per gestire le annotazioni associate alle informazioni spaziali nei sistemi di riferimento geografici e cartografici ed è stato elaborato per lo sviluppo del software Google Earth (inizialmente Keyhole Earth Viewer). La codifica da parte dell'OGC di questo standard ha contribuito ad armonizzare questo standard nell'insieme delle altre specifiche OGC, in particolare il GML. Il modello dei dati KML prevede un unico livello nel quale sono codificate tutte le informazioni tematiche. Sono previste due classi tematiche per la modellazione dei fenomeni temporali mentre la gestione della componente geometrica è limitata alle rappresentazioni bidimensionali discrete (vettoriali) e i modelli 3D vengono supportati solo per la loro visualizzazione. Il supporto alla visualizzazione di modelli tridimensionali all'interno di rappresentazioni bidimensionali nei sistemi di riferimento geografici e cartografici è realizzato mediante un sistema di riferimento locale definito tramite la georeferenziazione di un punto, sistema utilizzato anche nei sistemi CAD per la realizzazione di scene complesse.

GEOGRAPHIC MARKUP LANGUAGE (GML)

Il linguaggio GML (*Geographic Markup Language*) [58], codificato dall'OGC, è uno dei più completi e versatili nell'ambito della modellazione dei dati geografici. Sviluppato a partire dal 2005, è giunto nel 2012 alla versione 3.3. Esso rappresenta uno degli standard più importanti a livello internazionale che si sta imponendo in diversi ambiti di applicazione. Il modello dei dati è basato sulla formalizzazione concettuale degli standard ISO/TC211 *Geographic Information* implementata logicamente attraverso gli strumenti del linguaggio XML. Tra gli standard della serie ISO 191XX che sono stati implementati in GML vi sono l'ISO 19107 (*Spatial Schema*), l'ISO 19123 *(Schema for Coverage Geometry and Functions*) e l'ISO 19108 (*Temporal Schema*). Sviluppato inizialmente dall OGC, GML è diventato norma ISO 10136. La sua elaborazionne è stata portata avanti dalla commissione ISO/TC211 in sinergia con l'OGC.

[5] OGC - Open Geospatial Consortium, *The OpenGIS Abstract Specification Topic 6: Schema for coverage geometry and functions*, Capitolo 4.1.7, p.10.

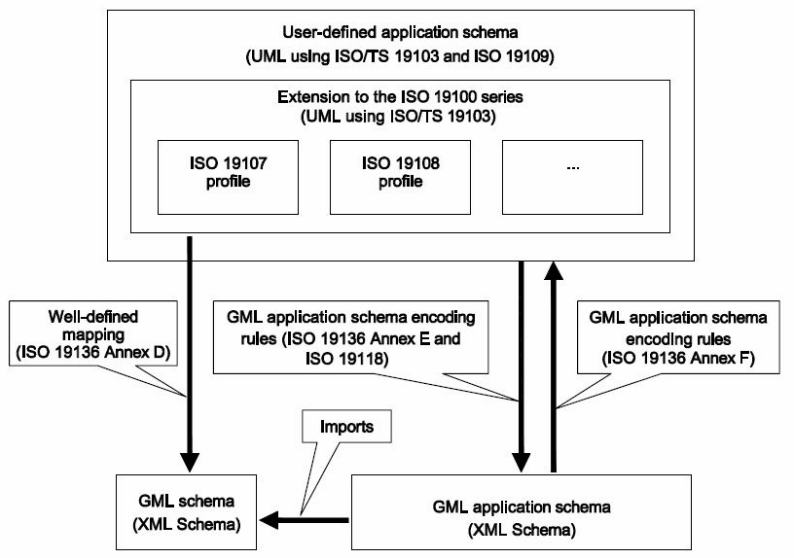


Figura 10.2.: relazione tra gli standard ISO e GML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1*, Capitolo. 6.3 p. 18.

Spatial Model Il modello spaziale è basato sulle classi dello *Spatial Schema* ISO 19107 e ne rappresenta un sottoinsieme. Esso comprende quindi un'ampia gamma di modelli per la rappresentazione del contenuto geometrico e topologico. Come lo *Spatial Model* ISO 19107 anche quello GML presenta due modelli indipendenti per la descrizione del contenuto geometrico e topologico. Per quanto concerne la componente geometrica il modello spaziale GML comprende classi di primitive geometriche che permettono diverse forme di rappresentazione incluse quelle più complesse come per esempio la *patch*. Sono infatti codificate diverse tipologie di curve tra cui le *spline*, le curve geodetiche, i clotoidi o spirali euleriane oltre a quelle più semplici come archi e cerchi. Oltre ai modelli a facce come le superfici triangolate e le *grid* sono state implementate anche le superfici parametriche e quelle *patch* la cui formalizzazione segue lo schema descritto per quanto concerne le *Boundary Representation* o B-Rep. Le classi ISO *GM_Boundaries* non sono rappresentate esplicitamente, ma sono restituite tramite l'istanziazione dell'attributo *boundary* della classe *Polygon*. Gli schemi sono allegati nelle Appendici 7.

Esempi

LinearRingType, LinearRing

> «*A gml:LinearRing is defined by four or more coordinate tuples, with linear interpolation between them; the first and last coordinates shall be coincident.*»[6]

```
<complexType name="LinearRingType">
  <complexContent>

    <extension base="gml:AbstractRingType">
```

[6] *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1*, Ch. 10.5.8 p. 78.

```
            <sequence>
                <choice>
                    <choice minOccurs="4" maxOccurs="unbounded">
                        <element ref="gml:pos" />
                        <element ref="gml:pointProperty" />
                        <element ref="gml:pointRep"/>
                    </choice>
                        <element ref="gml:posList" />
                        <element ref="gml:coordinates" />
                </choice>
            </sequence>
        </extension>
    </complexContent>
    </complexType>
    <element name="LinearRing" type="gml:LinearRingType" substitutionGroup="gml:AbstractRing"
/>
```

PolygonType, Polygon

«A gml:Polygon is a special surface that is defined by a single surface patch [...]. The boundary of this patch is coplanar and the polygon uses planar interpolation in its interior.»

```
    <complexType name="PolygonType">
        <complexContent>
            <extension base="gml:AbstractSurfaceType">
                <sequence>
                    <element ref="gml:exterior" minOccurs="0" />
                    <element ref="gml:interior" minOccurs="0" ma-
                xOccurs="unbounded" />
                </sequence>
            </extension>
        </complexContent>
</complexType>
    <element name="Polygon" type="gml:PolygonType" substitutionGroup="gml:AbstractSurface"
/>
```

CITY GEOGRAPHIC MARKUP LANGUAGE (CityGML)

Lo standard CityGML [61] è un modello e un linguaggio per la definizione degli strati informativi della cartografia urbana. Esso, come il GML, è allo stesso tempo una specifica di contenuto, un modello dei dati e un formato di memorizzazione, condividendo con il GML l'utilizzo del metalinguaggio XML come base per la definizione del codice. Questa caratteristica di riuscire a definire uno standard specifico per esigenze di rappresentazione di una determinata tipologia di oggetti è stata possibile grazie alla struttura a classi del modello dei dati GML. Infatti le caratteristiche di ereditarietà, polimorfismo ed estensibilità del modello di dati ad oggetti ne permettono l'estensione tramite la creazione di nuove classi che, ereditando gli attributi delle classi genitore assumono, nuovi attributi e nuovi metodi (le procedure per accedere ai dati come per

esempio le interrogazioni). Anche il CityGML come tutti i linguaggi quindi che si basano su questo paradigma possono essere estesi per implementazioni di specifici dataset che richiedano l'introduzione di nuove classi di oggetti. La struttura dei dati viene memorizzata fisicamente tramite un file e/o directory (necessaria per i collegamenti esterni quali textures) con estensione .gml e non tramite le cartelle come avviene in genere nei DBMS.

La versione corrente delle specifiche, che è stata utilizzata come modello per l'implementazione del caso studio, è la versione 1.0 del 2008. Lo standard CityGML è stato sviluppato a partire dal 2002 da parte del gruppo di ricerca SIG3D (*Special Interest Group 3D*) facente parte dell'iniziativa *Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia* (GDI NRW). Del SIG3D fanno parte istituzioni pubbliche, enti di ricerca e compagnie provenienti da Germania, Gran Bretagna, Svizzera e Austria che lavorano sullo sviluppo e le applicazioni dell'interoperabilità dei modelli 3D e la gestione dei dati geografici. Il primo progetto pilota che ha valutato l'applicabilità dello standard è stato presentato nel 2005 da parte della GDI NRW e uno dei risultati di questo progetto pilota è stato l'implementazione del modello 3D della città di Berlino. A partire dal 2006 è entrato a far parte di un'iniziativa di livello europeo (EuroSDR) per l'integrazione dei modelli urbani. L'EuroSDR è un organizzazione di ricerca di cui fanno parte istituzioni di produzione e ricerca delle informazioni geografiche provenienti da quasi tutti i paesi europei. Collabora con istituzioni come l'ISO, l'OGC e il CERN e partecipa al progetto INSPIRE.

La struttura delle specifiche CityGML è organizzata in modo simile a quelle GML: alla descrizione in linguaggio naturale vengono accompagnati i diagrammi UML relativi e gli esempi di codice XML. Partendo da una prima comprensione generale affidata alla descrizione testuale delle specifiche, si passa allo schema concettuale UML necessario per impostare il modello dei dati e infine si giunge agli aspetti implementativi per mezzo del codice XML. Per ogni modulo tematico, corrispondente agli strati informativi della tradizionale cartografia numerica, viene descritto il relativo modello dei dati attraverso i diversi livelli di formalizzazione del linguaggio: da quello di più alto livello, naturale, fino a quello di basso livello utilizzato per implementare fisicamente i dati. Per una migliore intellegibilità sono stati riportati gli schemi UML così come riportati nelle specifiche anzichè ricostruirli dagli schemi tramite la procedura di *unmarshalling* descritta nel Capitolo 4.2.

Lo schema CityGML presenta una struttura modulare composta un modello spaziale (geometrico-topologico) e diversi modelli tematici indipendenti che corrispondono agli strati informativi della cartografia tradizionale. La struttura della componente tematica è organizzata su due livelli diversi: un unico *core module* da cui derivano diversi *extension modules*. Ciascuno di essi descrive un insieme omogeneo di classi tematiche, cui corrispondono una determinata serie di primitive geometriche che sono esplicitate all'interno dello stesso modulo. Le estensioni hanno tutte una relazione di dipendenza con il *core module*, mentre sono tra di loro indipendenti. Questa caratteristica permette più libertà nella modellazione rispetto ad una strutturazione gerarchica delle varie componenti. Un altro aspetto significativo della struttura modulare del CityGML è la presenza di un modulo tematico *Appearance* indipendente, separato da quello geometrico e utilizzato per descrivere l'aspetto degli oggetti geometrici.

Secondo le notazioni che abbiamo visto a proposito del linguaggio XML e di quello UML nei diagrammi dei vari moduli del modello CityGML la notazione dell'intesta-

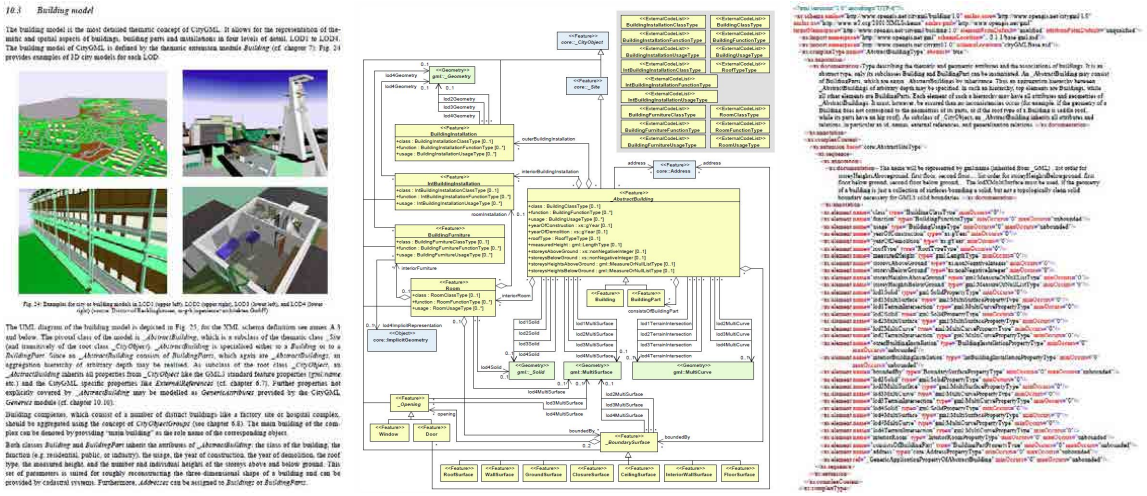


Figura 10.3.: rappresentazione dei tre diversi livelli di formalizzazione del modello, da sinistra a destra: linguaggio naturale, diagramma UML e codice XML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0).*

zione della classe, quella contenente il nome avrà l'aspetto seguente: nella prima riga lo *stereoptype* della classe (p.e. <<Feature>>), nella seconda riga il prefisso del *namespace* o Schema XML associato alla classe seguito dai doppi due punti e il nome del *namespace* (*gml::_Feature*). I nomi delle classi senza il prefisso del *namespace* sono definiti all'interno del *core module,* mentre le altre features come *gml::_Feature, gml::_FeatureCollection, gml::_Multipoint* sono definite esternamente da un proprio modello di dati, in questo caso trattasi delle classi geometriche GML (derivate da quelle ISO 19107).

LODs (*Level Of Details*) La gestione della rappresentazione degli oggetti geometrici alle diverse scale viene effettuata tramite l'introduzione di 5 livelli di dettaglio differenti. Essi sono determinati a partire dalla definizione della scala di rappresentazione: dalle scale cartografiche regionali e urbane (1:10000-1:1000) fino alle scale proprie della progettazione architettonica (1:500-1:100). Viene stabilita inoltre la classe di accuratezza basata sulla posizione assoluta dei punti[7]. Un altro parametro importante introdotto per determinare il LOD è quello della generalizzazione tramite il quale vengono specificati i parametri che regolano le modalità di rappresentazione delle *feature*. Vengono inoltre forniti dei parametri basati sulle classi tematiche che appaiono ad ogni livello di dettagli e le modalità con cui le varie classi vengono rappresentate. La definizione dei LODs così come specificato prevede la possibilità di associare a ciascuna istanza di una classe diversi contenuti geometrici a seconda del diverso livello di generalizzazione richiesta.

[7]L'accuratezza assoluta dei punti identifica la tolleranza degli stessi rispetto ad un sistema di riferimento globale, in questo caso un sistema cartografico nel quale l'accuratezza viene fornita nelle sue due componenti: planimetrica e quota. Nelle successive implementazioni delle specifiche è in progamma l'integrazione con l'accuratezza relativa dei punti, cioè la tolleranza della posizione reciproca dei punti

Si parte dal LOD0 che è essenzialmente una rappresentazione 2.5D dove è presente la cartografia numerica 2D e/o l'ortofotocarta proiettata sul modello del terreno e corrisponde grosso modo alla nostra scala regionale 1:10000 - 1:5000. Il livello successivo LOD1 è già una rappresentazione 3D in quanto prevede la rappresentazione degli ingombri volumetrici degli edifici, semplificati e senza rappresentazione dei tetti o di installazioni urbane. Esso corrisponde alle scale cartografiche urbane 1:2000 - 1:1000. Il livello di dettaglio LOD2 invece presenta un'ambito di applicazione a porzioni limitate dello spazio urbano o grossi complessi architettonici e prevede un'articolazione più dettagliata della superficie delle facciate e la texturizzazione delle stesse con fotopiani o ortofoto a bassa risoluzione, la rappresentazione della forma dei tetti e delle installazioni urbane. Vengono introdotte nuove classi per rappresentare le componenti dell'edificio come le superifici murarie (*WallSurface*), il tetto (*RoofSurface*), etc. Questo livello di dettaglio intermedio tra le rappresentazioni cartografiche urbane e quelle architettoniche corrisponde all'incirca alle scale 1:1000 - 1:500. Le scale successive LOD3 (1:200) e LOD4 (1:100) sono quelle più propriamente dedicate alla rappresentazione dei modelli architettonici. Il LOD3 prevede la rappresentazione realistica e non più generalizzata delle superfici delle facciate, viene introdotta la classe *Openings* (aperture) e le supefici sono mappate con fotopiani o ortofoto ad alta risoluzione. Nel livello successivo LOD4 vengono rappresentate anche le componenti interne degli edifici, come muri e arredi e vengono introdotte le corrispondenti classi per definirli: *Room*, *BuildingFurniture* e *IntBuildingInstallation*. Per il riepilogo delle classi di oggetti con i relativi livelli di dettaglio ammessi si rimanda all'Appendice 8.

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model scale description	regional, landscape	city, region	city districts, projects	architectural models (outside), landmark	architectural models (interior)
Class of accuracy	lowest	low	middle	high	very high
Absolute 3D point accuracy (position / height)	lower than LOD1	5/5m	2/2m	0.5/0.5m	0.2/0.2m
Generalisation	maximal generalisation (classification of land use)	object blocks as generalised features; > 6*6m/3m	objects as generalised features; > 4*4m/2m	object as real features; > 2*2m/1m	constructive elements and openings are represented
Building installations	-	-	-	representative exterior effects	real object form
Roof form/structure	no	flat	roof type and orientation	real object form	real object form
Roof overhanging parts	-	-	n.a.	n.a.	Yes
CityFurniture	-	important objects	prototypes	real object form	real object form
SolitaryVegetationObject	-	important objects	prototypes, higher 6m	prototypes, higher 2m	prototypes, real object form
PlantCover	-	>50*50m	>5*5m	< LOD2	<LOD2
... to be continued for the other feature themes					

Tabella 10.1.: requisiti di accuratezza dei LODs. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 6.2, p.9.

Estensibilità Il modello dei dati CityGML prevede due livelli di estensione: un primo più semplice e limitato nelle possibilità e un secondo più complesso e potente. Il primo meccanismo prevede l'utilizzo di oggetti generici, appositamente predisposti nello schema UML per l'estensione, ai quali è possibile aggiungere attributi generici per modellare le caratteristiche specifiche degli oggetti in questione. Questo meccanismo

è descritto nel modulo *GenericObjects* che introduce la classe *GenericCityObject*, utilizzata per implementare gli oggetti e la relazione con la classe *GenericAttribute* che permette l'introduzione di una serie illimitata di nuovi attributi, basati però su un numero ristretto di tipi di dato. Questo strumento naturalmente non permette una formalizzazione di un dominio specifico di applicazione del modello: essendo gli oggetti implementati e i nuovi attributi introdotti tutte istanze delle stesse classi non esiste la possibilità di qualificare il contenuto dei dati e quindi scambiare gli stessi dati assicurando che chi li riceve li interpreti correttamente. Esso piuttosto che essere un meccanismo di estensione è un contenitore per tutti quelli oggetti che non sono codificati altrove.

Le *Application Domain Extension* (ADEs) costituiscono il secondo livello che invece è un vero e proprio meccanismo di estensione del modello. Esso sfrutta gli strumenti di estensione della tecnologia XML, definendo un nuovo *namespace* associato ad uno schema XSD dove è descritta la struttura e tipologia delle informazioni. Per modellare oggetti più complessi aventi anche relazioni specifiche è necessario utilizzare le ADEs definendo prima lo schema XSD. Esso contiene tutte le informazioni necessarie per definire la struttura del modello: i tipi di dato e le regole associate. Ogni documento XML deve contenere il *namespace* dello schema XSD e il percorso dove reperire il contenuto per essere interpretato correttamente. Due sono i modi con qui è possibile estendere il modello CityGML con nuovi oggetti, relazioni ed attributi:

1. specializzare le classi CityGML introducendo nuove classi che necessariamente ne erediteranno attributi e relazioni;

2. definire, all'interno dello schema, le nuove classi che andranno a sostituire le classi del modello CityGML per mezzo dei gruppi di sostituzione, meccanismo di estensione del metalinguaggio XML.

Spatial Model Il modello geometrico CityGML segue sostanzialmente quello GML che a sua volta è basato sullo *Spatial Schema* ISO 19107. Per quanto concerne invece lo spazio topologico dei dati geometrici la soluzione adottata nelle specifiche CityGML precede l'adozione di un modello misto geometrico-topologico nel quale la componente metrica e topologica sono incorporate. La componente topologica dell'informazione spaziale cioè non è registrata separatamente in apposite tabelle ma è gestita internamente all'interno dello stesso modello. Le relazioni topologiche sono gestite nel modello geometrico-topologico CityGML attraverso un sistema di collegamenti o *link* tra gli oggetti geometrici che condividono l'appartenenza a classi diverse. Viene evitata la ridondanza del dato costituita dalla duplicazione di oggetti geometrici coincidenti e nello stesso tempo viene assicurata la correttezza topologica e la sua esplicazione mediante i meccanismi di indicizzazione.

La condivisione dello stesso contenuto geometrico da parte di diverse *features* si può esplicare in tre tipologie di relazioni topologiche:

1. la condivisione da parte di istanze di classi diverse dello stesso contenuto geometrico. La sovrapposizione totale di strati diversi permette che un oggetto geometrico identifichi allo stesso tempo due tematismi diversi (ad esempio una linea può identificare sia lo strato della viabilità che un confine amministrativo);

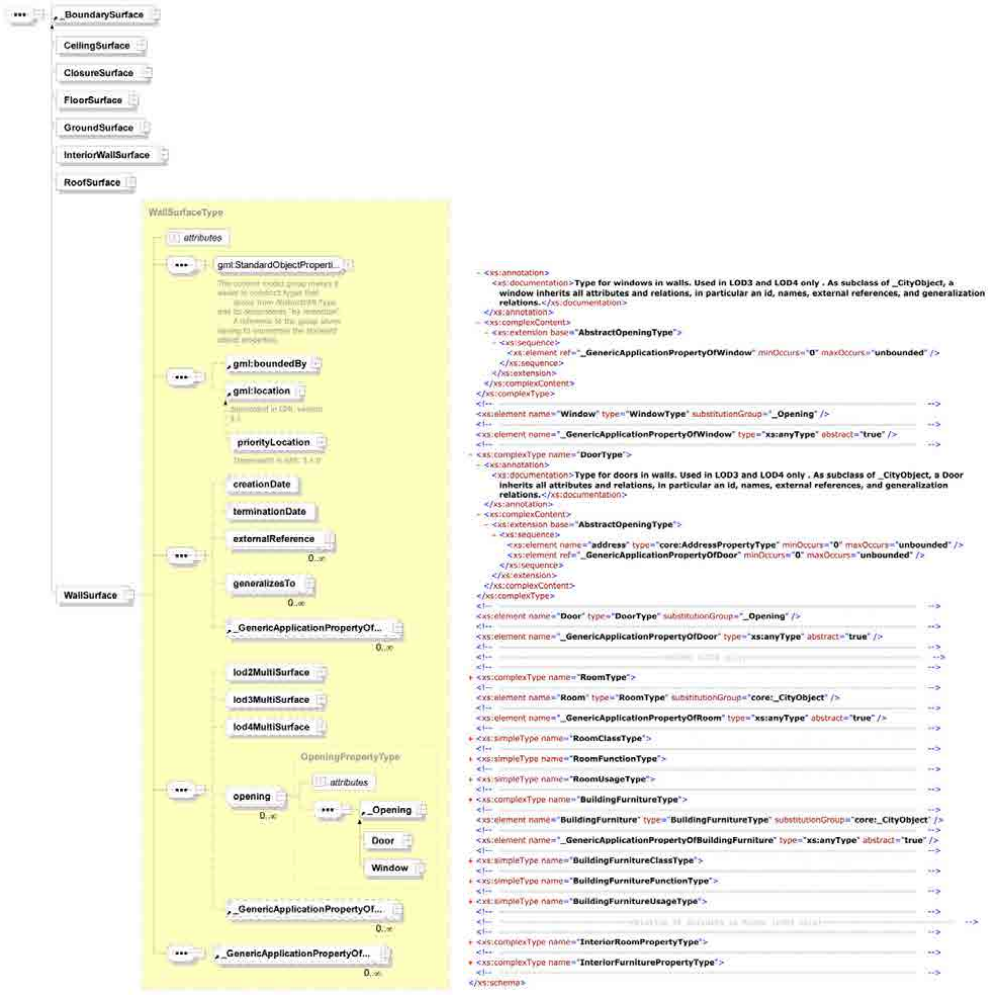


Figura 10.4.: schema XSD: visualizzazione in forma di schema e di codice di un estratto dello schema XSD del modulo *Building* che descrive la classe *BoundarySurface* e le relative dipendenze.

2. la condivisione da parte delle istanze di una classe genitore e di una figlia dello stesso contenuto geometrico. Questo si verifica comunemente nella strutturazione complessa degli oggetti geometrici, specialmente quelli del tema edificato della cartografia urbana (ad esempio la classe che definisce un muro può condividere la geometria con la superclasse che definisce l'edificio);

3. la condivisione da parte delle istanze appartenenti alla stessa classe dello stesso contenuto geometrico. Questo caso si verifica quando si tratta di suddividere lo spazio in modo discreto senza soluzione di continuità (ad esempio nelle mappe catastali dove il poligono di ciascuna particella condivide gli spigoli con i poligono adiacenti).

Il sistema utilizzato per codificare questi collegamenti tra gli oggetti geometrici e le *features* è derivato dallo strumento *XLinks* del linguaggio XML. Per mezzo di questo strumento ad ogni oggetto geometrico che può essere condiviso da differenti complessi geometrici o *features* viene assegnato un identificatore unico che può essere collegato

con lo strumento *href* previsto dal linguaggio GML ad altri oggetti o *features*. Le motivazioni di questa scelta, rispetto ad una struttura con un metamodello topologico separato, è motivata dalla ricerca di una maggiore flessibilità e facilità d'uso. Uno degli svantaggi di questo approccio è che la navigazione all'interno di oggetti complessi è possibile solo a partire dall'oggetto complesso scomponendolo nelle sue parti cioè a partire dalle classi genitore a quelle figlie. Un esempio di questo sistema di gestione delle relazioni topologiche è riportato nell'Appendice 8.

Per la descrizione della classificazione geometrica degli oggetti rappresentati nel diagramma si rimanda a quando specificato a proposito dello *Spatial Schema* ISO 19107. La codifica dell'intestazione delle classi contenente il nome della stessa è pressochè uguale a quella ISO con l'unica differenza che il nome è codificato come *namespace* XML: il prefisso identificativo del *namespace* seguito dai doppi due punti e il nome del *namespace*. Il prefisso, come ricordato, identifica lo schema XSD che serve per interpretare il contenuto dei dati espressi in linguaggio XML. Esso viene omesso quando il contenuto dello stesso è esplicitato all'interno dello stesso modello. Nel caso del modulo geometrico CityGML possiamo rilevare che tutte le classi contengono il prefisso *gml* che identifica il *namespace* <<Geometry>> definito dalle specifiche del formato GML.

Moduli tematici

- *Digital Terrain Model* (DTM): modulo per rappresentare l'orografia del territorio;
- *Building Model*: modulo dedicato alla rappresentazione del tema edificato;
- *Water bodies*: modulo per la rappresentaizone dell'idrografia;
- *Transportation objects*: modulo per la descrizione della viabilità ai vari livelli di dettaglio previsti;
- *Vegetation objects*: modulo utilizzato per rappresentare la vegetazione intesa sia come singoli oggetti geometrici (albero) sia come aggregazioni di oggetti (bosco);
- *City furniture*: viene utilizzato per rappresentare gli oggetti facenti parte dell'arredo urbano;
- *Land use*: questo modulo descrive l'utilizzo del suolo;
- *CityObjectGroups*: modulo che permette l'aggregazione di gruppi di oggetti appartenenti a diversi moduli;
- *GenericCityObject*: modulo per l'estensione del modello e la classificazione di oggetti non compresi negli altri moduli.

CityGML *core* La classe *_CityObject* rappresenta il livello più alto di generalizzazione del modello ed è la superclasse dalla quale tutte le classi tematiche CityGML derivano. Essa, il cui *namespace* è definito all'interno del modello stesso, è figlia della superclasse *gml::Feature* definita invece all'interno del modelloGML. In questo modello vengono definite sia le classi astratte di oggetti come la *_CityObject* che servono come

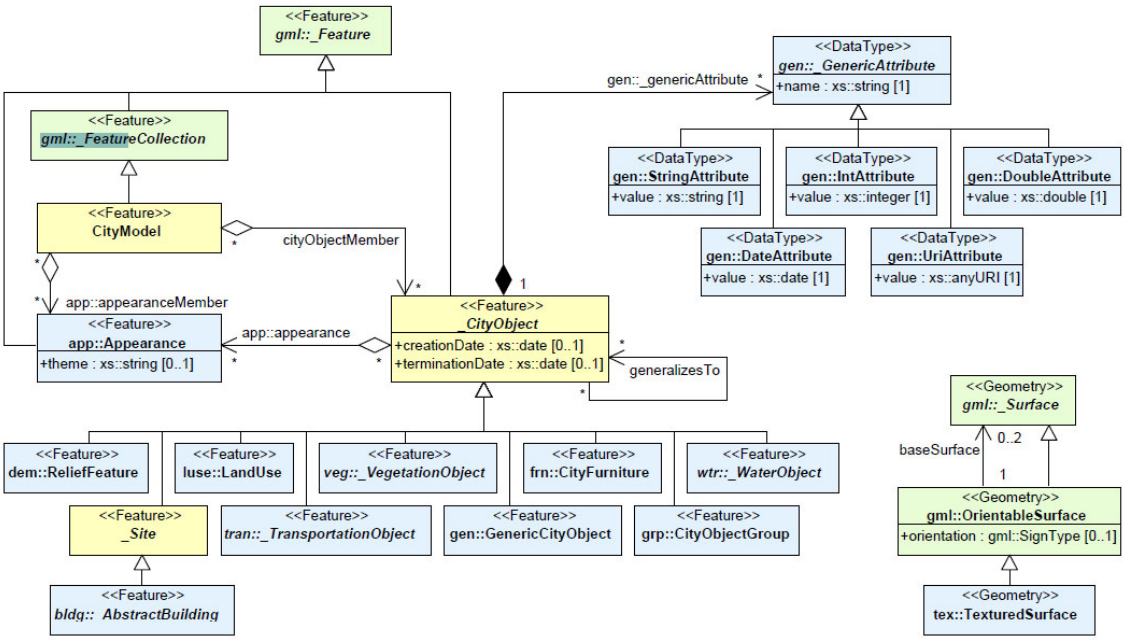


Figura 10.5.: diagramma UML di livello più alto della gerarchia CityGML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.1, p.44.

riferimento per modellare tutte le altre classi tematiche, sia alcune classi più specifiche che sono comuni ai vari moduli tematici come la classe *Address*. Questa classe viene qualificata tramite gli attributi *creationDate* e *terminationDate* che permettono di rappresentare in modo generico l'informazione espressa da una data di inizio e una di fine. Nel modello GML la dimensione temporale invece è definita da una schema apposito dotato di classi e relazioni specifiche.

La classe *ImplicitGeometry*, anch'essa definita all'interno del *core module* tematico, viene utilizzata per rappresentare degli oggetti in un sistema di coordinate locale. Questa particolare esigenza è frequente in ambito urbano laddove vi è la necessità di rappresentare oggetti che si ripetono uguali a se stessi, cioè con le stesse caratteristiche metriche, per un numero arbitrario di volte. La necessità di ridurre la ridondanza dei dati suggerisce il ricorso a questo sistema che prevede l'utilizzo di un sistema di riferimento locale per l'oggetto da utilizzare come modello per gli altri e l'esplicitazione delle matrici di trasformazione per la rappresentazione dell'oggetto nel sistema di riferimento cartografico del database. Questo sistema di rappresentazione dei dati è simile a quello utilizzato nell'ambito della modellazione geometrica noto come *Parameterized Primitive Instancing*. Gli attributi della classe *ImplicitGeometry* sono: *MIMEType*, *TransformationMatrix* (che definisce i parametri di trasformazione: traslazione, rotazione e scala), *libraryObject* (che contiene la URI del modello).

Building model In questo modello è presente la superclasse *core::_ CityObject*, definita dal modulo *CityGML core*, dalla quale derivano le superclassi specifiche di questo modulo tematico. Il legame tra le classi che descrivono le *feature* o classi tematiche e quelle che descrivono le geometria può essere realizzato tramite una o più relazioni diverse. La presenza di più relazioni permette alle istanze di una classe di essere as-

sociate a contemporaneamente a diverse istanze dell'altra classe e quindi permettere alle *feature* di condividere diversi contenuti geometrici. La classe *_AbstracBuilding* ad esempio è legata alle classi *gml::_Solid* e *gml::MultiSurface* da 4 relazioni diverse qualificate dal LOD, relazioni che permettono allo stesso oggetto di essere rappresentato contemporaneamente a diversi livelli di dettaglio.

Le classi del *Building*:

- *_AbstractBuilding*: classe astratta che rappresenta l'unità edificata elementare ovvero l'edificio nella sua connotazione più generale. Sia l'*_AbstractBuilding* che le sottoclassi da esso derivate sono associate alle primitive geometriche tramite le relazioni specifiche *lod1-4Solid*, *lod1-4MultiSurface* e *lod1-4TerrainIntersection* o *lod1-4MultiCurve*, una per ciascun LOD ammesso. Le ultime due descrivono l'intersezione tra il modello del terreno descritto nel modulo *Digital Terrain Model* (DTM) con le superfici esterne del *Building;*
  - *Building*: rappresenta una singola unità edificata nel caso in cui essa coincida anche con l'unità volumetrica della stessa;
  - *BuildingPart*: rappresenta un unità volumetrica che compone l'edificio. La relazione che lega gli oggetti appartenenti alla classe figlia (*BuildingPart*) con quella genitore (*Building*) è esplicitata come *consistOfBuildingPart;*
- *BuildingInstallation*: classe che rappresenta le altre componenti dell'edificio quali scale, camini o balconi, non rilevanti per forma e tipologia come la *BuildingPart* Essa mantiene la relazione *outerBuildingInstallation* con la classe *_AbstractBuilding*;
- *_BoundarySurface*: classe astratta che rappresenta lo sviluppo delle varie componenti del *Building* ovvero le superfici che delimitano l'involucro dell'edificio. Essa, così come le sue generalizzazioni, è associata alle classi geometriche *lod2-4MultiSurface.* Mantiene la relazione *BoundedBy* con la classe *_AbstractBuilding* e con la classe *Room.* È la classe genitore delle sottoclassi:
  - *RoofSurface*;
  - *WallSurface*;
  - *GroundSurface*;
  - *ClosureSurface*;
  - *CeilingSurface*;
  - *InteriorWallSurface*;
  - *FloorSurface*;
- *_Opening*: classe astratta generalizzazione di *_BoundarySurface* con cui mantiene la relazione *opening.* Le primitive geometriche ammesse sono *lod3-4MultiSurface.* A sua volta è suddivisa in:
  - *Window;*
  - *Door;*

- *Room*: classe cui è associata la primitiva geometrica *lod4Solid* e che è qualificata dalla relazione *InteriorRoom* con l'*_AbstractBuilding*;

- *BuildingFurniture*: è la classe che identifica gli arredi interni dell'edificio. Essa può essere associata alla primitiva geometrica generica dello schema GML *lod4Geometry*, oppure essere riferita ad un modello definito esternamente nel caso di oggetti che si ripetano uguali a se stessi. Viene pertanto utilizzato lo stesso sistema dell'*ImplicitGeometry* adottato per rappresentare la vegetazione nel modulo tematico *Vegetation objects*. Grazie a questo sistema è possibile definire una sola volta la geometria e ripertela tale a se stessa tramite il riferimento alle coordinate di un punto e una matrice di trasformazione che determina i parametri di rototraslazione. La classe *BuildingFurniture* intrattiene la relazione *InteriorFurniture* con la classe *Room*;

- *IntBuildingInstallation*: a differenza della precedente rappresenta gli oggetti fissi presenti all'interno dell'edificio come per esempio scale interne e radiatori. Essa è associata alla primitiva GML *lod4Geometry*.

Relief Module Il modulo *Relief* permette di modellare il modello del terreno nelle sue divere tipologie di rappresentazione geometrico-topologica. Questo strato informativo, a differenza degli altri strati è meno caratterizzato dal punto di vista semantico in quanto è utilizzato per modellare principalmente i fenomeni naturali che interessano la superficie terrestre. La maggior parte delle classi che lo compongono sono infatti prive di attributi specifici, mentre le cui relazioni con il contenuto geometrico comprendono collegamenti a diverse tipologie di rappresentazioni spaziali. Le due classi principali che compongono il modulo, anch'esse specializzazioni di *CityObject*, sono *ReliefFeature* e *_ReliefComponent*. Le due classi sono legate tra loro da un meccanismo di aggregazione che va dalla prima (classe aggregante) alla seconda (classe aggregata) con cardinalità $[0...1], \rightarrow n$ (zero o uno a molti). La classe *ReliefComponent*, inoltre è legata direttamente con la classe *gml::Polygon*, relazione di aggregazione dalla prima alla seconda che permette di specificare un contorno di validità per il modello del terreno. La componente geometrica del modello viene però specificata solo al livello delle specializzazioni della classe *_ReliefComponent* che sono *TINRelief*, *MassPointRelief*, *BreaklineRelief*, *RasterRelief*. Queste quattro classi semantiche sono messe in relazione con le corrispondenti classi geometriche dello *Spatial Model* che definiscono appunto il contenuto geometrico dei modelli del terreno: *gml::TriangulatedSurface*, *gml::MultiPoint*, *gml::MultiCurve*, *gml::RectifiedGridCoverage*. Questa struttura permette a ciascun componente del modello del terreno di essere specificato contemporaneamente per mezzo di diversi supporti metrici come immagini georiferite e modelli vettoriali di vario tipo. La classe *gml::TriangulatedSurface* è ulteriormente specializzata in *gml::TIN* consentendo di supportare anche una definizione implicita della superficie triangolata che può essere ricostruita tramite i valori dei suoi attributi. Le superfici triangolate sono costituite da un aggregazione compositiva di superfici triangolari generate automaticamente grazie ad algoritmi come la triangolazione di Delaunay, sulla base di una collezione di primitive geometriche quali punti o linee. Gli attributi di *gml::TIN* permettono di esprimere il contenuto geometrico di base (linee e/o punti) e i parametri di generazione della superficie espressi dal'algoritmo. Nel modulo *Relief*, a

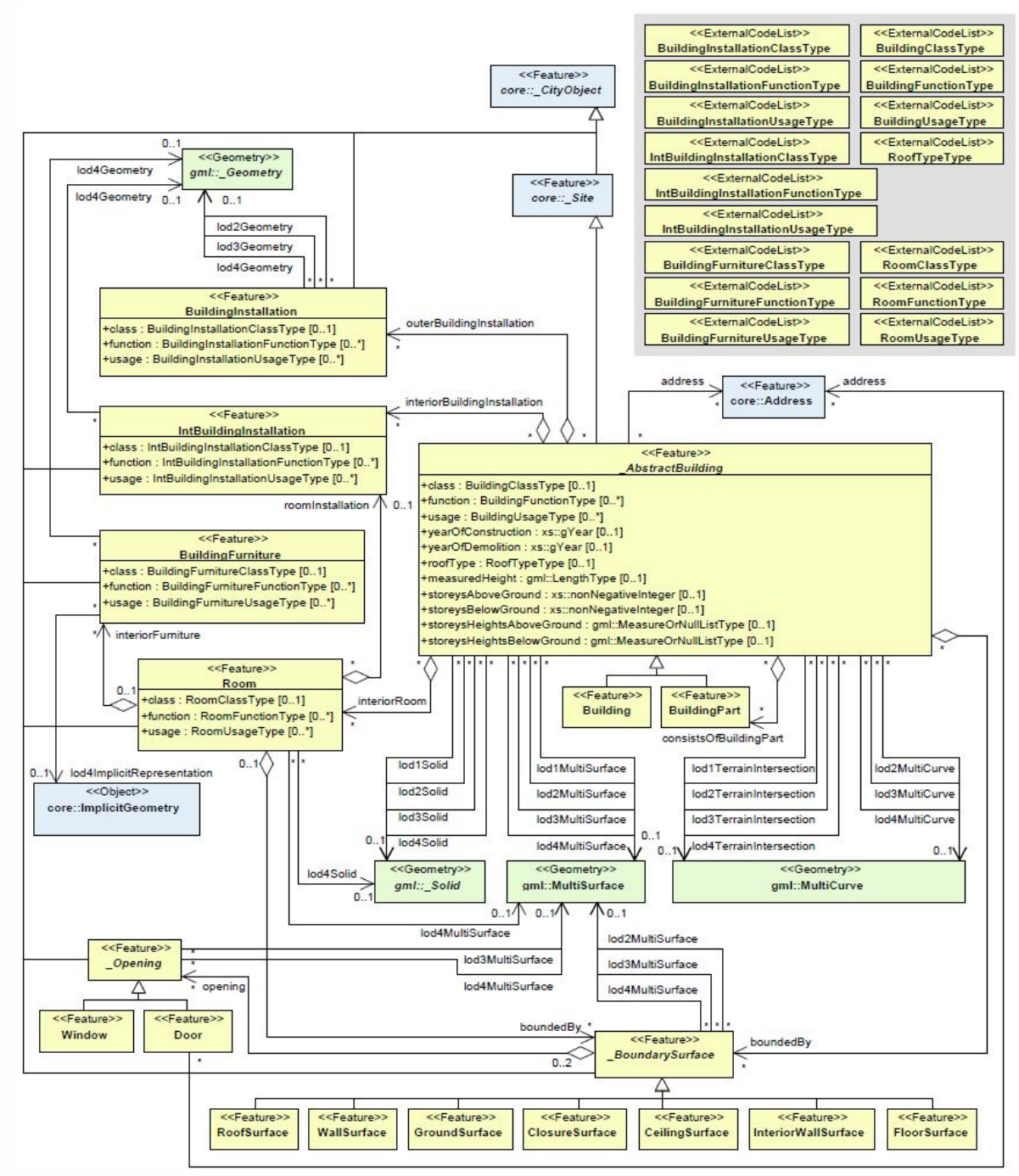


Figura 10.6.: diagramma UML del *Building model*, OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.3, p.57.

differenza di *LandUse* e *Building*, il legame tra le classi tematiche e quelle geometriche è esplicitato tramite una singola relazione che lega le classi una ad una. Questo comporta a livello di implementazione l'impossibilità di associare ad una singola istanza delle classi semantiche diversi contenuti geometrici a seconda del LOD.

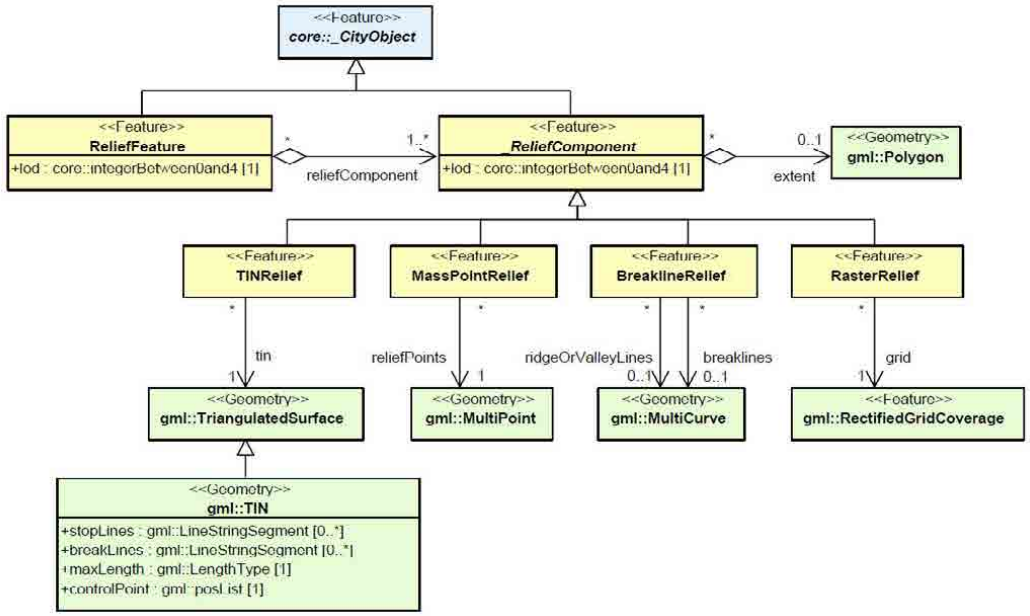


Figura 10.7.: modulo *Relief* OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo10.2, p.51.

Appearance Model Il modulo *Appearance* è un altro dei moduli tematici che a differenza degli altri definisce una tematizzazione comune a tutti gli strati informativi cartografici. La superclasse *Appearance* rappresenta il livello più alto che si relaziona direttamente con le classi *core::CityModel* e *core::CityObject* del modulo *CityGML core* descritto precedentemente. La relazione *appearanceMember* (cardinalità n,m) con la classe *CityModel* qualifica gli oggetti appartenenti alla classe *Appearance* come aggregati della classe *CityModel* (al pari della stessa classe *CityObject*). Un'altra relazione simile *appearance* lega la stessa classe *Appearance* all'altra classe *_CityObject*. Questa duplice relazione di aggregazione permette di implementare diverse istanze per la classe *Appearance* per ogni corrispondente istanza delle altre due classi del *core*. Questo equivale a dire che ogni oggetto del tema edificato, così come l'intero modello cittadino, siano associati a numerosi temi di aspetto superficiale e viceversa. Le classi che definiscono le tipologie di aspetto e le modalità di applicazione alla geometria di base sono tutte specializzazioni della classe *_SurfaceData*, la quale come *Appearance* è una specializzazione della superclasse *gml::Feature*. La relazione tra queste due classi è di nuovo un'aggregazione e permette ad un determinato aspetto di essere esplicitato tramite differenti tipologie di dati anche contemporaneamente. La classe astratta *_SurfaceData* si specializza nelle classi *X3DMaterial* e *_Texture*, che corrispondono alle due principali modalità con cui è possibile definire appunto l'aspetto superficiale degli oggetti. La classe *_Texture* viene ulteriormente specializzata in *ParameterizedTexture* e *GeoreferencedTexture*. La prima permette di specificare le modalità di applicazione nel-

l'immagine al contenuto geometrico specificando le coordinate di mappatura ovvero la proiezione dei vertici del *gml::LinearRing* sull'immagine nel suo sistema di riferimento. La seconda classe invece è utilizzata per modellare le immagini georeferenziate.

La classe *X3DMaterial* è definita secondo le specifiche del del formato X3D (*Extensible 3D Graphics*) e COLLADA. Le caratteristiche superficiali degli oggetti sono descritte tramite una serie di attributi: *diffuseColor*, *specularColor*, *emissiveColor*, *ambientIntensity*, *shiness*, *target*. I primi tre caratterizzano la risposta fisica degli oggetti alle sorgenti luminose, *ambientIntensity* e *shiness* definiscono invece le caratteristiche di illuminazione rispettivamente ambientale e della sorgente luminosa. L'attributo *target* invece è quello che permette l'applicazione della mappatura del materiale all'oggetto tramite la URI (*Universal Resource Identifier*) dell'oggetto stesso.

Le *texture* sono gestite da una classe separata dalla *X3DMaterial*. Gli attributi della classe sono:

- *imageURI*: rappresenta l'identificativo univoco della risorsa, che può essere anche richiamata tramite un servizio Web;
- *mimeType*: definisce la tipologia di formato dell'immagine secondo lo standard MIME (*Multipurpose Internet Mail Extensions*)[8]
- *textureType*: definisce la tipologia a seconda che sia specifiche per un determinato oggetto oppure tipica per una determinata classe di oggetti;
- *wrapMode*: definisce le modalità con cui la *texture* è ripetuta sulla superficie applicata.

Questi strumenti di modellazione, definendo l'aspetto degli oggetti, permettono una visualizzazione fotorealistica dei modelli geometrici e sono il frutto dell'integrazione delle funzionalità dei sistemi CAD con i GIS. La modellazione dei parametri che permettono la restituzione fotorealistica o *rendering* dei modelli geometrici è infatti una delle funzionalità più sviluppate e potenti dei sistemi CAD. Essi prevedono la modellazione delle sorgenti luminose ambientali dirette e indirette e la definizione dei materiali. Quest'ultima permette oltre che la definizione dell'aspetto delle superfici anche la modellazione della loro risposta all'esposizione delle sorgenti luminose e loro contributo alla determinazione dei parametri globali. Naturalmente sono funzionalità che determinano notevoli oneri dal punto di vista computazionale. Alcune di queste funzionalità come ad esempio la modellazione dei comportamenti di riflessione e rifrazione della luce sulle superfici e i parametri di illuminazione indiretta sono inoltre strumenti che trovano la loro applicazione maggiore nella progettazione di interni o il design e quindi a scale di rappresentazione più elevate. Un aspetto di questi funzionalità dei sistemi CAD che è invece rilevante ai fini della visualizzazione dei dati cartografici urbani è la definizione dei parametri di illuminazione globale. Questa funzionalità, attraverso una sommaria georeferenziazione, consente di approssimare le condizione di illuminazione esterna ad un determinato orario e periodo dell'anno. In un modello in cui siano

[8]Trattasi di uno standard della *Internet Engineering Task Force* (IETF) organismo internazionale che lavora a contatto con il W3C e l'ISO per la definizione di standard aperti. Esso descrive il formato dati scambiati attraverso e-mail specificando il tipo di contenuto e i metodi di accesso Utilizzato anche dal protocollo HTTP e nel linguaggio HTML.

noti le informazioni di georeferenziazione (sistema di riferimento, sistema di coordinate) esse possono essere utilizzate dal sistema per calcolare gran parte dei parametri di illuminazione globale.

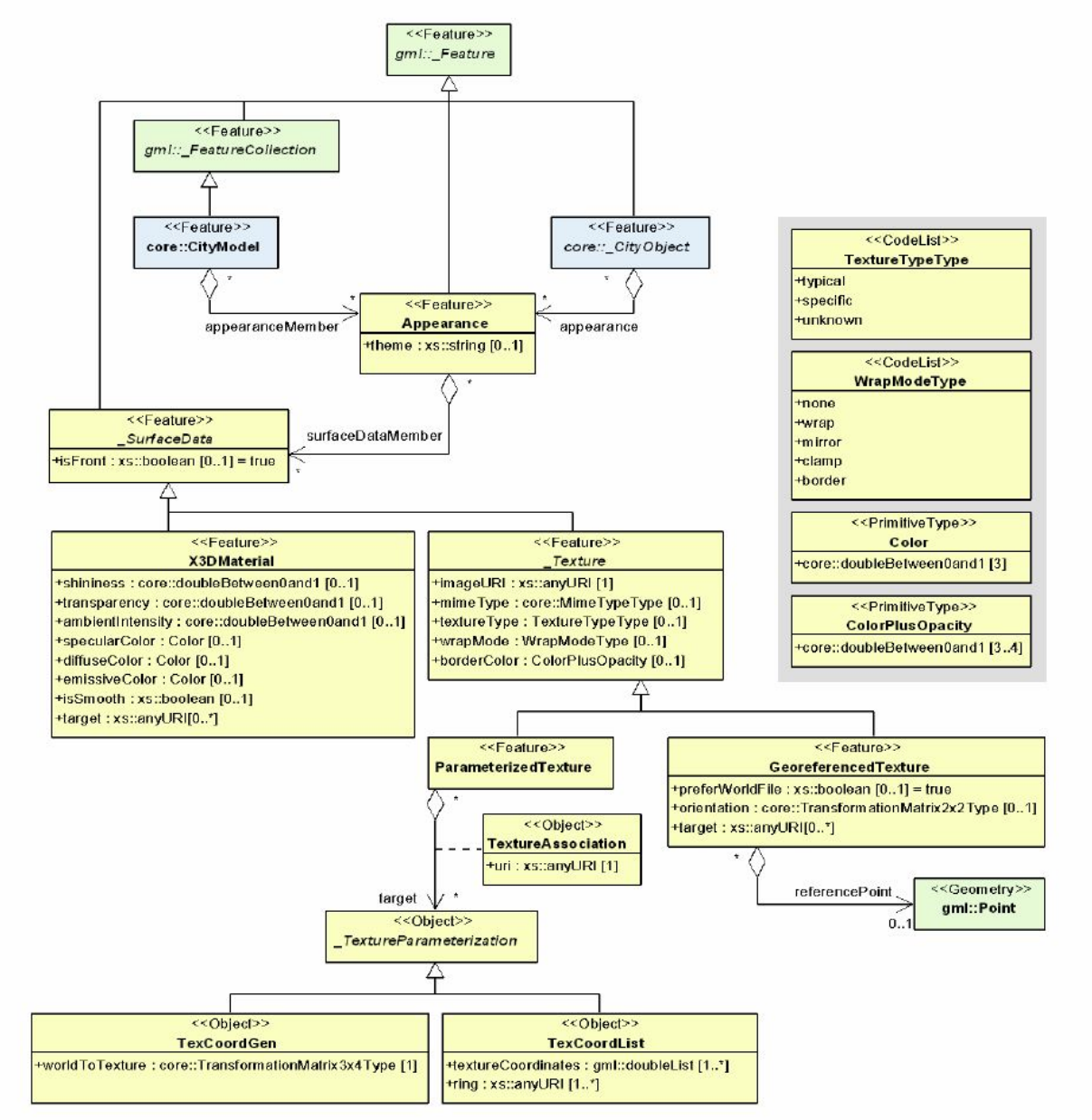


Figura 10.8.: diagramma UML del modulo *Appearance*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 9, p.29.

GeoreferencedTexture

Questa classe permette la georeferenziazione di immagini su superfici piane. Sono definite due modalità di definizione dei parametri di georeferenziazione:

- *preferWorldFile*: il primo attributo fa riferimento alla presenza delle informazioni di georeferenziazione. Solitamente nelle immagini georeferenziate il file che

contiene i parametri è incorporato nell'immagine stessa (come nei formati .gtiff o .gjw) o in un file esterno come nel caso del *world file* ESRI. Se il valore dell'attributo è vero viene utilizzato il *WordFile* per la georeferenziazione altrimenti vengono utilizzati i parametri definiti dagli altri attributi;

- *referencePoint*, *orientation*: sono gli attributi che definiscono invece i parametri di georeferenziazione in un modo simile a quello del *WordFile* ESRI. Se è presente il *WordFile* e il suo valore è positivo questi attributi non vengono considerati.

ParameterizedTexture

Questa tipologia di tematismo viene applicata unicamente alla superclasse di oggetti geometrici *gml::LinearRing* (cui appartengono le classi *gml::Triangle*, *gml::Polygon*, *gml:MultiTexture*). Tramite le sue sottoclassi è possibile sia mappare tramite una proiezione ortogonale immagini su una superficie piana, sia applicare un procedimento fotogrammetrico parametri di mappatura della *texture* sono specificati dalle seguenti sottoclassi:

- *TexCoordList*: Questa classe tramite l'attributo *textureCoordinate* definisce i parametri di proiezione ortogonale di una *texture* su di un piano. Le coordinate di mappatura della *texture* sono definite tramite i valori degli attributi. L'attributo *textureCoordinates* è utilizzato per specificare le coordinate nel sistema di riferimento dell'immagine. I valori sono costituiti da una coppia di coordinate nel sistema di riferimento immagine. È possibile definire un numero arbitrario coordinate di punti o *target* per la mappatura dell'immagine che possono cadere sul bordo oppure all'interno di essa. Il secondo attributo *ring* permette di specificare tramite il suo valore il collegamento con la superficie sulla quale l'immagine deve essere proiettata. Le coordinate del *ring*, specificate nella corrispondente classe geometrica, costituiscono le coordinate di destinazione dei *target* nella matrice di trasformazione che permette la proiezione.

- *TexCoordGen*: questa classe invece è utilizzata per specificare i parametri di trasformazione dell'immagine ne caso che essa sia una proiezione centrale oppure per mappare geometrie complesse tramite singole *texture*. Gli attributi *wordToTexture*, definiscono i parametri di trasformazione. Nel procedimento di trasformazione dell'immagine dalla prospettiva centrale a quella ortogonale viene utilizzato il metodo analitico e sono specificate quattro matrici di trasformazione:
  - la prima definisce il ritaglio della porzione di immagine da mappare;
  - la seconda è la matrice di trasformazione omografica che definisce i parametri di orientamento esterno;
  - la terza è quella che definisce i parametri di orientamento interno della camera (esclusi quelli relativi alle distorsioni dell'obiettivo);
  - l'ultima matrice definisce i parametri di orientamento assoluto espressi dalla posizione dei centri di presa.

Considerazioni La completezza nella descrizione delle specifiche CityGML come di quelle GML secondo diversi livelli di linguaggio le rende sicuramente uno degli strumenti più promettenti nell'ambito della modellazione dei dati spaziali in ambito urbano. Tra gli aspetti più significativi in relazione alla documentazione dei beni culturali

architettonici vi sono la gestione dei rapporti di ereditarietà e relazione tra le varie componenti del database cartografico che permette l'articolazione di oggetti complessi e il livello di dettaglio che viene gestito come una caratteristica geometrica specificata a livello della singola classe, consentendo la visualizzazione simultanea o selettiva dei diversi LODs sul modello. Il modulo *Appareance* permette l'assegnazione di una tematizzazione multipla applicata globalmente e simultaneamente su tutti gli oggetti rappresentati. Esso consente la visualizzazione fotorealistica degli oggetti e la mappatura degli stessi con attributi non geometrici che rappresentano diverse proprietà superficiali della geometria. La gestione dell'informazione tridimensionale è coerente con i livelli di dettaglio utilizzati in ambito cartografico, arrivando a sovrapporsi con le scale di rappresentazione proprie della progettazione architettonica (LOD3 e LOD4).

La completezza del modello dal punto di vista della definizione dei dati, le caratteristiche di estensibilità del linguaggio UML utilizzato e la filosofia *open-source* alla base della pubblicazione dei dettagli tecnici delle specifiche sono le caratteristiche principali che incoraggiano la specializzazione del modello per venire incontro alle esigenze di particolari ambiti di applicazione. Nonostante il panorama delle applicazioni sia ancora per la maggior parte dei casi lontano dalla piena gestione dell'informazione 3D, le specifiche CityGML sicuramente rappresentano un importante modello di riferimento da seguire per lo sviluppo delle applicazioni.

Intesa GIS

Il protocollo d'intesa

Intesa GIS è un protocollo di intesa tra lo Stato italiano e le Regioni elaborato dal Centro Interregionale per il Coordinamento e la Documentazione per le Informazioni territoriali, dal 2007 confluito nel CISIS - Centro Interregionale per i Sistemi Informatici, Geografici, Statistici. Le istituzioni nazionali, regionali e locali coinvolte sono Ministeri Interno, Difesa, Finanze, Tesoro, Bilancio e Programmazione Economica, Ambiente, Lavori Pubblici, Sanità, Risorse Agricole, Alimentare e Forestali, Trasporti e Navigazione, Affari Regionali, Autorità per Informatica nella Pubblica Amministrazione, Istituto Nazionale di Statistica, ANCI, UPI, UNCEM, CISPEL, Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle province Autonome. Questo protocollo è un passo importante di un lungo percorso iniziato negli anni '70 a livello regionale avente come obiettivi la definizione di strategie comuni e standard per l'informazione geografica a livello territoriale. Il percorso verso la definizione di regole comuni per la produzione e la gestione di informazioni geografiche si è sviluppato a partire dalla necessità dell'integrazione tra il livello regionale degli enti preposti alla produzione di informazione geografica a quello nazionale del coordinamento delle iniziative e normativo. Questi due livelli sono stati integrati negli anni '80 proprio con la creazione del Centro Interregionale per il Coordinamento e la Documentazione per le Informazioni territoriali:

> «...Associazione volontaria fra le Regioni e le Province Autonome che opera per il coordinamento delle iniziative, la diffusione delle informazioni, l'aggiornamento culturale, il raccordo con le strutture centrali dello Stato.» *[51]*

La prima fase di attività del Centro ha riguardato lo scambio di informazioni relative alle specifiche tecniche attraverso la pubblicazione di documenti e l'attivazione di gruppi

di lavoro. A partire dagli anni '90 si è iniziato a sviluppare progetti comuni a livello nazionale e interregionale finanziati dalla Comunità Europea quali:

1. progetto CORINE-Land Cover per la produzione di una cartografia della copertura del suolo a scala 1:100000;

2. progetto LACOAST per il monitoraggio delle variazioni intervenute nell'uso del suolo nelle fasce costiere europee;

3. progetto TRANSITALIA avente come obiettivo il telerivamento delle zone boschive appenniniche e insulari.

Dopo queste prime fasi, nell'ottica della predisposizione di un disegno di legge in materia presentato nel 1997, a partire dal 1996 il Centro ha partecipato ai lavori che hanno portato alla definizione del protocollo di intesa *Stato-Regioni-Enti Locali sui sistemi informativi geografici* (Intesa GIS) e l'*Accordo sul Progetto per il Sistema Cartografico di Riferimento* [21]. Gli assunti da cui prende le mosse quest'iniziativa sono innanzitutto le esigenze di una buona disponibilità di prodotti cartografici in formato numerico aggiornati e di gestirli tramite sistemi informativi a livello locale, regionale e nazionale. In considerazione di questo è stata evidenziata la necessità di integrazione della cartografia alla media e piccola scala, realizzata da Regioni e Istituto Geografico Militare, con quella alla grande scala prodotta dagli Enti Locali e dall'Agenzia per il Territorio nelle zone urbanizzate. L'obiettivo dell'Intesa è proprio una maggiore integrazione di questi livelli e un coordinamento di tutte le iniziative al fine di realizzare e aggiornare database cartografici di interesse generale. Uno degli aspetti fondamentali presi in considerazione per la realizzazione di questi obiettivi è proprio la definizione di specifiche comuni valide su base nazionale e coerenti con gli indirizzi comunitari. Gli obiettivi prioritari per il raggiungimento di questo scopo vengono definiti per ogni ambito di applicazione:

- per la realizzazione della maglia dei punti di riferimento viene stabilito il raffittimento della maglia di inquadramento IGM95 e maglia dei punti fiduciali catastali; la determinazione di nuove linee di livellazione di precisione per le quote geoidiche, la creazione di un modello digitale del terreno per la produzione di ortoimmagini digitali;

- per la creazione del repertorio cartografico esistente viene stabilita la realizzazione di una base informativa per la certificazione delle informazioni attualmente a disposizione che è basata sui metadati per quanto concerne la documentazione e la banca dati dei punti fiduciali per la localizzazione;

- per la realizzazione dei DB geografici a grande scala vengono stabilite le priorità della definizione delle regole comuni definite dagli enti maggiormente coinvolti; la realizzazione del Database geografico standard per aree maggiormente urbanizzate a scala 1:1000/2000, l'integrazione con i dati catastali aggiornati; la realizzazione di ortoimmagini digitali con accuratezza superiore a 1:10000;

- per la realizzazione dei DB geografici a piccola e media scala come per i precedenti viene stabilita la definizione di specifiche comuni, la realizzazione di ortoimmagini digitali in scala 1:25000 con accuratezza pari a quella della cartografia 1:10000, la realizzazione dei database geografici nelle scale 1:10000, 1:25000/50000, 1:250000.

Vengono altresì definiti i soggetti attuatori, le modalità e i tempi di realizzazione degli obiettivi prefissati. La realizzazione della cartografia a grande scala viene demandata alle regioni, Province, Comuni, Agenzia per il Territorio e altri Enti Locali. La realizzazione della cartografia a media e piccola scala invece viene affidata principalmente a Regioni, Province, IGM, Marina, Aeronautica per quanto concerne la costituzione e l'aggiornamento della cartografia in scala 1:5000/10000, mentre l'IGM e gli altri Istituti della Difesa per quanto concerne la formazione della cartografia in scala 1:25000 e la derivazione di quella in scala 1:50000 e 1:250000.

Per la definizione delle specifiche comuni viene avviato il progetto *Sistema Cartografico di Riferimento* per quanto concerne la cartografica a grande e media scala e progetti analoghi per la cartografia a grande scala. Secondo questo progetto la definizione delle specifiche viene condotta tramite la collaborazione tra i soggetti nazionali (IGM, Aeronautica, Marina) e le Regioni, tra le quali vengono identificate come capofila la Basilicata e il Veneto. Le attività definite da questo progetto si sviluppano nel quinquennio 2000-2005 e hanno portato a realizzare alcuni degli obiettivi prefissati dal protocollo di intesa che comprendevano anche l'integrazione della base cartografica. i prodotti elaborati sono:

- la realizzazione del repertorio cartografico nazionale;
- la definizione delle specifiche tecniche per il raffittimento della Rete Geodetica Nazionale, per la realizzazione del Data Base Topografico e per la realizzazione di Modelli Digitali del Terreno;
- la realizzazione del Data Base degli Strati Prioritari su base regionale poi assemblati in un unico database nazionale riguardanti le infrastrutture stradali, ferroviarie e la rete idrografica;
- il repertorio dei metadati aggiornato secondo le specifiche ISO/CEN;
- la realizzazione delle reti di raffittimento e il completamento di alcune linee di livellazione di precisione.

Le specifiche

I documenti che costituiscono queste Specifiche [44] sono organizzati in tre gruppi di documenti. Il primo contiene le specifiche di contenuto che costituiscono le prescrizioni di fornitura del materiale cartografico, espresse in linguaggio naturale formale. Appartengono a questo gruppo: *Il Catalogo degli oggetti* (1n1007_1-2), *Lo Schema in GeoUML delle Specifiche di Contenuto* (1n1007_4), *La presentazione cartografica* (1n1007_3), *La Codifica del Contenuto in GML* (1n1007_5) e *La Derivazione del DB25 dal Catalogo degli Oggetti* (1n1007_6).

Il secondo contiene la definizione e la spiegazione del modello concettuale GeoUML che rappresenta lo schema o struttura secondo la quale vengono descritti e organizzati i dati. Appartengono a questo gruppo: *Specifica formale in UML* (1n1010_1), *Inquadramento Generale ed Introduzione all'Uso* (1n1010_2). In questo gruppo di documenti vi è anche una descrizione testuale in linguaggio naturale dove sono descritte le caratteristiche del metamodello GeoUML utilizzato per descrivere le proprietà generali di un contenuto informativo. La sua formalizzazione è compatibile con gli standard OMG

e ISO in quanto il linguaggio GeoUML è una specializzazione di quello UML e le classi spaziali sono derivate dallo *Spatial Schema* ISO 19107.

Conclude l'insieme il terzo gruppo di specifiche amministrative e per la fornitura: *Linee Guida per l'Implementazione* (1n1014_1_4).

Contenuto geometrico

> «Una delle scelte fondamentali riguarda la presenza e le proprietà degli oggetti alle diverse scale e può essere sintetizzata con la seguente affermazione: gli oggetti si acquisiscono alle diverse scale con lo stesso contenuto informativo.
>
> Quello che varia è il dettaglio in funzione della soglia di discriminazione, propria della scala, e di conseguenza il dettaglio di forma e quello informativo associato. Questo consente la presenza nel Data Base di oggetti di diverso livello di dettaglio, ovviamente a fronte di precise regole di consistenza. Pertanto queste Specifiche di contenuto definiscono un Data Base multiprecisione.
>
> Da quanto detto ne consegue che di ogni classe viene data una descrizione unitaria, indipendentemente dalle scale di acquisizione o di presentazione, esplicitandone le differenze di dettaglio dovute alla diverse soglie di acquisizione o le regole di derivazione dalle scale maggiori per la presentazione a scala minore.»[9]

Le classi degli oggetti geometrici modellati in GeoUML sono derivate da quello ISO 19107 *Spatial Schema*. l'attenzione verso la modellazione del dato geometrico a diversi livelli di precisione e di scala di rappresentazione è un aspetto significativo dell'approccio delle specifiche alla rappresentazione delle caratteristiche dei dati urbani e alla loro gestione in un archivio integrato. Non vengono però specificate le modalità con le quali la rappresentazione multiscala e quindi la possibilità di definire relazioni specifiche tra lo stesso contenuto tematico e diversi contenuti geometrici.

L'approccio alla modellazione delle rappresentazioni 3D, enunciato nel documento programmatico *Inquadramento generale e guida ai documenti*, è sostanzialmente orientata alla rappresentazione grafica e cioè all'aspetto della visualizzazione. Non vengono definite delle vere e proprie rappresentazioni 3D: la rappresentazione del dato è sempre realizzata per mezzo delle sue proiezioni sui piani del sistema di riferimento cartesiano.

> «[...]ad ogni contorno 3D corrisponde un contorno 2D ottenuto come proiezione del 3D[...]»[10]

Nei tre livelli di definizione della rappresentazione, che definiscono l'approccio delle specifiche alla modellazione delle rappresentazioni 3D, vengono schematizzati i sistemi utilizzati per la rappresentazione delle superfici 2.5D e 3D attraverso la loro scomposizione in superfici 2D e 2.5D. Nel primo livello troviamo le rappresentazioni 2.5D che

[9] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida ai documenti. 1n1012*, Capitolo 2.4, p. 11.

[10] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 24.

abbiamo analizzato e che sono facilmente gestibili dal punto di vista dell'implementazione del dato geometrico nei DBMS. Nel secondo livello troviamo tutte la rappresentazione delle superfici verticali per mezzo dell'estrusione della proiezione del contorno sul piano di riferimento orizzontale o verticale che come abbiamo visto sono sempre alla fine riconducibili ad una rappresentazione 2.5D.

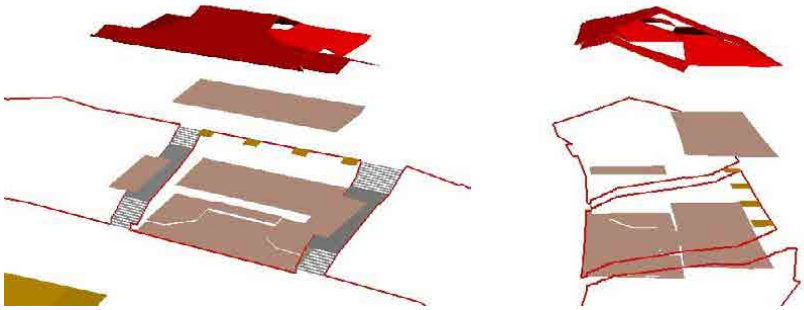


Figura 10.9.: meccanismo di scomposizione della rappresentazione 3D in rappresentazioni 2.5D. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 230.

Il dato geometrico relativo all'elevazione viene quindi trattato all'interno di queste rappresentazioni essenzialmente come attributo: l'attributo della definizione della quota di estrusione e quello della modalità di estrusione (parallela o proiettata sul piano di riferimento). Nel terzo infine troviamo una serie di casi nei quali le superfici 3D vengono scomposte in superfici 2D o 2.5D per permettere l'organizzazione logica del contenuto. Il meccanismo è quello della definizione di un secondo piano di proiezione che permette di scomporre le superfici che presentano diversi valori della z per $z > 0$ in superfici rappresentabili per mezzo della loro unica proiezione su un piano di riferimento orizzontale o verticale. Le rappresentazioni così definibili sono ad esempio le sporgenze dei tetti o gli aggetti dei balconi.

> «[...]Si prevedono così tre livelli di dettaglio per la ricostruzione della terza dimensione,
> - un primo livello costituito dall'andamento del DTM
> - un secondo livello integrato dall'estrusione delle unità volumetriche degli edifici
> - un terzo livello che completa il secondo con l'estrusione delle coperture e dei manufatti[...]»[11]

Tutte le classi che riportano il suffisso 3D come per esempio *GU_Point3D*, *GU_Curve3D*, *GPSurface3D* sono definibili unicamente attraverso la loro proiezione su uno o più piani orizzontali e verticali. Vengono quindi definiti i profili di sezioni intermedie orizzontali utili alla definizione dei volumi aggettanti. Le superfici che invece definiscono l'interno di una concavità, come gli oggetti che non possono essere estrusi secondo una

[11] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 22.

direzione verticale o orizzontale quali strombature, bastionature e contrafforti, sono rappresentate per mezzo dei profili di sezione verticali utili alla definizione.

> «Un aspetto che ha profondamente influenzato il modello geometrico di GeoUML è la scelta di utilizzare al meglio la disponibilità di informazioni tridimensionali, di tipo puntiforme o lineare, senza però rappresentare un modello tridimensionale completo delle superfici e dei volumi. Questa scelta si basa quindi sui seguenti principi:
> - gli oggetti geometrici puntiformi e lineari sono rappresentabili in 3 dimensioni (spazio 3D);
> - per gli oggetti geometrici che sarebbero superfici nello spazio può essere rappresentata la frontiera poligonale (anelli) in 3 dimensioni, ma le proprietà di tipo areale possono solamente (ove ciò è possibile e sensato) essere riferite alla superficie ottenuta proiettando il poligono sul piano bidimensionale (spazio 2D).»[12]

La struttura del modello spaziale dei dati non prevede, a differenza di quanto abbiamo osservato a proposito delle specifiche ISO 19107 *Spatial Schema* e di quelle GML , un modello topologico indipendente da quello geometrico e le proprietà topologiche vengono registrate attraverso la definizione di una speciale classe di vincolo. Il tipo di approccio è simile a quello seguito nelle specifiche CityGML. Le motivazioni di questa scelta vengono espresse sulla base delle esigenze riscontrate nella gestione di questo tipo di informazione. Viene formalizzato un modello topologico sostanzialmente 2.5D in considerazione del fatto che gli operatori topologici a disposizione della maggior parte degli strumenti applicativi gestiscono solo la componente bidimensionale dello spazio geometrico.

La formalizzazione delle relazioni topologiche viene fatta nel documento *Inquadramento Generale ed Introduzione all'Uso* (1n1010_2). Queste relazioni vengono definite tramite gli strumenti di estensione propri del linguaggio UML in particolare lo *stereotype*: viene infatti creato un vincolo topologico (*vtopo*), cioè una particolare restrizione ad una classe che contiene tra gli attributi la formalizzazione della restrizione applicata. Viene ammessa la gestione delle proprietà topologiche delle rappresentazioni 3D solo per quanto riguarda le primitive $0-dimensionali$ e $1-dimensionali$ (punti e linee), mentre per quanto concerne le superfici $2-dimensionali$ le proprietà topologiche vengono computate solo proiettando la superficie sul piano cartografico di riferimento.

> «Negli strati non vengono definiti altri attributi oltre a quello geometrico; lo strato (topologico n.d.r.) è solamente un oggetto "di strutturazione" che definisce che le primitive geometriche di altri oggetti devono appartenere allo stesso complesso. Inoltre, se lo strato ha un vincolo CompostoDa oppure Partizionato, come spesso accade, le primitive che costituiscono lo strato devono esistere comunque come primitive di altri oggetti, quindi la definizione di uno strato non causa la creazione di alcuna primitiva aggiuntiva rispetto a quelle che costituiscono gli oggetti delle classi.»[13]

[12] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida all'uso. 1n1010 2*, Capitolo 4.4, p. 13.

[13] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida all'uso. 1n1010 2*, Capitolo 4.4 p. 70.

> «L'elaborazione spaziale non richiede più come prerequisito la predisposizione di una struttura topologica sull'insieme dei dati. La correttezza topologica, compresa la condivisione, devono esser realizzate di fatto nelle componenti spaziali degli oggetti, secondo quanto implicato dal modello concettuale GeoUML o dai vincoli dichiarati esplicitamente.
>
> Le strutture topologiche possono esser utilizzate per il supporto nel controllo e nell'aggiornamento, ma non sono più un prerequisito di fornitura.»[14]

Contenuto tematico L'organizzazione del contenuto tematico delle informazioni spaziali, definito nel *Il Catalogo degli Oggetti* (1n1007_1-2) prevede la sua articolazione in Strati, Temi e Classi. I primi due livelli definiscono un raggruppamento in insiemi omogenei funzionale alla descrizione del contenuto. Nello standard CityGML gli Strati e i Temi sono assimilati nel livello di definizione dei moduli. Le classi sono invece quelle che permettono la modellazione del dato, cioè sono gli strumenti del linguaggio UML utilizzati per formalizzare la struttura e le relazioni.

Nell'elenco degli strati sono associate i corrispettivi moduli tematici CityGML che si riferiscono alla stessa categoria di oggetti. Gli Strati sono così suddivisi:

1. INFORMAZIONI GEODETICHE, FOTOGRAMMETRICHE E DI METAINFORMAZIONE
2. VIABILITÀ, MOBILITÀ E TRASPORTI - *CityGML Transportation*
3. IMMOBILI ED ANTROPIZZAZIONI - *CityGML Building, CityGML CityFurniture*
4. GESTIONE VIABILITÀ E INDIRIZZI - *CityGML Core*
5. IDROGRAFIA - *CityGML WaterBodies*
6. OROGRAFIA - *CityGML Digital Terrain Model (DTM)*
7. VEGETAZIONE - *CityGML Vegetation*
8. RETI TECNOLOGICHE
9. LOCALITÀ SIGNIFICATIVE - implementata nel *CityGML CoreModule* per mezzo della classe *ImplicitGeometry.*
10. AMBITI AMMINISTRATIVI - *CityGML LandUse*
11. AREE DI PERTINENZA - *CityGML Building*

Immobili e antropizzazioni Questo strato viene utilizzato per descrivere:

> «... tutti quegli oggetti che derivano da attività antropica nel territorio e che non costituiscono infrastruttura di trasporto (descritte invece nello strato specifico).» [15]

[14] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida ai documenti. 1n1012*, Capitolo 2.4, p. 11.

[15] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 193.

Lo strato è suddiviso in temi caratterizzati da una omogeneità nella loro componente spaziale e semantica, ad ognuno dei quali sono associate le classi specifiche.

- Tema Edificato: comprende tutte le antropizzazioni di natura abitativa, di terziario o industriale che siano di una certa rilevanza per volumetria e destinazione d'uso prevalente. Le classi che fanno riferimento a questo tema sono:
  - Edificio
  - Cassone edilizio
  - Particolare architettonico
  - Elemento di copertura
  - Edificio minore
- Tema Manufatti: a differenza del tema Edificato esso comprende tutte le opere che non sono caratterizzate da un uso continuo.
  - Manufatto industriale
  - Manufatto monumentale e di arredo urbano
  - Gradinata
  - Attrezzatura sportiva
  - Manufatto d'infrastruttura di trasporto
  - Area attrezzata del suolo
- Opere per il trasporto
- Opere di difesa del suolo
- Opere idrauliche e di difesa e di regimentazione idraulica

La rappresentazione dell'informazione tridimensionale prevede la definizione di una serie di classi aggiuntive che, rappresentando una estensione dei temi dello strato, sono applicabili solo agli oggetti che hanno una componente 3D. In sintesi le classi 3D dei temi Edificato, Manufatti, Opere (trasporto, difesa del suolo, idrauliche e di regimentazione idraulica):

- Tema Edificato
  - Unità volumetrica
  - Particolare architettonico
  - Elemento di copertura
  - Edificio minore
- Tema Manufatti
  - Manufatto industriale
  - Manufatto monumentale e di arredo urbano
  - Gradinata

  - Attrezzatura sportiva
  - Manufatto d'infrastruttura di trasporto
  - Palo
  - Elemento divisorio
  - Muro o divisione in spessore

- Temi delle Opere (trasporto, difesa del suolo, idrauliche e di regimentazione idraulica)
  - Ponte/viadotto/cavalcavia
  - Muro di sostegno e ritenuta del terreno
  - Diga
  - Argine
  - Opera idraulica di regolazione
  - Opera idraulica di difesa delle coste
  - Attrezzatura per la navigazione

Considerazioni

Un approccio alla modellazione dei dati di tipo classificatorio è inevitabilmente rigido e alla lunga si rivela non più in grado di rappresentare correttamente il dato, il cui significato muta nel tempo. La struttura della classificazione a tre livelli (Strati, Temi e Classi) è più articolata e rigida rispetto alla struttura modulare a due livelli delle specifiche CityGML. La rappresentazione degli oggetti che derivano da un'attività antropica sul territorio descritta nel Tema Edificato del Catalogo degli Oggetti è più dettagliata di quella descritta nei moduli *Building* di CityGML. Il tema Manufatti ad esempio che consente di modellare tramite classi specifiche tutti gli elementi accessori come per esempio le pertinenze di un edificio che definiscono spazi aperti o chiuso quali corti interne, cavedi. Nelle specifiche CityGML questa tipologia di oggetti viene assimilata alla classe *BuildingPart* e qualificata tramite i valori degli attributi *class*, *function* e *usage*. Lo strato RETI TECNOLOGICHE invece non trova una sua corrispondenza nel modulo CityGML.

Un aspetto importante, enunciato nel documento programmatico IntesaGIS, è la necessità di acquisire i dati con lo stesso livello di dettaglio alle diverse scale di rappresentazione (Database Multiprecisione), obiettivo che va sicuramente nella direzione di una strutturazione logica dei vari moduli o Strati e delle classi a seconda del contenuto semantico del dato. L'approccio delle specifiche IntesaGIS è sicuramente conformante rispetto alla maggior parte degli standard geografici ISO e OGC. L'approccio alla gestione dell'informazione geometrica è quello delle rappresentazioni 2.5D.

11. Strumenti applicativi

L'analisi degli strumenti per la gestione dei dati, come abbiamo visto rappresenta uno dei diversi livelli di lettura del contenuto informativo. Questo contenuto viene formalizzato in schemi attraverso diversi passaggi di traduzione da un linguaggio all'altro fino alla memorizzazione sul supporto fisico. Il dato così registrato viene poi scambiato e gestito tramite i vari strumenti applicativi che permettono di codificare il contenuto delle informazioni che nel caso dei dati spaziali corrisponde alle due modalità principali con le quali viene codificata l'informazione geometrica: i supporti raster e quelli vettoriali. In questo capitolo verranno analizzati le principali differenze tra i sistemi applicativi CAD e GIS in relazione alla gestione delle informazioni spaziali relative al segmento comune di rappresentazione dei due sistemi e cioè l'insieme delle antropizzazioni che si sviluppano in ambito urbano, nell'ottica di un'integrazione tra i due sistemi.

Per riuscire a comprendere le relazioni che legano il contenuto informativo che i sistemi descrivono e il modo con cui noi ci rapportiamo ad esso è necessario però inquadrare lo sviluppo di questi sistemi nell'ambito della rivoluzione culturale che le tecnologie dell'informazione (ICT *Information and Communication Technologies*) hanno portato nella nostra società, al di là delle convergenze che si creano dall'incrocio di alcuni segmenti applicativi come è evidente per i CAD e i GIS nell'ambito della gestione delle informazioni relative ai dati urbani. La relazione che lega la possibilità di condividere e gestire un insieme sempre più vasto di informazioni e i meccanismi con cui noi ci rapportiamo ad esse sono stati oggetto di numerosi studi che hanno messo in luce proprio la caratteristica fondamentale della società dell'informazione in cui viviamo e cioè la continua mediazione del contenuto delle informazioni che vengono interrottamente elaborate e trasformate in un processo continuo di arricchimento dei significati. Questo processo, che in realtà caratterizza l'attività dell'uomo fin dai suoi primi passi, nella società di oggi pervasa dal contenuto informativo è stato enormemente accelerato proprio dalle possibilità che la tecnologia offre. Questo processo ha permesso da una parte un maggiore accesso alle informazioni che, grazie a questi strumenti, sono alla portata di chiunque voglia analizzarle e modificarle, dall'altra grazie agli sviluppi del web esse sono diventate ormai un patrimonio globale. È quindi inevitabile che queste possibilità offerte dallo sviluppo tecnologico hanno contribuito a modificare il nostro approccio al contenuto delle informazioni e quindi alla rappresentazione stessa della realtà [9].

11.1. CAD e BIM

I sistemi applicativi CAD (*Computer Aided Design*) hanno iniziato ad rivoluzionare il mondo dell'informatica e dell'ingegneria e successivamente di tutte le altre discipline come l'architettura e il design a partire dai primi anni '60 negli Stati Uniti quando si affacciarono i primi dispositivi *hardware* e *software* in grado di automatizzare e digitalizzare le informazioni spaziali e il loro processo di creazione e trasformazione. Uno dei

primi sistemi di digitalizzazione fu *Sketchpad*, considerato il precursore di tutti i sistemi successivi, sviluppato da Ivan Sutherland nel corso del suo dottorato al MIT [86]. I due decenni successivi alla prima comparsa dei sistemi di digitalizzazione automatica videro le ricerche concentrarsi sullo sviluppo dei linguaggi di definizione dei dati (DDL), mentre la diffusione dei sistemi hardware e software nell'ambito dell'ingegneria e delle costruzioni rimase limitato fino ai primi anni '80, soprattutto a causa delle limitazioni imposte dai sistemi hardware. A partire da questi anni si assistette ad un rapido sviluppo dei sistemi hardware, in particolare delle capacità di calcolo e di memoria. La crescita lineare di queste capacità, ben espressa dalla nota Legge di Moore, ha portato nei decenni successivi la rivoluzione rappresentata dai sistemi applicativi CAD alla diffusione che vediamo oggi [3]. A partire dagli ultimi anni del secolo scorso i sistemi CAD sono stati oggetto di una rapida diffusione soprattutto nel segmento della progettazione architettonica, ingegneristica e nelle costruzioni (AEC *Architecture*, *Engineering*, *Construction*), parallelamente a quanto è successo per quanto riguarda i sistemi GIS nell'ambito della gestione dei dati spaziali in ambito cartografico. I primi decenni del nuovo millennio hanno visto il raggiungimento dei limiti fisici nella possibilità di integrare più circuiti e quindi aumentare le capacità di calcolo e di memoria sul supporto siliceo che costituisce la base per i microchip. Per superare questo limite sono stati sviluppati i sistemi multiprocessore. Le prospettive della ricerca, essendo fortemente condizionate nelle prime fasi di sviluppo dai rapidissimi sviluppo tecnologici, sono state maggiormente concentrate sui sistemi di visualizzazione e gestione del dato geometrico, mentre si stanno concentrando maggiormente sugli aspetti di contenuto, cioè sulla semantica del dato. Nella seconda metà degli anni '90 si è iniziata a sentire l'esigenza di sistemi in grado di gestire le informazioni spaziali e quelle tematiche in modo integrato. Nello stesso tempo si è manifestata la necessità, al fine di ridurre i costi, di sviluppare l'interoperabilità tra i vari sistemi che gestiscono le differenti fasi del ciclo di vita di un manufatto. Queste esigenze hanno portato nei primi anni del nuovo millennio alla nascita del paradigma BIM (*Building Information Modeling*), la definizione di standard e formati interoperabili (COLLADA, VRML, STEP, IFC) e la nascita dei primi sistemi software in grado di gestire la semantica del dato.

I cambiamento nell'approccio alla gestione di questo tipo di dati, derivanti dallo sviluppo tecnologico degli strumenti per la gestione, sono analoghi a quelli che abbiamo visto per quanto riguarda la gestione dei dati geografici e fanno parte di quella trasformazione della società di cui le ICT (*Information and Communication Technologies*) sono il motore. Nell'approccio del BIM la gestione dei dati relativi al progetto architettonico è vista come un processo continuo di arricchimento di significati nel quale è importante che ci sia un integrazione tra i vari settori coinvolti soprattutto per quanto riguarda l'adozione di schemi condivisi per qualificare il contenuto delle informazioni. Quest'esigenza, che come abbiamo visto si è manifestata per prima nell'ambito delle tecnologie per lo scambio delle informazioni in rete, ha influenzato anche il contenuto delle informazioni che sono gestite e scambiate tramite i sistemi CAD e GIS. Nei sistemi CAD le informazioni che riguardano il ciclo di vita di un edificio (*lifecycle*), dalla sua progettazione attraverso realizzazione e fino alla gestione delle trasformazioni che esso attraversa nel corso del tempo e la sempre maggiore integrazione degli apparati tecnologici nella struttura dell'edificato urbano necessitano di una maggiore integrazione degli strumenti per gestire tutte le componenti che concorrono al funzionamento degli edifici [105]. Le esigenze principali che emergono sono una gestione integrata del-

le relazioni tra le informazioni spaziali e non, la rappresentazione di oggetti complessi organizzati tramite relazioni gerarchiche, spaziali e topologiche, l'interoperabilità[1] e la visualizzazione personalizzata di aspetti significativi (*Multiview modeling*) [93].

L'approccio alla progettazione architettonica e civile del BIM rappresenta uno degli sforzi più interessanti sul versante dei sistemi CAD per l'integrazione dei diversi approcci applicativi alla rappresentazione dei dati spaziali. Abbiamo visto come l'approccio alla modellazione dei dati geografici, che è strettamente correlato con la fonte stessa dei dati cioè il rilievo, abbia un approccio alla rappresentazione degli oggetti geometrici intesi essenzialmente come contenitori vuoti. Da questo punto di vista i sistemi CAD rappresentano tutto il bagaglio di conoscenze che il mondo della progettazione architettonica e civile può portare in termini di allargamento delle prospettive di approccio ai dati geografici. Il BIM può rappresentare uno dei mezzi per realizzare quest'integrazione. Lo scopo del BIM è quello di integrare tutti i processi che sono portatori di informazione in uno schema comune e multivalente nell'ottica di massimizzare l'efficienza riducendo le perdite di valore semantico che occorrono in ogni passaggio delle informazioni da un processo all'altro. La progettazione parametrica, che viene comunemente identificata come *little bim* (bim), è solo uno degli aspetti applicativi del *big bim* (BIM) che invece si pone come scopo quello di portare l'informazione giusta al posto giusto e nel momento giusto [46]. Gli aspetti più significativi di questo paradigma in relazione all'integrazione dei modelli architettonici nel database spaziale sono: la multivalenza del modello considerato come insieme di strati informativi diversi integrati tra loro, gli aspetti topologici connessi con la progettazione parametrica e l'approccio alla modellazione ad oggetti. Attualmente il problema dell'integrazione tra i due sistemi è ancora oggetto di studi e ricerche sia dal punto di vista della strutturazione semantica dei dati nei sistemi CAD che dello sviluppo della gestione del dato 3D da parte degli strumenti GIS. Sono stati effettuati studi sull'integrazione dal punto di vista dell'integrazione del contenuto semantico tra i sistemi GIS e CAD (BIM) in particolare verso le classi definite dallo standard IFC (*Industry Foundation Classes*) [104].

Gli strumenti applicativi CAD diffusi sul mercato sono dotati degli strumenti per il disegno automatico che permettono di modellare la maggior parte delle rappresentazioni 3D che abbiamo analizzato. Essi permettono di rappresentare il contenuto geometrico di superfici complesse dal punto di vista della loro formalizzazione matematica, ma non permettono di effettuare analisi spaziali elaborate sullo stesso contenuto. Queste capacità non comprendono nella maggior parte dei casi la possibilità di mettere in relazione le diverse componenti del contenuto geometrico. L'approccio dei sistemi CAD è orientato essenzialmente alla rappresentazione del dato geometrico e non prevede una strutturazione formale e logica articolata del contenuto del dato. I sistemi CAD permettono la gestione del dato geometrico solo nell'ambito dello spazio $\mathbb{R}^3$ nel sistema di riferimento cartesiano e con alcune limitazioni. Essi non permettono di gestire le trasformazioni del contenuto geometrico dai sistemi di riferimento cartografici a quelli elissoidici, trasformazioni che sono calcolate localmente per mezzo degli strumenti del calcolo infinitesimale e sono invece una delle caratteristiche principali dei GIS. La stessa gestione delle coordinate cartesiane della cartografia è difficile da parte dei sistemi CAD a partire dalle scale di rappresentazioni architettoniche più piccole[2].

[1] Nell'ambito dei sistemi applicativi il termine interoperabilità significa garantire un efficace passaggio delle informazioni attraverso i diversi stadi di vita del ciclo di vita dell'oggetto.

[2] Nell'elaborazione dei dati del caso studio è stato ad esempio possibile gestire il modello con i sistemi

Nei sistemi CAD generalmente il dato tematico è gestito nelle stesse tabelle dove sono contenuti gli altri attributi degli oggetti che solitamente definiscono alcune proprietà che nel modello spaziale sono associate alla primitiva geometrica di riferimento (lunghezza per la linea, area per le superfici o volume per i solidi). Questo meccanismo di gestione dell'informazione tematica è alla base dell'implementazione permette alcune semplici tematizzazioni del dato geometrico come per esempio restituire l'informazione radiometrica. Questa funzionalità è ampiamente utilizzata dai software per la gestione delle nuvole di punti permettendo di colorare ogni singolo punto con un valore corrispondente ad un codice RGB[3]. La maggior parte dei *softwares* CAD prevedono inoltre la possibilità di associare altre informazioni che contribuiscono a organizzare il dato geometrico per mezzo di contenitori, chiamati anche livelli o *layer*, oppure di nominare le entità geometrica ed eventualmente di raggrupparle in un unico oggetto complesso. Queste funzionalità basilari, schematizzate, corrispondono a quelle che sono le caratteristiche dei softwares CAD più diffusi e permettono una modellazione dei dati tematici molto elementare e priva di una struttura logica articolata. La generale associazione diretta tra l'informazione spaziale e quella tematica inoltre non permette una modellazione delle caratteristiche degli oggetti spaziali che sono il frutto di una complessa ed articolata rappresentazione concettuale come i tematismi antropici della cartografia. Queste informazioni infatti sono solitamente modellate tramite un approccio discreto che prevede la creazione di un insieme di classi di dati che costituiscono la rappresentazione concettuale dello schema con cui siamo soliti qualificare le relazioni tra questi oggetti. Relazioni che appunto non sono direttamente dipendenti dalla componente spaziale, ma sono appunto il frutto di un processo di astrazione tipicamente umano. I GIS sono un sistema molto più sofisticato per quanto riguarda la restituzione del valore tematico dell'informazione tematica che è sempre registrata in tabelle diverse. Questa struttura formale più semplice non permette quindi nella maggior parte dei casi di associare al contenuto geometrico un'informazione tematica altrettanto articolata e complessa. Il BIM precedentemente citato è invece uno degli esempio di sistemi CAD che integrano la componente tematica in modo articolato.

11.2. GIS

I GIS *(Geographic Information Sistems)*, in questa veste considerati essenzialmente come strumento per la gestione dei dati spaziali, hanno per molti aspetti seguito uno sviluppo simile a quello dei sistemi CAD essendo anch'essi inevitabilmente condizionati dal rapido sviluppo delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT). Nati anch'essi negli anni '60 in ambito anglosassone essenzialmente come strumento avanzato per la cartografia automatica e digitale hanno iniziato ad estendere i loro ambiti di applicazione a partire dagli anni '80, quando parallelamente allo sviluppo dei DBMS

CAD utilizzando le coordinate cartografiche solo fino alla scala 1:2000 - 1:1000 (LOD1). Per le scale successive è stato necessario rototraslare rigidamente il modello in un sistema di riferimento locale.

[3]Questo meccanismo è di facile implementazione con i *laser-scanner* che montano una fotocamera integrata di cui sono i parametri di orientamento interno rispetto al sistema di riferimento dello strumento. Per mezzo della registrazione dei due sistemi di riferimento (camera e strumento) e del meccanismo di implementazione descritto è possibile quindi associare automaticamente l'informazione geometrica e quella radiometrica.

le funzionalità di gestione del dato cartografico da parte dei sistemi automatici digitali venne combinata con le funzionalità dei database. Il modello relazionale sviluppato da Codd nel 1970 prima applicato alla gestione dei dati alfanumerici grazie ai rapidi progressi tecnologici è stato efficacemente applicato anche ai dati spaziali determinando la nascita dei moderni GIS ovvero database spaziali. Gli anni '80 infatti videro la nascita di numerosi sistemi software e la loro diffusione sempre maggiore nell'ambito della cartografia. Negli anni successivi furono implementate notevolmente le funzioni di indicizzazione e analisi spaziale fino a giungere allo sviluppo e alla diffusione dei sistemi distribuiti (WebGIS e MobileGIS).

Sul versante dei DBMS a partire dalle elaborazioni di Codd un importante contributo è rappresentato dalle ricerche nel campo della modellazione ad oggetti che a partire dalle prime applicazioni nell'ambito della programmazione software ha iniziato a diffondersi anche nell'ambito della gestione dei dati DBMS. Attualmente sono pochi i GIS che utilizzano un modello dei dati ad oggetti (OODBMS), anche se recentemente molti sistemi che utilizzano il modello relazionale hanno implementato funzioni *object-oriented*. Uno dei pochi GIS basato su un approccio ad oggetti è SPRING, un software *freeware* sviluppato dal National Institute for Space Research, organismo statale di ricerca brasiliano. Tra gli ORDMS invece si annoverano il software *open-source* PostgreSQL (con la sua estensione PostGIS) e il software Oracle Database (con il modulo Oracle Spatial) solo per citarne alcuni.

La differenza fondamentale tra i sistemi CAD e GIS, come abbiamo visto, è nella struttura logica dei dati e negli strumenti di analisi che possibile applicare a questa struttura. Essa, che sottintende a tutte le applicazioni informatiche alla gestione e trattamento delle informazioni, è presente anche nei sistemi CAD, ma è caratterizzata da un uno schema molto più elementare delle relazioni tra gli elementi. La possibilità di gestire la struttura dei dati anche dal punto di vista della loro formalizzazione logica e non solo della loro rappresentazione nello spazio è la caratteristica principale dei DBMS che segna la differenza fondamentale tra i sistemi CAD e GIS.

Nel vasto panorama delle applicazioni GIS le funzionalità di analisi spaziale sono limitate alle rappresentazioni 2D o 2.5D. Essi supportano diverse funzionalità di analisi spaziale che riguardano la componente della rappresentazione 2D del dato geografico. Queste analisi cioè sono effettuate nella maggioranza dei casi solo sulle tabelle che contengono le coordinate $< x, y >$ ma non sulla tabella delle z ovvero su tutti e tre i valori della tripla $< x, y, z >$. Sono possibili limitate operazioni algebriche come per esempio la restituzione di una distanza nello spazio $\mathbb{R}^3$, ma non formulazioni analitiche come per esempio una rappresentazione 3D ottenuta per messo della triangolazione di Delaunay, operazioni di indicizzazioni spaziali su oggetti non strutturati come le nuvole di punti o il *buffering* nello spazio $\mathbb{R}^3$.

Le rappresentazioni 2.5D possono essere utilizzate per descrivere l'andamento altimetrico della superficie terrestre e degli altri altri elementi che hanno una configurazione spaziale simile, ma non la maggior parte dei tematismi cartografici urbani. Oggetti come le infrastrutture dei trasporti, la rete idrica e soprattutto il tema edificato non possono essere descritti in modo completo per mezzo di rappresentazioni 2.5D essendo caratterizzati ad esempio da superfici verticali, aggetti e intersezioni sul piano XY. Queste tipologie di analisi sono funzionali alla scala territoriale, mentre passando ad una scala più grande mostrano dei limiti nella gestione dell'informazione spaziale. Le capacità di gestione delle rappresentazioni 3D di solito sono ridotte all'importazione e

la visualizzazione del contenuto geometrico e operazione di analisi elementari come il calcolo di volumi [106], cioè le funzionalità tipiche dei sistemi CAD. Modelli geometrici che non possono essere modellati e gestiti dai sistemi GIS, vengono solitamente elaborati con i sistemi CAD e importati in ambiente GIS per la visualizzazione del dato [82]. Uno dei sistemi utilizzati per gestire queste rappresentazioni 3D, utilizzato nel linguaggio KML (*Keyhole Markup Language*) [59], molto utilizzato nelle applicazioni web e mobile, è quello di gestire i modelli come riferimenti esterni in un sistema di riferimento locale che viene rototraslato in quello cartografico solo nel momento della visualizzazione. Questo meccanismo è simile a quello implementato nello standard CityGML per la gestione di oggetti geometrici che si ripetono uguali a se stessi molte volte nello stesso *dataset* come per esempio gli elementi dell'arredo urbano o della vegetazione.

Le operazioni di analisi spaziale più complesse sulle rappresentazioni 3D, al momento, sono possibili solo ricorrendo agli strumenti applicativi dei Geodatabase. Questi sono degli strumenti applicativi dei DBMS che permettono la gestione e l'analisi dei dati spaziali. Il termine definisce in senso più generale tutti i DBMS che hanno un supporto per la gestione dei dati spaziali, i sistemi GIS sono invece comunemente associati a quelle applicazioni che sono specificatamente orientate alla gestione di questo tipo di dati e quindi sono basati su un'interfaccia grafica. Uno dei Geodatabase che permette di effettuare analisi sulle rappresentazioni 3D è Oracle Database della Oracle Corporation. Questa azienda è stata una delle prime *softwarehouse* ad applicare il modello relazionale di Codd ai DBMS ed è tutt'ora una delle principali produttrici di sistemi applicativi per la gestione di grosse banche di dati[4]. La gestione delle rappresentazioni tridimensionali viene quindi realizzata per mezzo dell'integrazione delle funzionalità di visualizzazione del dato da parte dei sistemi CAD e GIS con la gestione dell'informazione geometrica nei Geodatabase (Oracle) [71]. Il divario tra le funzionalità dei GIS e dei sistemi CAD è lo specchio del *gap* che intercorre tra i rispettivi ambiti applicativi. L'obiettivo di avvicinare questi due mondi è il terreno su cui si misura la ricerca di un sistema per una gestione integrata dei dati spaziali relativi ai beni architettonici ed è uno degli scopi del presente studio.

[4] "*Large Shared Data Banks*" secondo la definizione di Codd [23]

12. Applicazioni

12.1. Gestione dei dati metrici in ambito urbano

Questi esempi riguardano l'applicazione degli strumenti applicativi dei GIS ad una base di dati strutturata secondo lo standard CityGML. I modelli sono stati sviluppati a partire dalla base cartografica urbana e integrati con il rilievo altimetrica per la creazione di un database cartografico urbano 3D. La caratteristica importante di questi progetti è che sono finalizzati a sperimentare le applicazioni dei GIS su una base di dati strutturata dal punto di vista geometrico e semantico e quindi alle possibilità dell'integrazione della tecnologia XML, alla base dello standard CityGML, con gli strumenti applicativi GIS. Uno dei vantaggi nell'utilizzo di questa tecnologia da parte dei soggetti coinvolti nell'acquisizione e gestione delle informazioni relative ai fenomeni urbani è di poter implementare questi dati molto più facilmente nei database cartografici urbani garantendo una coerenza semantica tra il modello CityGML e l'implementazione nei Geodatabase.

Noise Immission Simulation ADE (Application Domain Extension)

Questa integrazione del modello CityGML è parte integrante delle specifiche a partire dalla versione v.1.0.0 OGC 08-007r1 [61] (analizzata nella presente ricerca e utilizzata per l'implementazione del modello). L'obiettivo della ricerca, i cui risultati hanno permesso l'estensione delle specifiche, è stato quello di riuscire a modellare e rappresentare gli effetti del rumore nell'ambito urbano sulla base di dati raccolti e implementati in un dataset CityGML. Il progetto è stato condotto sulla base di una direttiva europea che obbliga gli stati membri a calcolare ogni 5 anni il livello di rumore a 4 metri di altezza al di sopra degli edifici e di documentarne i risultati per mezzo di mappe[1]. La produzione di queste mappe è solitamente effettuata sulla base di modelli acustici e non sulle misure. La possibilità di utilizzare i dati raccolti per calcolare gli effetti del rumore e rappresentare e gestire i dati nei DBMS rappresenta quindi un aspetto interessanti nell'ambito delle applicazioni del modello CityGML. I dati utilizzati per il progetto sono stati raccolti in una zona della Germania densamente urbanizzata, già analizzata nella fase di sviluppo e implementazione delle specifiche, la Renania Settentrionale-Vestfalia. È stata utilizzata l'infrastruttura dei dati dell'iniziativa *Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia* (GDI NRW).

Rotterdam 3D Open Data

È un progetto dell'amministrazione comunale che ha previsto la realizzazione di una cartografia 3D della città di Rotterdam (NL)[2]. Nato da esigenze interne, all'ammi-

[1] European Union *Environmental Noise Directive 2002/49/EG*

[2] Le informazioni relative a questo progetto provengono dall'intervento di L. Smit, dirigente del Dipartimento per i Servizi Informativi Geografici: Rotterdam 3D and Open Data nell'ambito

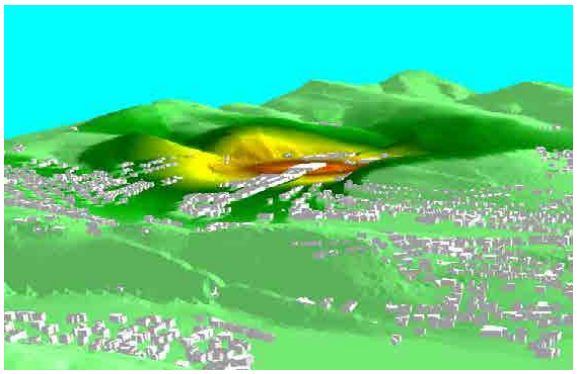


Figura 12.1.: esempio di modellazione del rumore sulla base di dati CityGML - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.1, p.44.

nistrazione legate alla gestione dei progetti urbani e alla necessità di uniformare e completare i modelli parziali sviluppati per singoli progetti urbanistici. La sua finalità principale è stata di fornire ai professionisti che operano nel settore (progettisti, tecnici e analisti) una base di dati uniforme sia dal punti di vista del contenuto geometrico che di quello semantico da utilizzare per l'elaborazione di singoli progetti. Nello stesso tempo l'adozione di questo standard permette da parte delle amministrazioni una notevole semplificazione dei problemi di strutturazione delle informazioni eterogenee che provengono dai diversi segmenti della progettazione urbana. Le sue principali caratteristiche sono:

- completezza: tutta la città è stata rappresentata;
- uniformità: tutti gli edifici sono stati rappresentati secondo gli stessi criteri (CityGML LOD2);
- diffusione: tutti i dati grezzi sono resi pubblici[3];
- multivalenza: gli edifici storici sono stati rappresentati con *texture* ad alta risoluzione;
- gestione del dato 3D: il modello è stato sviluppato con una piattaforma GIS che consente solo la visualizzazione dell'informazione 3D.

dell'*Urban Data Management Symposium* tenutosi a Delft 18-30 Settembre 2011.

[3]http://www.rotterdam.nl/rotterdam_3dopen

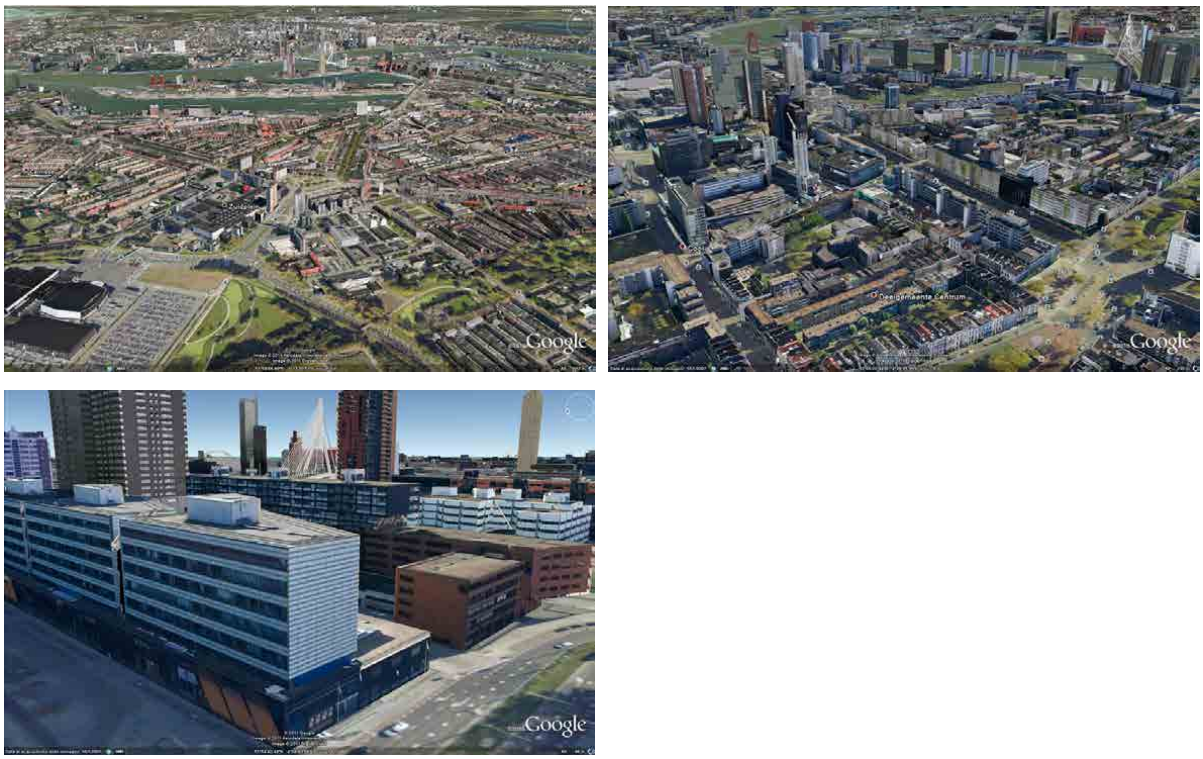


Figura 12.2.: Visualizzazione del modello tramite GoogleEarth.

Berlin 3D city model

È un progetto gestito dal Berlin Senate of Economy (che corrisponde alla giunta comunale, anche se in realtà Berlino è uno stato autonomo). La scelta di non affidare la gestione al Catasto come in altre realtà della zona è stata dettata dall'esigenza di mettere in stretta relazione questi sistemi con lo sviluppo urbano e il settore edilizio. La base di dati è stata implementata in un database Oracle. Alcuni dati[4]:

- estensione: 890kmq
- 50000 edifici in LOD1
- 48000 in LOD2 modello generato automaticamente da rilievo LiDAR aereo interpolato con planimetria catastale.
- *Texture* estratte da immagini aeree inclinate.
- Informazioni semantiche estratte dal catasto.
- 80 punti di interesse in LOD3 modellati manualmente.
- 4 punti di interesse in LOD4 (*Bundestag*, *Central Station*) modellati manualmente.

[4]Le informazioni relative a questo progetto provengono dall'intervento del Prof. Kolbe al seminario "3D-Pilot Course 100% CityGML" accessibile tramite il portale della TU Delft. http://collegerama.tudelft.nl

Le applicazioni diversi aspetti della modellazione dei fenomeni urbani tra cui lo studio di fattibilità per l'installazione di pannelli solari e fotovoltaici sui tetti (Amburgo); il risanamento energetico degli edifici (Berlino). Le informazioni utilizzate per la modellazione provengono dai dati implementati secondo lo standard e possono considerarsi rappresentazione indicativa di questi fenomeni su cui effettuare analisi più approfondite tramite sistemi specifici, "non una reale stima, ma degli indicatori".

GIANT 3D

GIANT3D (*Geographic Interoperable Advanced Numerical Topological 3 Dimensional*) [77] è una ricerca del laboratorio GIS (GISLab) dell'Università di Palermo sotto la direzione di Andrea Scianna. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito del progetto PRIN 04, "Strutture evolute della cartografia numerica per i GIS e l'ambiente WEB", coordinatore nazionale prof. R. Galetto, coordinatore locale prof. B. Villa. Gli obiettivi del PRIN sono la definizione di un sistema di modellazione delle *feature* urbane interoperabile e multiscala per la gestione e la pianificazione delle emergenze tramite un'applicazione WEB GIS. Lo sviluppo dell'applicazione è partito dalle analisi delle rappresentazioni cartografiche attraverso le formalizzazioni degli standard IntesaGIS e CityGML per cercare di evidenziare quali fossero le caratteristiche dei due modelli da sviluppare sia dal punto di vista della strutturazione delle informazioni tematiche che di quelle geometrico-topologiche.

Il modello concettuale integra e modifica parzialmente quello CityGML. Il livello di definizione semantica del dato dello standard OGC viene integrato con la strutturazione più articolata delle specifiche IntesaGIS per permettere di elaborare uno strumento che permetta di rappresentare e modellare le esigenze applicative del progetto. Il contenuto geometrico dei dati elaborati dai sistemi CAD viene strutturato topologicamente utilizzando le classi del modello GML e integrato in un modello geometrico-topologico. Il modello spaziale è quindi di tipo integrato come in quello delle specifiche CityGML e IntesaGIS. La realizzazione dello strumento applicativo per permettere questa integrazione è stata lo sviluppo di un *plug-in* per il s*oftware* Autodesk AutoCAD.

12.2. Gestione della documentazione metrica dei beni culturali

Nell'ambito internazionale le applicazioni della tecnologia GIS alla gestione delle risorse culturali annoverano numerosi esempi applicativi. Solo per citarne alcuni ricordiamo l'esempio olandese del National Archaelogical Inventory e quello inglese del National Heritage Information System nell'ambito della gestione dei siti archeologici. L'Archivio Nazionale Francese offre invece un esempio dell'applicazione del GIS per la gestione di un archivio nazionale dei beni culturali. La scelta degli esempi applicativi è stata orientata alla possibilità di avere una casistica di applicazioni dei sistemi GIS nei restauri di manufatti architettonici facilmente confrontabili tra loro e contestualizzabili nel territorio che ha portato a restringere la ricerca agli esempi nazionali. La dimensione della scala di rappresentazione utilizzata nel progetto di restauro architettonico ha portato a selezionare i casi in cui i sistemi GIS sono stati progettati specificatamente per

quella scala oppure sistemi a scala territoriale adattati ad una scala più grande, dove cioè il GIS a scala architettonica costituisce un sottoinsieme di uno più vasto a scala territoriale. Infine la scelta di casi studio che siano sviluppati da enti di ricerca di rilevanza nazionale e internazionale e sotto la direzione delle istituzioni nazionali preposte alla tutela e conservazione consente di orientare la ricerca al contesto applicativo del restauro. Gli studi selezionati secondo questi criteri si collocano tutti nell'ambito delle applicazione GIS 2D, nelle quali l'informazione tridimensionale è riferita ad un sistema di riferimento cartesiano locale e scomposta secondo piani di proiezione ortogonali.

ICR (Istituto Centrale per il Restauro) - Carta del Rischio

Questo progetto dell'Istituto Centrale per la Conservazione ed il Restauro, organo tecnico del MiBAC (Ministero per i Beni e le Attività Culturali), specializzato nella ricerca, formazione e sperimentazione nel campo del restauro e della conservazione del patrimonio culturale. La Carta del Rischio è un sistema informativo costituito da un insieme di banche dati relative al patrimonio architettonico, archeologico e storico artistico per la valutazione della vulnerabilità dello stesso in relazioni ai fenomeni naturali e antropici. Diversamente dagli esempi di applicazione dei GIS qui citati la scala di riferimento è quella medio-piccola costituita dalla cartografia nazionale e regionale. La sua applicazione va nella direzione di fornire gli strumenti per la valutazione dei rischi che insistono sul patrimonio culturale a causa di agenti naturali e della pressione antropica nell'ambito della pianificazione territoriale. L'insieme dei beni costituenti il patrimonio culturale costituito dalle unità elementari dei beni architettonici ed archeologici comprendenti gli eventuali beni mobili presenti sono stati raggruppati a livello comunale e messi in relazione con la cartografia tecnica nazionale e regionale. La valutazione statistica dei Fattori di Rischio è effettuata sulla base delle caratteristiche di Vulnerabilità del singolo bene e quelle della Pericolosità dell'area territoriale. Il fattore della Vulnerabilità attiene alle caratteristiche del singolo bene, suddivise nei domini Ambientale-Aria, Statico-Strutturale e Antropico, mentre quello della Pericolosità invece fa riferimento agli stessi domini riferiti però alle caratteristiche dell'area territoriale analizzata. Il sistema è stato realizzato come WebGIS accessibile tramite i comuni *browser*.

CNR - Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali

L'applicazione da parte dell'ITABC - CNR dei sistemi informativi al restauro è partita dal progetto e dallo sviluppo di un sistema informativo specifico per le esigenze del restauro che ha compreso anche l'elaborazione di un software specifico chiamato Arkis (*Architecture Recovery Knowledge Information System*) [75][76]. Esso, nella sua versione web sviluppata successivamente è stato sperimentato nell'ambito di una collaborazione tra l'ITABC e la Regione Autonoma della Valle d'Aosta per lo studio del Teatro Romano di Aosta. Ulteriori sperimentazioni sono state effettuate a Roma su un campione di edifici medievali e nella Chiesa del Purgatorio di Terracina (LT). Il software è stato sviluppato a partire dal linguaggio di programmazione della ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) e utilizza lo stesso motore grafico di ArcView software della stessa ESRI. La caratteristica principale di questo sistema informativo è che porta le funzioni di analisi dei GIS nelle tipiche scale e modalità di rappresentazione dell'edificio. Le possibilità applicative che sono state sperimentate comprendono le

operazioni più comuni di *overlay* (attivazione dei tematismi specifici); interrogazione degli attributi dei tematismi, degli elementi della rappresentazione grafica e di specifici record attivando contemporaneamente il relativo elemento grafico; compiere operazioni di calcolo di aree, perimetri e percentuali di zone specifiche come per esempio quelle interessate dal degrado richiamando le relative immagini o rilievi geometrici. L'applicazione nel Teatro di Aosta è frutto di un'analisi approfondita e dettagliata su un monumento e di conseguenza come entità di riferimento nell'organizzazione dei dati è stato scelto il singolo elemento costruttivo.

Scuola Normale Superiore di Pisa - Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali

Il contesto in cui è nato questo progetto è quello delle ricerche condotte dal Comitato Internazionale per la Salvaguardia della Torre di Pisa per il restauro delle superfici lapidee della Torre con il coordinamento dell'Istituto Centrale per il Restauro. La ricerca, condotta con il coordinamento dal Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali, ha compreso il progetto di un sistema GIS *client/server* per gestione dei dati relativi al processo di conservazione, le indagini diagnostiche e la conduzione dell'intervento di restauro. Il sistema, denominato Akira GIS Server è stato sviluppato dalla Sistemi Informativi S.r.l. - Liberologico [17]. Questo sistema è basato su un modello dei dati di tipo *object-oriented* e le funzionalità sviluppate nel sistema informativo riguardano: rappresentazione dei vari elementi architettonici nelle scale appropriate e secondo le tipiche modalità di rappresentazione ortogonali; rappresentazione di materiali e alterazioni; dati tecnici; rappresentazione della cronologia degli interventi; monitoraggio dello stato di conservazione; elaborazione dei dati geometrici e tematici. L'organizzazione dei dati segue lo schema delle classi di tipologie architettoniche che partendo dagli 8 ordini sovrapposti passando per i paramenti esterni ed interni, i piani di calpestio, le scale giunge agli elementi architettonici di dettaglio come l'arco, il concio, il capitello e la modanatura. Insieme alla tipologia per ogni elemento architettonico è stata effettuata una mappatura dei litotipi e dei degradi. Accanto alle funzionalità di analisi riguardanti l'elaborazione di statistiche su degradi e materiali vi è la consultazione delle informazioni georeferenziate riguardanti analisi, documenti, studi scientifici e contributi multimediali. L'accesso e la modifica dei dati è possibile da postazioni di lavoro diverse collegate tramite rete locale o internet.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali - Scuola Normale di Pisa: ARTPAST

Il progetto ARTPAST (Applicazione informatica in rete per la tutela del patrimonio nelle aree sotto utilizzate), coordinato dal MiBAC con il supporto scientifico della Scuola Normale di Pisa e approvato nel 2003 dal Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) ha come obiettivi quello di trasferire su supporto elettronico la documentazione cartacea relativa al catalogo dei beni mobili, la realizzazione di un sistema informativo per gli Uffici di Esportazione e la realizzazione sperimentale di database elettronici delle opere d'arte con i relativi interventi di restauro. Quest'ultimi dovrebbero costituire in futuro la base per la realizzazione di portali turistico-culturali. La scelta dei sistemi informativi è ricaduta su SICaR w/b, un WebGIS studiato per la progettazione esecutiva e la gestione degli interventi di

restauro che è nato nell'ambito di OPTOCANTIERI, progetto della Regione Toscana per il trasferimento alle PMI di tecnologie informatiche e optoelettroniche finalizzate alla diagnostica, la documentazione e il restauro dei beni culturali. SICaR w/b, sviluppato da Sistemi informativi S.r.l. - Liberologico, si basa sull'esperienza di Akira GIS Server, ma, a differenza del suo precedessore, è basato su un modello formale dei dati di tipo relazionale, utilizza un'interfaccia web per l'accesso e la modifica dei dati ed è basato interamente su linguaggi open source per quanto riguarda le librerie grafiche, lo sviluppo del DBMS (Data Base Management System) e l'architettura del web server [7][6].

Parte IV.

IMPLEMENTAZIONE DEL DATABASE SPAZIALE 3D

13. Caratteristiche del caso studio

13.1. Introduzione storica

Il Castello del Valentino è una fabbrica moderna del XVII secolo situata nel tessuto urbano di Torino e facente parte dell'insieme delle Residenze Sabaude, già patrimonio UNESCO a partire dal 1997. Il complesso nato per iniziativa della reggente Maria Cristina di Francia su progetto di Carlo e Amedeo di Castellamonte, architetti di corte, riflette il gusto del committente nell'articolazione dei volumi e nelle scelte decorative e tipologiche. Il complesso è ascrivibile al tipo delle residenze fluviali delle quali faceva parte anche il Regio Parco, oggi perduto. Edificato sulle sponde occidentali del fiume Po, a sud-est dell'insediamento romano di Augusta Taurinorum, sorge su un sito abitato fin dall'epoca romana.

Le prime notizie relative alla costruzione di un palazzo nell'area su cui sorge oggi il Castello del Valentino risalgono alla seconda metà del 1500, quando durante l'occupazione francese i terreni vengono acquistati da un funzionario del Re di Francia Renato Birago inviato a Torino come Presidente del Parlamento nel 1543. Poco dopo il suo arrivo egli acquista i terreni e vi costruisce un palazzo con giardini, mantenendo la proprietà fino al 1560. Dopo la vittoria di San Quintino e il successivo trattato di Cateau-Cambrésis il Duca Emanuele Filiberto di Savoia rientra in possesso del Piemonte e inizia una politica di acquisizioni territoriali che coinvolge anche i possedimenti del Valentino, acquistati ufficialmente nel 1577 forse su consiglio di Andrea Palladio che al Duca aveva dedicato il suo Terzo Libro dell'Architettura nella speranza probabilmente di ricevere qualche incarico.

Dopo diversi passaggi di proprietà tra la nobiltà vicina alla corte il palazzo rientra in possesso dei Savoia per mano di Carlo Emanuele I che ne avvia i primi progetti di ampliamento e ristrutturazione in contemporanea con le trasformazioni che riguardano la capitale come la costruzione del "palazzo novo grande". In questi anni il palazzo diventa residenza della Duchessa Caterina d'Asburgo. La configurazione del palazzo tra la fine del 1500 e i primi anni del 1600 era articolata tramite una manica unica parallela al corso del fiume Po chiusa a nord da un avancorpo e a sud da una torre con un tetto a cuspide. L'avancorpo aveva l'accesso principale sul lato Po tramite una rampa parallela al fronte edificato. Nel lato nord ed est vi erano giardini e frutteti secondo il gusto dell'epoca. La continuità di interessi da parte dei francesi e dei Savoia per il sito del Valentino ne testimonia l'importanza strategica per il controllo dei flussi fluviali.

Esso diventa nel 1619 residenza della I Madama Reale Cristina di Francia, sposa del duca Vittorio Amedeo I e reggente al trono per conto dell'erede al trono Carlo Emanuele II a partire dal 1638. Fu proprio il gusto e la raffinatezza di Cristina, figlia di Enrico IV di Borbone e Maria de' Medici e sorella di Luigi XIII a promuovere insieme al suo primo ministro Filippo di San Martino d'Agliè l'ampliamento del palazzo, incaricando del progetto l'architetto Carlo di Castellamonte cui seguirà nell'incarico il figlio Ame-

deo [74]. Il progetto di ampliamento elaborato da Carlo di Castellamonte prevedeva un raddoppio a nord della manica del palazzo utilizzando il padiglione centrale come asse di simmetria per il raddoppio. Nello stesso tempo veniva sopraelevando la torre sud-est e conseguentemente anche quella nord il palazzo veniva così ad assumere lo schema dei padiglioni più alti collegati da maniche più basse di derivazione francese. Nell'idea di Carlo di Castellamonte lo schema avrebbe dovuto poi essere raddoppiato sia a sud che a nord lungo lo stesso asse nord-sud, intervento però non realizzato.

A partire dal 1640 Amedeo subentrerà al padre Carlo nella direzione del cantiere contribuendo a definire il progetto di ampliamento che trasformerà il palazzo. Sono questi gli anni del Ducato di Carlo Emanuele II e della sua consorte Maria Giovanna Battista di Savoia-Nemours ultima promotrice degli interventi di trasformazione della residenza. Il progetto di ampliamento di Amedeo prevedeva l'ampliamento del palazzo verso ovest conseguentemente alla nuova importanza assunta da quell'affaccio in relazione ai progetti di ampliamento della nuova capitale. Seguendo lo schema francese dei padiglioni a torre collegati da gallerie, adottato in altre residenze quali Agliè e lo stesso Palazzo Reale il progetto di Amedeo di Castellamonte prevedeva un impianto rettangolare organizzato attorno ad un ampia corte centrale con una manica principale a est delimitata a nord e a sud da due torri angolari e collegata tramite due basse gallerie alle due torri occidentali più basse. Un emiciclo porticato con un padiglione centrale chiudeva il cortile a ovest. La collocazione del complesso era posta in relazione con le preesistenze tramite dei viali alberati di cui uno est-ovest collegava il Castello con il preesistente convento di San Salvario e due radiali lo collegavano a nord-ovest con la nuova capitale e a sud con i sobborghi meridionali. Questo progetto è stato ripreso due delle tavole illustrate da Tommaso Borgonio del Theatrum Sabaudiae [1], con chiari intenti propagandistici che hanno enfatizzato alcuni progetti come questo ancora in corso d'opera immaginandone sviluppi mai realizzati. Il palazzo non subirà sostanziali cambiamenti per tutto il secolo successivo.

La destinazione d'uso residenziale ha incominciato a perdere importanza già dopo la morte della seconda Madama Reale Giovanna Battista di Savoia-Nemours con la destinazione ad Orto Botanico dei terreni a nord del complesso. Durante l'occupazione francese del periodo napoleonico il Castello acquisì la destinazione di caserma, funzione che conservò anche dopo il ritorno dei Savoia, essendo passato sotto il controllo del Demanio. Mentre le guerre di indipendenza cambiavano i destini della monarchia si iniziava a considerare l'ipotesi di destinare le aree circostanti a parco pubblico fino a quando nel 1859 fu destinato a sede della Regia Scuola di Applicazione per gli Ingegneri, dal 1906 Politecnico di Torino. Gli ultimi significativi interventi che hanno riguardato la forma del complesso architettonico sono ascrivibili a questo periodo quando furono chiuse nel le due gallerie porticate aumentandone la larghezza e l'altezza, la costruzione di due avancorpi rettilinei a ovest a sostituzione dell'emiciclo andato distrutto in un incendio e la realizzazione in stile del prolungamento a sud della manica lungo il Po (manica Chevalley) riprendendo le idee del progetto di ampliamento di Carlo di Castellamonte [73].

13.2. Gli elaborati metrici

Il Castello del Valentino, caso studio analizzato nella dissertazione, è stato oggetto di una serie di campagne di rilievo effettuate negli anni 2007-2009 che hanno coinvolto

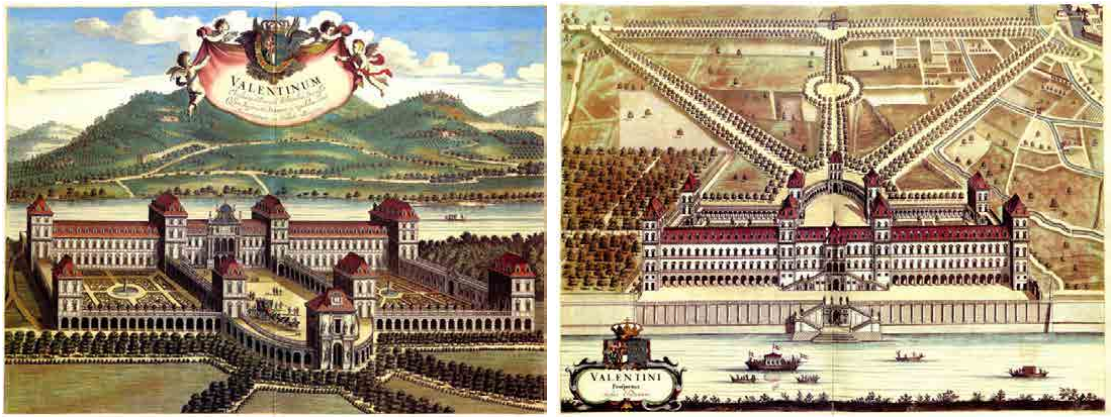


Figura 13.1.: il Castello del Valentino raffigurato in due tavole del *Theatrum Sabaudiae*, Amsterdam, Blaeu 1682.

l'unità di ricerca del Politecnico coordinata dall'Arch. Spanò, nell'ambito dei lavori di restauro delle facciate e di parti degli ambienti interni. Le attività di documentazione metrica di una serie di porzioni dell'edificio fanno parte di un progetto di collaborazione tra il Laboratorio di Rilievo dell'ex DINSE (Dipartimento per le Scienze e Tecniche dei Processi di Insediamento), ora DAD (Dipartimento di Architettura e Design), il Laboratorio di Fotogrammetria del CISDA (Centro Interdipartimentale per i Servizi Didattici) e il Servizio Edilizia del Politecnico in relazione agli interventi di restauro programmati. Questo progetto è stato seguito da una serie di attività di ricerca[1] *[84]* e formazione[2].

Queste acquisizioni e le loro elaborazioni sono state l'occasione per sperimentare i sistemi informativi per la gestione di un archivio metrico riguardante un esteso e complesso bene architettonico. La base del dataset metrico di partenza è ampia e comprende diverse tipologie di rappresentazioni e formati di codifica dei dati. Le acquisizioni condotte negli anni 2008-2011 hanno riguardato i prospetti esterni e porzioni degli ambienti interni nella manica principale. Nel progetto di rilievo è stata impostata una rete principale di inquadramento che abbraccia tutta l'estensione dell'edificio principale che costituisce il complesso del Castello del Valentino. L'impianto della rete principale è stato effettuato mediante la tecnica di posizionamento globale GNSS/GPS. Le coordinate planimetriche dei vertici calcolati con questa tecnica sono state espresse nel sistema di riferimento delle coordinate geodetico WGS 84 e quindi trasformate nel sistema di riferimento cartografico UTM-WGS84 (32N). Le quote elissoidiche della rete di inquadramento sono state invece trasformate in quote ortometriche riferendole al sistema di livellazione nazionale dell'IGM (Istituto Geografico Militare), calcolato sul modello del geoide Italgeo, e riferito al datum verticale espresso dal livello medio del mare misurato dal Mareografo di Genova[3]. A questa rete principale sono state appog-

[1]Nel 2008 è stato bandito l'assegno di ricerca: *Acquisizione, elaborazione e gestione integrata di dati topografici e fotogrammetrici per la realizzazione di modelli metrici orientati alla documentazione dell'Architettura storica soggetta a progetti di Conservazione*, Beneficiario: Cristina Bonfanti Resp.: A. Spanò

[2]La tesi di laurea di Nadia Guardini, *Sistemi informativi spaziali per la valorizzazione: sperimentazione in ambiente GIS per il Castello del Valentino,* relatrice A. Spanò ha avuto come argomento le elaborazioni GIS dei dati acquisiti.

[3]Un sistema di riferimento nel quale le coordinate planimetriche x, y esprimono la proiezione car-

giate le reti di raffittimento che hanno permesso il rilievo di dettaglio dei fronti e degli ambienti interni la cui realizzazione è stata effettuata con tecniche miste, topografiche e GNSS-GPS. È stato quindi possibile riferire tutti gli elaborati metrici prodotti ad un sistema di riferimento globale codificato e universalmente riconosciuto permettendo un più facile interscambio dei dati. Il rilievo di dettaglio dei fronti esterni è stato effettuato per mezzo di tecniche speditive di acquisizione: rilievo celerimetrico con stazione totale integrato con metodologie di fotogrammetria semplificata (fotoraddrizzamento). Negli ambienti interni, laddove l'importanza degli ambienti necessitava una documentazione più dettagliata o la conformazione spaziale richiedeva un approccio diverso, queste tecniche sono state integrate con altre più innovative. Nel rilievo degli ambienti voltati collocati nei piani interrati della manica principale sono state acquisite scansioni laser dalle quali sono stati derivati i profili di sezione bidimensionali. Nel salone centrale posto al primo piano, collocato in un ambiente più aulico e caratterizzato da affreschi presenti sulla volta oltre che sulle pareti, le misure effettuate tramite scansione laser sono state integrate con quelle fotogrammetriche al fine di restituire l'ortofoto [81].

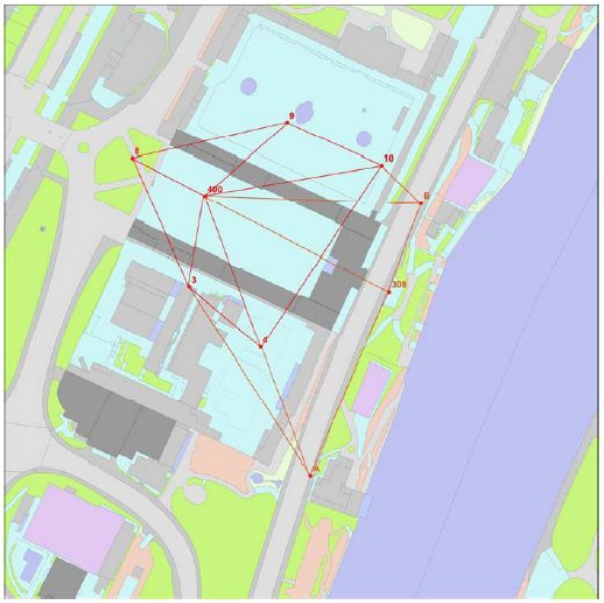


Figura 13.2.: schema della rete di inquadramento principale da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

Le premesse alla scelta del presente caso studio risiedono nelle premesse stesse al lavoro di ricerca di cui la presente dissertazione ne illustra i risultati, nello specifico per quanto concerne la gestione del dato 3D in ambito architettonico. Queste motivazioni risiedono nella volontà di esplorare le potenzialità dei sistemi informativi, già pienamente applicati ai dati 2D in diversi contesti applicativi ivi incluso quello dei Beni

tografica e le coordinate z sono espressione della quota ortometrica viene definito composto e identificato per mezzo dei codici dei due diversi sistemi di riferimento utilizzati. L'OGC ha codificato i sistemi di riferimento principali e per la maggior parte di quelli europei si basa sulla codifica dell'EPSG (*European Petroleum Survey Group*). I codici EPSG utilizzati sono EPSG::32632 per la proiezione cartografica (WGS84) e EPSG::5214 per le quote ortometriche (*Genoa height*). La corrispondente codifica OGC è quindi "urn:ogc:def:crs,crs:EPSG:7.9:32632,crs:EPSG:7.9:5214".

Culturali, all'ambito della gestione dei dati geometrico-semantici relativi alla documentazione architettonica 3D. Le esigenze di una gestione dei dati metrici 3D relativi ai beni culturali alla scala architettonica, che rappresenta un settore di ricerca ancora in gran parte inesplorato, trova importanti collegamenti con le ricerche nel contesto della gestione dei dati metrici della cartografia urbana. In particolare è stata analizzata la struttura del dato geometrico a la sua relazione con quello semantico nell'ottica di una gestione integrata dei principali supporti metrici in uso (raster e vettoriali, 2D e 3D) con l'insieme dei contenuti informativi dei database cartografici e di quelli relativi al patrimonio culturale. Tra queste motivazioni le principali si ritrovano nella complessità delle caratteristiche spaziali e tematiche dell'oggetto. Si tratta di un importante ed esteso complesso architettonico, articolato in diversi edifici interconnessi, che ha attraversato diverse trasformazioni nel corso dei secoli, delle quali la più incisiva è stata la destinazione a sede universitaria nella fine del XIX secolo. L'articolazione spaziale degli elementi costitutivi il complesso lo fanno un ottimo caso studio per la valutazione delle potenzialità di un modello dei dati multiscala. La rappresentazione del complesso architettonico infatti comprende i livelli dettaglio che vanno dalla scala urbana (1:1000 - LOD1) fino alla scala architettonica (1:100 - LOD4) e oltre (1:50). L'articolazione degli edifici costituenti il complesso architettonico di cui il Castello del Valentino rappresenta l'edificio principale, a sua volta articolati in diverse unità volumetriche diverse per forma, destinazione d'uso, fase costruttiva, rappresentano un'occasione per sperimentare dei sistemi che permettano di gestire oggetti complessi articolati tramite relazioni e dipendenze reciproche. Le finalità della documentazione metrica dei BBCC possono essere utilizzate per valutare la multivalenza del modello, cioè la sua capacità di rispondere a diversi scenari d'uso e esigenze di studio. La documentazione metrica prodotta e utilizzata come base per l'implementazione ha avuto come finalità la redazione del progetto di restauro. Essa costituisce un caso studio tipico per l'analisi delle esigenze degli *information providers*, da cui vengono i contributi delle discipline storico-critiche e tecnico-scientifiche che contribuiscono a fornire gli strumenti per le politiche di tutela e degli *information users*, cioè degli utilizzatori di informazione. Gli elaborati, frutto di integrazione di metodologie diverse di acquisizione tradizionali e non, sono stati forniti alla committenza nei tradizionali supporti bidimensionali in scala 1:50. Essi corrispondono alle tipologie di rappresentazioni acquisite dalle Soprintendenze, enti periferici del Ministero per i Beni Culturali preposti alla tutela e vigilanza degli interventi di trasformazione sui Beni Culturali.

La complessità dell'argomento affrontato e la necessità di analizzare un percorso metodologico integrato che, partendo dai dati grezzi attraverso la loro strutturazione in un modello dei dati coerente con le premesse, giungesse alla sperimentazione di strumenti operativi concreti per la gestione dei dati ha necessariamente imposto una scelta e una limitazione dell'ampio dataset secondo criteri di omogeneità e rappresentatività della tipologia di dato, in linea con le esigenze di normalizzazione assunte come presupposto per l'analisi di un caso studio tipico. Per questi motivi è stato scelto di modellare tutte le parti costituenti l'edificio unitario storico (ad eccezione della manica Chevalley) ai livelli di dettaglio LOD1 e 2, escludendo quindi gli altri edifici separati formanti il complesso universitario. È quindi stato scelto un fronte architettonico significativo per lo sviluppo delle scale più elevate. Il processo di creazione del modello multiscala è partito quindi dalla selezione degli elaborati metrici del rilievo in scala 1:50 utilizzati per rappresentare le parti dell'edificio identificate per l'implementazione nel modello

semantico. Gli elaborati utilizzati sono costituiti dai profili orizzontali e verticali significativi delle facciate esterne del complesso e i relativi prospetti tutti referenziati all'archivio plano-altimetrico unitario del rilievo.

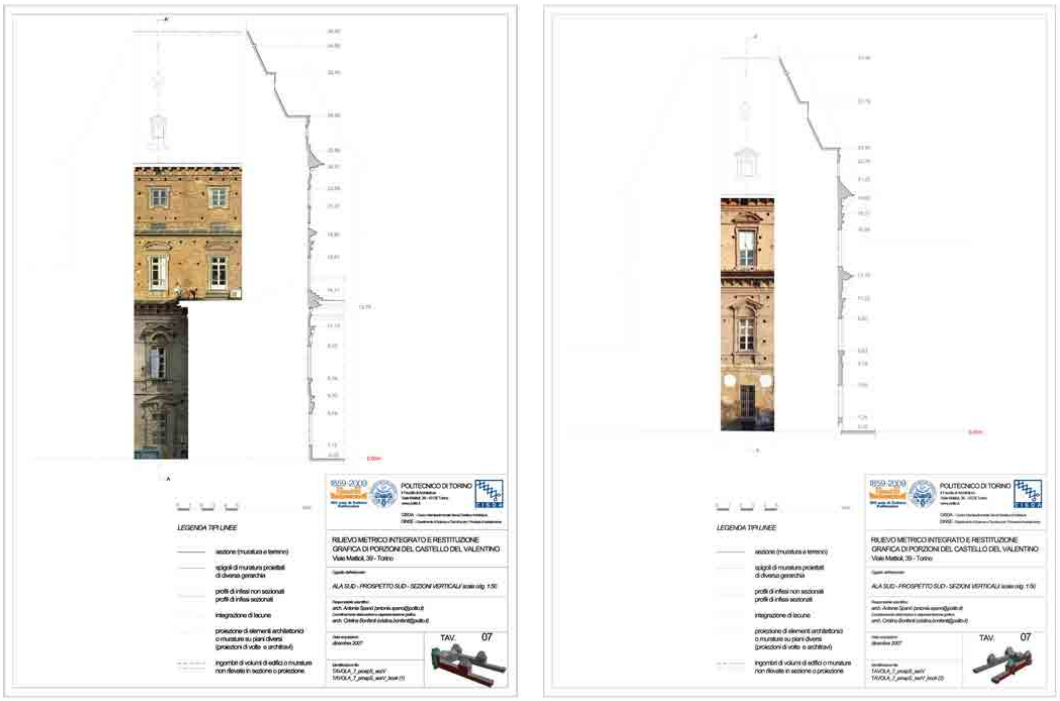


Figura 13.3.: stralci di sezioni verticali della facciata sud: torre sud-est e sud-ovest da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

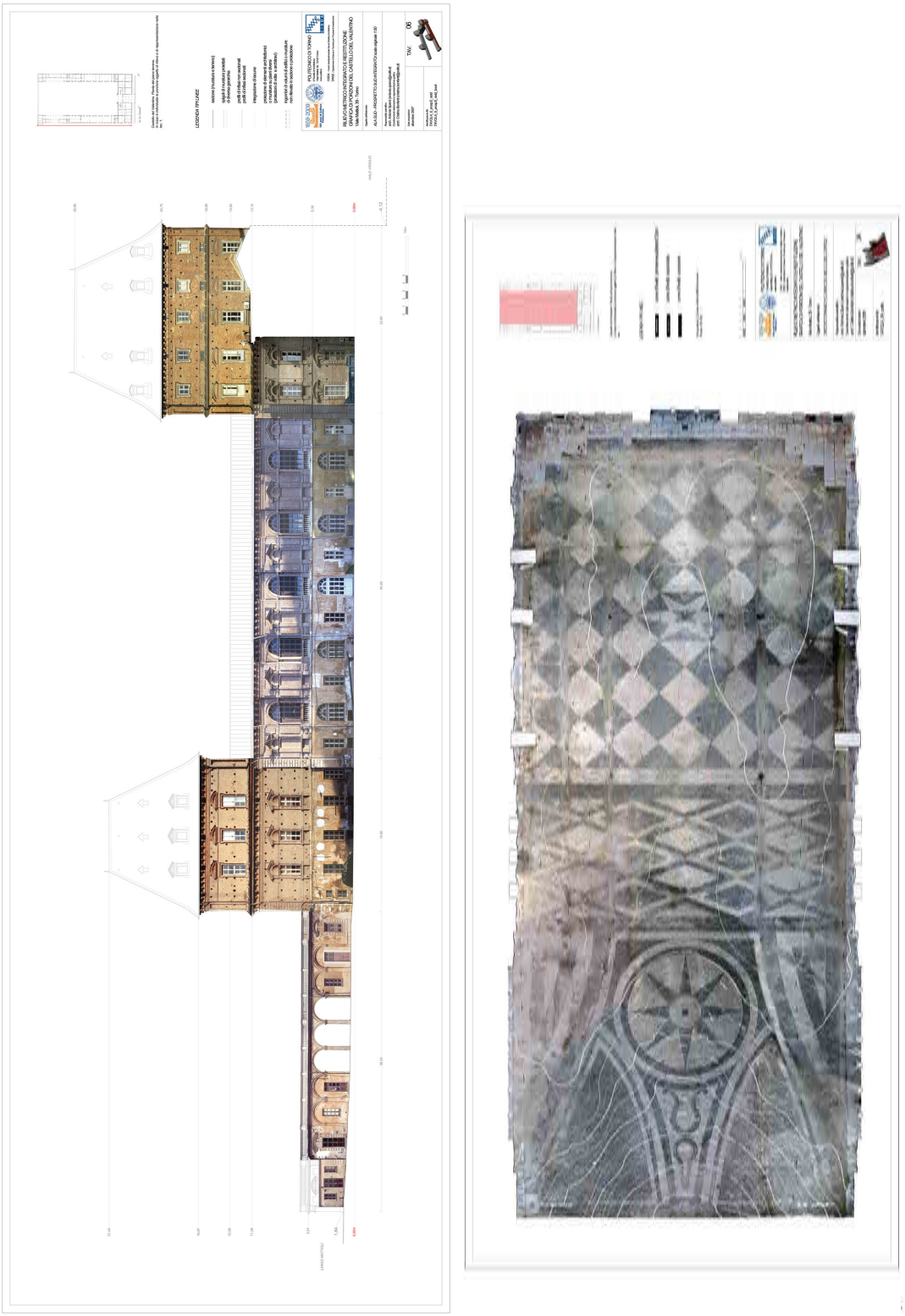


Figura 13.4.: prospetto della facciata sud integrato con fotopiani, pianta del cortile ortofoto e isocline da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

14. Modello geometrico

La forte caratterizzazione semantica dei dati geometrici che descrivono le componenti dell'edificio richiede un approccio alla modellazione delle diverse scale di rappresentazione discreto ovvero basato sulla relazione indiretta che gli oggetti geometrici hanno con la componente tematica, indispensabile per definire la rappresentazione dell'oggetto ai livelli di dettaglio molto alti come quelli della progettazione architettonica (LOD2-4). Come sottolineato da Molenaar [53] un approccio strutturato alla modellazione multiscala è determinante anche per la classificazione a scale più elevate delle *feature* naturali come ad esempio l'idrografia.

La procedura di derivazione dei modelli geometrici ai diversi livelli di dettaglio sulla base del materiale non strutturato costituito dalla base CAD è stata impostata sulla base delle classi semantiche individuate per l'implementazione e sulle relazioni spaziali tra le varie classi geometriche. La scelta di implementare le specializzazioni della *_BoundarySurface* per permettere di definire le componenti fondamentali dell'involucro edilizio al LOD2 e di caratterizzarne l'aspetto tramite l'associazione delle *texture* ha determinato la scelta di implementare il modello a questa scala come un'aggregazione di superfici, mentre la definizione delle unità volumetriche come solidi è stata implementata al LOD1. Il limite imposto dai sistemi CAD nella gestione delle coordinate cartografiche è stato risolto impostando un sistema di riferimento locale con l'origine posta in prossimità della torre nord-est. Questo sistema è stato utilizzato per integrare tutte i modelli che sono stati realizzati nelle diverse scale di dettaglio. Altri sistemi di riferimento locali sono stati impostati per le fasi di modellazione nelle scale di dettaglio più elevate per gestire meglio i modelli. Per la predisposizione dei fotopiani al loro utilizzo come *texture* metriche sono stati invece utilizzati i sistemi di riferimento locali già precedentemente impostati per la definizione dei piani medi nella fase di restituzione dei dati fotogrammetrici. Integrando i modelli tridimensionali creati nei vari livelli di dettaglio e i fotopiani nello stesso sistema di riferimento è stato possibile predisporre le *texture* con rispetto per il loro contenuto metrico. Il livello di dettaglio LOD2, corrispondente alla scala 1:1000 - 1:500, è stato modellato l'intero edificio

Il modello geometrico LOD3 invece è stato creato a partire da un processo di generalizzazione degli elementi decorativi del fronte architettonico sulla base del prospetto in scala 1:50. La scelta dell'elemento da approfondire alle scale più elevate è ricaduta sulla torre sud-est facente parte, insieme alla manica centrale, del nucleo cinquecentesco del Castello. Essa inoltre, insieme alla torre nord-est, si sviluppa per 4 piani di altezza fuori terra permettendo di disporre di un campione di diverse tipologie di apparato decorativo coerentemente con lo schema classico degli ordini architettonici che segue uno sviluppo verticale nel quale gli stessi si differenziano a seconda della diversa importanza dei diversi piani e contribuendo a definire la forma dell'architettura. Quest'articolazione dell'apparato decorativo è stata quindi l'occasione per impostare uno schema che potesse essere valido anche per gli altri fronti interni. Il primo passo per l'elaborazione di questo schema è stato un'analisi degli elementi che costituiscono l'apparato decora-

tivo del fronte architettonico sulla base degli schemi classici degli ordini architettonici seguiti anche dai Castellamonte nel loro progetto e nei successivi interventi. Sono così stati identificati sul prospetto gli elementi tipici dell'architettura storica quali la fasce marcapiano, le lesene, gli elementi che costituiscono la trabeazione (fregio, architrave e cornice). Questo primo gruppo di oggetti rappresenta tutti quegli elementi architettonici che sono rappresentati nelle scale architettoniche (1:200-1:100-1:50). A partire da questa classificazione sono stati poi definiti tutti gli altri elementi dell'edificio che sono invece ampiamente codificati dalle normative nazionali e internazionali per la gestione dei dati spaziali come le aperture, le coperture e le superfici murarie.

Questo processo di generalizzazione bidimensionale è servito come schema di riferimento per impostare quello nello spazio tridimensionale. Sulla base dell'integrazione di tutti i profili di sezione verticali e orizzontali con la generalizzazione degli elementi del fronte è stato possibile trasferire lo stesso procedimento nello spazio tridimensionale. È stato quindi modellato il particolare di una porzione di un piano della facciata contenente il profilo interno ed esterno dei muri e tutto l'apparato decorativo che forma la cornice esterna delle finestre. Questa modellazione di un modulo architettonico in scala 1:50 è servita per identificare nello spazio le caratteristiche degli elementi decorativi precedentemente individuati sulla proiezione verticale. Gli elementi così identificati nel modello tridimensionale sono stati quindi generalizzati ai due livelli di dettaglio inferiori e questo schema relativo ad un modulo architettonico è stato utilizzato per la creazione dei modelli LOD3 e LOD4 di tutta la facciata.

Le procedure di creazione del modello geometrico hanno fatto un utilizzo integrato dei principali sistemi di rappresentazione che abbiamo analizzato. La scelta del tipo di rappresentazione da utilizzare per la modellazione degli elementi è stata messa in relazione con le caratteristiche dell'oggetto e quindi con i livello di dettaglio. L'utilizzo di superfici parametriche nella modellazione dei livelli più bassi, con l'aumentare del dettaglio è stato integrato con sistemi di rappresentazione più elaborati come le B-Rep, utilizzando anche gli operatori booleani della Geometria Solida Costruttiva per determinare le intersezioni tra le superfici e per unire gli oggetti nella fase finale di predisposizione del modello per l'implementazione nel formato CityGML. Gli strumenti della modellazione per superfici parametriche e NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*) che fanno parte della famiglia delle B-Rep, pur essendo supportati dai principali strumenti applicativi CAD, non dispongono ancora di un formato di interscambio pienamente supportato da tutti i sistemi. I formati al momento più diffusi e supportati come il VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) o proprietari come OBJ della Alias Systems e 3DS della Autodesk supportano solo la tipologia di superficie triangolata (*mesh*) pertanto tutte le altre tipologie di rappresentazione vengono convertite nella forma di *mesh* triangolari. La stessa operazione viene anche svolta dai motori grafici di rendering durante il calcolo dei parametri di illuminazione e dei materiali precedente alla creazione dell'output finale raster costituito dalle viste personalizzate dell'oggetto (*rendering*). I formati elencati supportano inoltre l'esportazione dei parametri di illuminazione, i materiali e i relativi parametri di mappatura delle *texture*.

Nella fase di conversione verso questi formati i modelli sono stati quindi sottoposti al processo di triangolazione che dipende dal sistema applicativo utilizzato e solitamente prevede la suddivisione della superficie in una maglia quadrangolare e successivamente alla suddivisione dei poligoni in triangoli sulla base di una serie di parametri. Questi permettono di controllare con precisione il risultato finale rispetto alla superficie

originale e di generare delle *mesh* sufficientemente accurate e nello stesso tempo con un numero non troppo elevato di triangoli. Gli algoritmi di calcolo seguono una serie di regole che sono legate alla struttura geometrica dei modelli di riferimento. Come abbiamo visto i modelli di superficie B-Rep sono costituiti da una serie di contorni che definiscono lo scheletro del modello e ai quali sono associate le regole per la generazione delle superfici, espresse in termini matematici. La *mesh* è invece una superficie triangolata nella quale la dimensione della tessellatura dei triangoli rappresenta il sistema con cui viene approssimata una superficie curva. Uno dei parametri più importanti che viene utilizzato in queste procedure di triangolazione è la determinazione dell'angolo di deviazione tra la normale della superficie in un punto e il corrispondente vertice della *mesh*, parametro importante per controllare appunto il grado di approssimazione della tessellatura rispetto alle superfici curve permettendo allo stesso tempo di ottenere *mesh* con un numero basso di triangoli nelle superfici con una curvatura bassa o nulla. Un altro parametro importante che viene utilizzato per controllare la triangolazione è la suddivisione iniziale in poligoni che controlla il numero minimo di poligoni per rappresentare ciascuna superficie. Atri parametri permettono inoltre di regolare il processo di semplificazione dei piani che vengono successivamente triangolati e di controllare le giunzioni tra i bordi. Questi parametri sono indipendenti dalla scala. Altri parametri che invece dipendono da relazioni metriche sono la lunghezza dei bordi minima e massima e la determinazione dello scarto tra il bordo della superficie originale e il corrispondente bordo della *mesh* che permette di controllare metricamente il risultato dell'approssimazione dela tessellatura dei triangoli rispetto alle superfici curve. Vi sono dei parametri globali che permettono di controllare il numero totale di triangoli generati in termini assoluti o percentuali.

14.1. 1:50

Questa scala è stata utilizzata come punto di partenza per la modellazione della facciata sud della torre sud-est che si è stata scelta per l'approfondimento nei LODs superiori al 2. La modellazione a questa scala di un modulo della facciata, costituito dall'apparato decorativo di una finestra, è servita per fissare un livello massimo di restituzione del dettaglio dei particolari che permettesse di restituire aspetti della forma geometrica degli oggetti, essenziali per le analisi, la gestione e la documentazione dei beni architettonici. Queste caratteristiche geometriche ci permettono infatti restituire una parte del valore aggiunto del contributo del rilievo metrico alla documentazione dei beni culturali. Nel caso di questo tipo di rappresentazione, che deriva dell'approccio del rilievo metrico di rappresentare l'oggetto per mezzo di una serie di profili di sezione significativi e del proiezione sul piano medio, il contributo della modellazione a questa scala di dettaglio nella documentazione del bene culturale è stato quello di riuscire a restituire il grado di dettaglio necessario a rappresentare il particolare architettonico nei suoi principali elementi che lo caratterizzano. Nella modellazione del particolare architettonico sono state utilizzate superfici parametriche e NURBS ottenute sulla base dei contorni delle superfici costituiti da curve semplici o *spline*. Il modello a questo livello di dettaglio è stato utilizzato come base per la creazione dei modelli ai livelli inferiori (LOD4 e LOD3) attraverso l'individuazione dei meccanismi di generalizzazione delle *feature* tridimensionali precedentemente individuati nello schema bidimensionale del prospetto del fronte architettonico.



Figura 14.1.: modulo utilizzato per la generalizzazione degli elmenti architettonici della facciata, da sinistra a destra: 1:50, 1:100 (LOD4), 1:200 (LOD3).

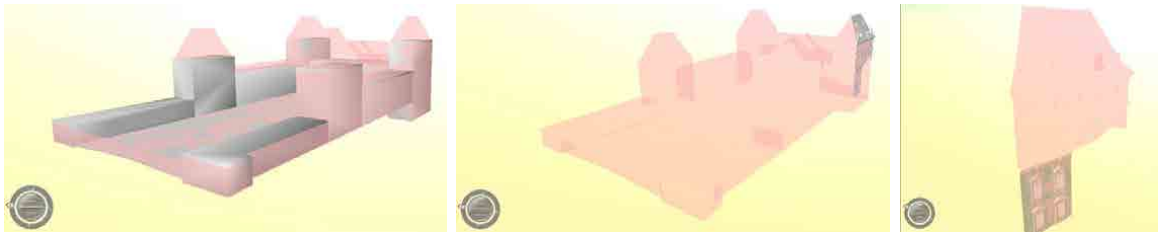


Figura 14.2.: sovrapposizione dei modelli ai diversi livelli di dettaglio da sinistra a destra: LOD1-2, LOD2-3, LOD3-4.

14.2. LOD4 (1:100)

Il modello LOD4 è stato realizzato sulla base dello schema di generalizzazione del prospetto e di quello del modulo architettonico. Lo schema di generalizzazione ha fornito la base per costruire il telaio bidimensionale del modello LOD4 sulla base di quello alla scala più bassa mentre la generalizzazione del modulo architettonico è servita per fornire i criteri di modellazione delle altre *feature*.

L'approccio alla rappresentazione degli oggetti negli standard dell'OGC, utilizzato nei sistemi GIS, è quello della rappresentazione delle superfici esterne che delimitano gli elementi visibili degli oggetti cioè tutti quegli elementi che sono rilevabili e misurabili. I LOD 1-3 permettono infatti di rappresentare solo l'involucro esterno dell'edificio tramite un insieme di superfici connesse tra di loro, mentre nel LOD4 è possibile definire anche gli elementi fondamentali che costituiscono l'interno degli edifici. Anche in questo caso però viene rappresentata esplicitamente solo la superficie interna ed esterna,

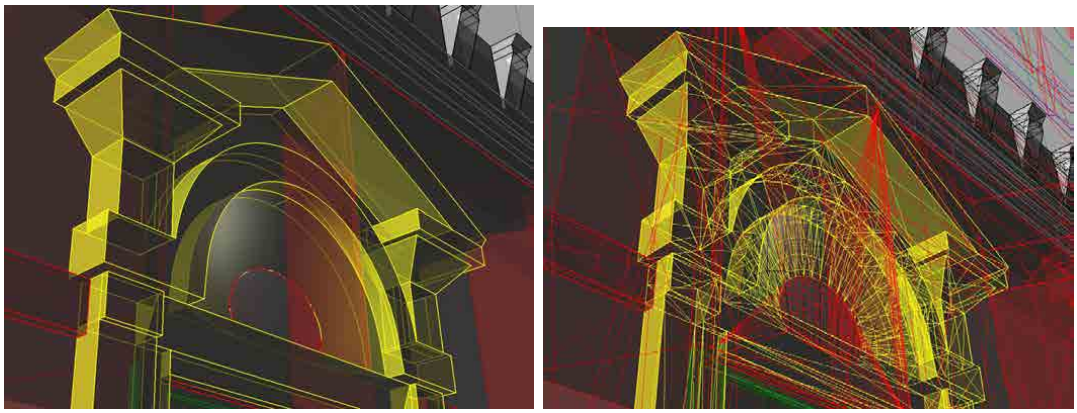


Figura 14.3.: processo di triangolazione: a sinistra il modello di superficie a destra la *mesh*. La triangolazione è stata ottenuta impostando un angolo massimo di 20° tra le normali e una distanza massima tra bordo e superficie di 2 cm.

mentre il volume dei muri non è esplicitato in quanto essi non sono modellati come solidi. A questo livello di dettaglio, oltre agli elementi architettonici che descrivono la superficie delle facciate, è prevista infatti la modellazione delle superfici interne agli edifici e degli elementi accessori quali arredi e installazioni. Nel presente caso, avendo a disposizione i profili di sezione orizzontale della cortina muraria interna ed esterna sono stati integrati con acquisizione di misure dirette sulle sezioni delle murature in corrispondenza delle aperture per poter modellare anche la sperficie interna dei primi due livelli di fabbrica. La classe geometrica utilizzata per rappresentare la geometria della facciata esterna è stata *gml:MultiSurface*, mentre per quanto riguarda la cortina muraria interna essa è stata implementata come occorrenza della classe *gml:Solid*.

14.3. LOD3 (1:200)

Il modello in scala LOD3 è il primo livello di lettura in cui si riescono a cogliere pienamente le caratteristiche della forma dell'edificio architettonico. A questa scala infatti possono essere rappresentati, anche se in modo ancora approssimato, tutti quelle caratteristiche che contribuiscono a differenziare lo sviluppo verticale delle facciate. Caratteristiche come aperture e aggetti che permettono di rappresentare quegli elementi che abbiamo precedentemente individuato sul fronte come significativi per qualificare e classificare gli edifici nella loro conformazione spaziale. La scelta di approfondire il modello geometrico del Castello su una porzione di facciata ci può permettere inoltre di mettere in relazione la rappresentazione prodotta per mezzo di quest'approccio all'analisi della forma geometrica di un oggetto con quelli precedentementre descritti nella parte precedente e precisamente con le rappresentazioni 2.5D. Il LOD3 prevede la modellazione della sola superficie esterna dell'edificio.

Il processo di intersezione tra i profili orizzontali e verticali con i prospetti per la creazione del modello tridimensionale permette di comprendere meglio la relazione tra i vari elementi e la loro importanza nel determinare l'articolazione spaziale dell'edificio. Nella creazione delle superfici murarie ai vari piani fuori terra è ad esempio stato registrato uno scostamento dei piani medi delle facciate che, coerentemente con la tipologia edilizia, descrive la progressiva riduzione dello spessore dei muri all'aumentare

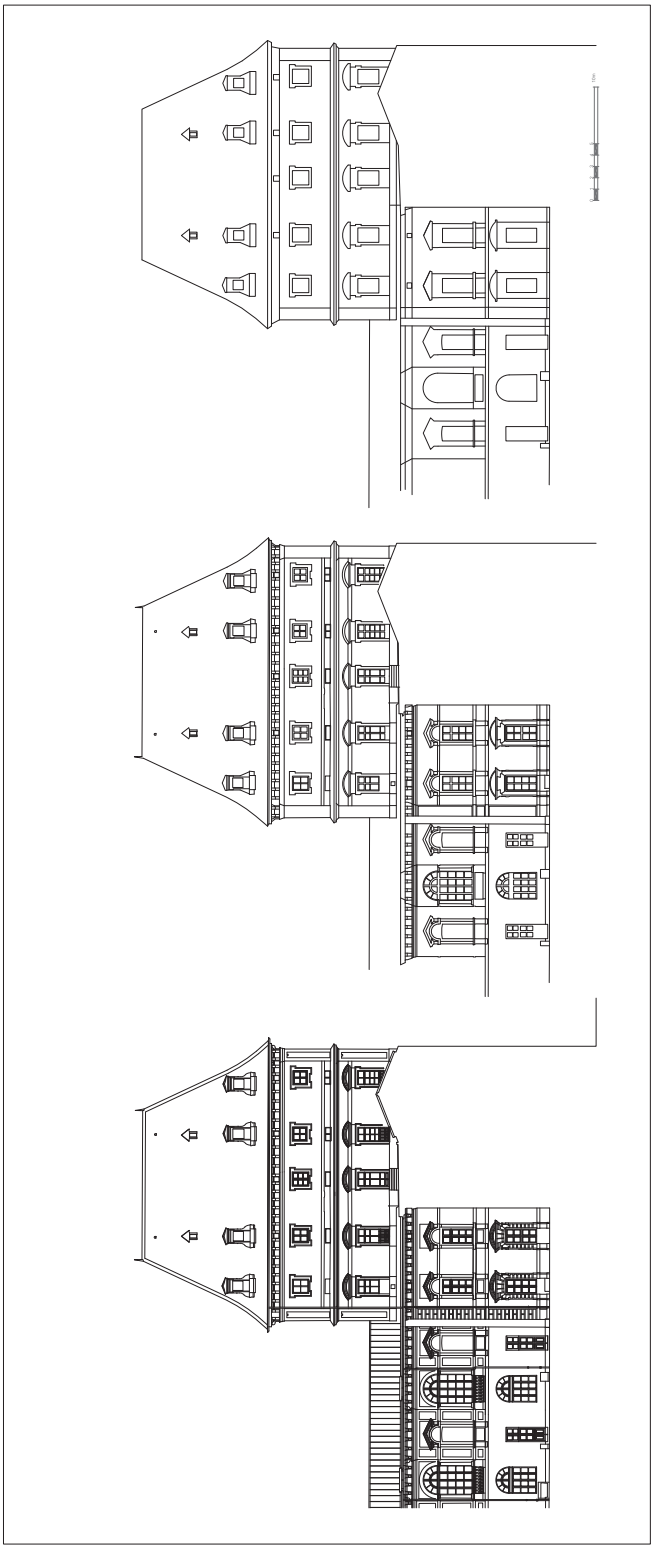


Figura 14.4.: processo di generalizzazione: dal basso verso l'alto scala 1:50, 1:100 (LOD4) e 1:200 (LOD3)

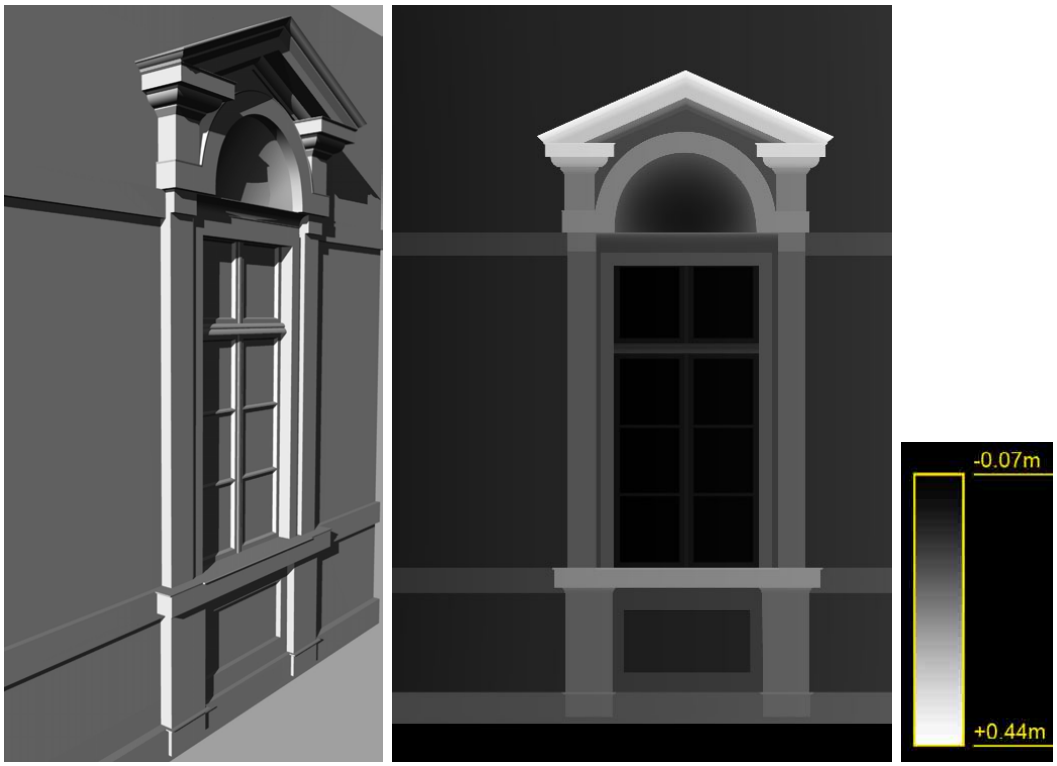


Figura 14.5.: trasformazione di un modello di superficie B-Rep in un modello di elevazione *grid*; esso rappresenta la proiezione sul piano medio della facciata delle linee di contorno del modello di superficie del particolare decorativo (1:50).

dell'altezza. L'utilizzo della fascia marcapiano nell'architettura storica è infatti un elegante stratagemma per mascherare questo scostamento laddove esso non sia realizzato esclusivamente internamente. La diminuzione della sezione muraria registrata sulla facciata si è rivelata coerente con la tecniche costruttive in muratura portante. Il valore rappresentato da questo incrocio delle rappresentazioni bidimensionali è puramente indicativo dell'andamento in quanto è mediato dall'interpretazione e semplificazione del dato che inevitabilmente viene da questo tipo di creazione del modello di superficie e nulla aggiunge a quanto già registrato, sempre in forma implicita, negli elaborati di rilievo. La creazione dello stesso modello infatti segue l'approccio di analisi della forma dell'edificio che è stato impostato nella fase di rilievo e cioè la sua riduzione a una serie di profili significativi che riducono nelle due dimensioni le caratteristiche spaziali dell'edifico che svilupppano nello spazio 3D.

14.4. LOD2 (1:1000 - 1:500)

Corrisponde ad una scala intermedia tra quelle della cartografia urbana (LOD0 e LOD1) e della rappresentazione architettonica (LOD3 e LOD4). A questo livello di dettaglio il modello geometrico rappresenta, seppur un maniera ancora schematica, la sua forma esterna in relazione all'articolazione spaziale dei volumi che lo compongono. Le unità volumetriche che compongono l'edificio possono essere qualificate attraverso la differenziazione e qualificazione delle superfici che lo compongono. È possibile infatti implementare a questo livello di dettaglio le specializzazioni della *_BoundarySurface*



Figura 14.6.: modello della porzione di facciata implementata al LOD4.

che definiscono appunto le principali componenti dell'edificio, considerato sempre come un involucro vuoto delimitato dalle sue superfici esterne. Per quanto concerne la definizione geometrica dell'involucro edilizio la scelta fondamentale, come abbiamo osservato precedentemente, è tra l'implementazione della classe *gml::_Solid* e *gml::MultiSurface*. La prima permette la definizione di alcune proprietà della geometria tridimensionale come per esempio il volume, però non consente la specializzazione semantica delle differenti superfici esterne che delimitano il solido e l'associazione di materiali o *texture*. La classe *gml::MultiSurface* definisce invece un aggregato di superfici che possono essere semplici aggregati, cioè non strutturati topologicamente oppure composti cioè formati da superfici adiacenti non sovrapposte. Anche nel caso essi siano nella forma di composti e costituiscano un involucro chiuso esse sono sempre trattate come superfici 2D in uno spazio 3D e quindi non definiscono un volume. Per tutti i livelli di dettaglio successivi sono ammesse solo le classi *gml:MultiSurface* ad eccezione della classe tematica Room che invece prevede l'utilizzo della classe geometrica *gml:Solid*.

In questa fase sono state ricampionati e predisposti i fotopiani per il loro utilizzo come *texture* metriche da utilizzare per caratterizzare qualitativamente il modello geometrico. La possibilità di impostare sistemi di riferimento locale permette di mettere automaticamente in relazione il modello geometrico con le informazioni metriche dei fotopiani ottenuti dal rilievo.

14.5. LOD1 (1:2000 - 1:1000)

Il modello LOD1 è stato derivato per generalizzazione delle *feature* dal modello LOD2. Sono stati eliminate le falde inclinate dei tetti e gli elementi accessori come la scalinata esterna sul lato Po, in accordo con le prescrizioni dello standard. Sono stati eliminati inoltre tutti gli elementi che, se pur in maniera schematica, contribuivano a rappresentare la forma esterna attraverso la caratterizzazione delle facciate. Questo livello di dettaglio, corrispondente alla scala di rappresentazione della cartografia urbana, de-

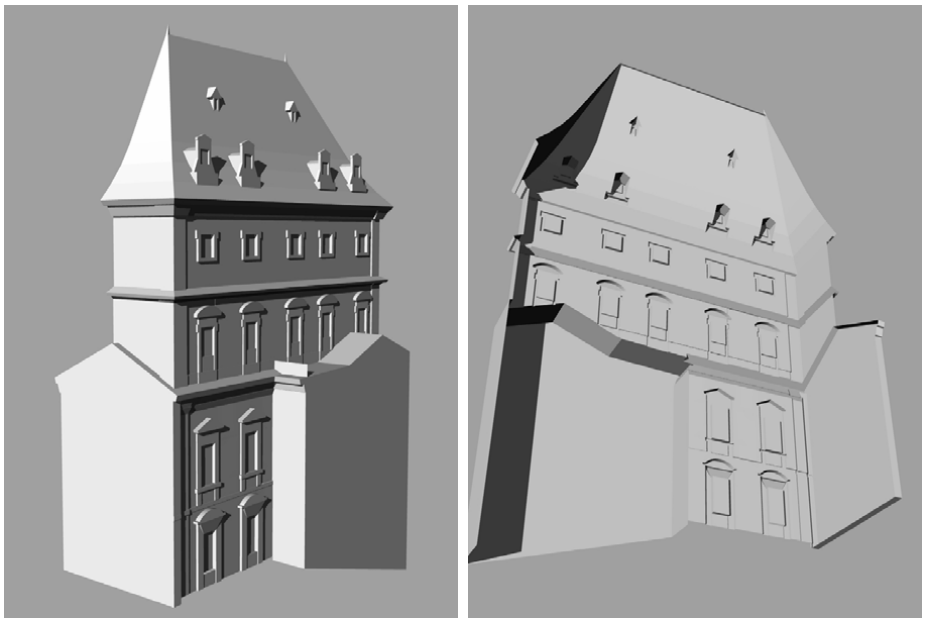


Figura 14.7.: modello della torre sud-est implementata al LOD3.

ve rappresentare il modello dell'edificio nel modo più sintetico possibile, riducendo la forma esterna ad un parallelepipedo. L'unica informazione geometrica nello spazio 3D che viene comunicata a questa scala è l'altezza dell'edificio ed eventualmente la sua suddivisione in unità volumetriche differenti, ognuna caratterizzata dalla sua altezza. Esso è stato quindi implementato nell'ottica di un suo inserimento in un modello più ampio comprendente l'intero perimetro cittadino, similmente alle sperimentazioni dei progetti in ambito europeo citati nel Capitolo 12.1. Secondo le specifiche a questo livello le classi geometriche ammesse sono *gml::_Solid* e *gml:MultiSurface*.

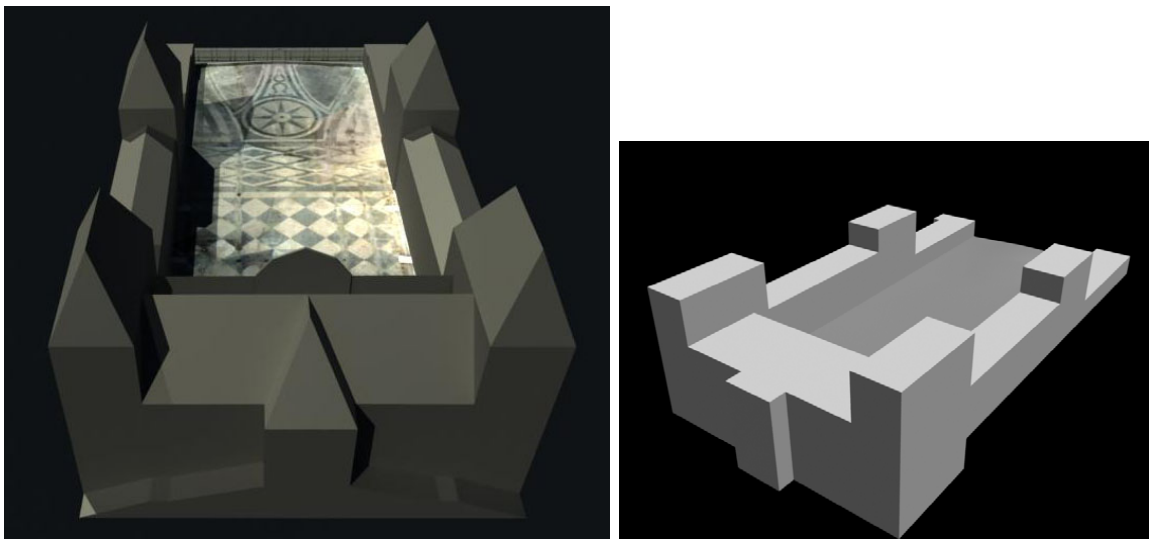


Figura 14.8.: vista prospettica del modello LOD2 (sinistra) e LOD1 (destra).

15. Modello tematico

Il modello è stato implementato utilizzando le indicazioni e gli strumenti delle specifiche CityGML (v.1.0.0) analizzate nella precedente parte. La definizione del modello concettuale dei dati è stata fatta partendo dallo schema UML presente nelle specifiche. La scelta di utilizzare il modello dei dati dell'OGC è stata dettata dall'esigenza di valutare le potenzialità e le eventuali problematiche della costruzione di un database spaziale 3D partendo da uno standard riconosciuto a livello internazionale basato su un modello dei dati ad oggetti che permette di rappresentare la complessità dei beni architettonici. Com'è stato evidenziato la struttura dei dati ad oggetti permette la creazione di oggetti complessi per i quali siano inoltre esplicitate le relazioni che li legano. Le caratteristiche di ereditarietà e incapsulamento proprie dell'approccio *object-oriented* hanno il pregio di strutturare gli oggetti gerarchicamente, qualora sia necessario, ma nello stesso tempo di poter determinare comportamenti diversi delle sottoclassi, caratteristica nota come polimorfismo. Quest'ultimo aspetto permette una modellazione dei dati più flessibile al livello delle sottoclassi, le quali, pur mantenendo le relazioni con le classi da cui discendono, possono essere modellate con nuovi attributi e relazioni che le caratterizzano in maniera specifica. L'altra caratteristica importante che ha determinato la scelta del modello ad oggetti per la struttura dei dati è l'estensibilità che permette di aggiungere nuove classi di oggetti senza dover modificare l'intera struttura dei dati, caratteristica importante quando è necessario modellare oggetti con caratteristiche e attributi specifici. Questo aspetto è sempre stato un onere complesso nel mantenimento dei database relazionali laddove sia necessario modficare la struttura del database aggiungendo nuove tipologie di oggetti o di relazioni. La struttura dei dati ad oggetti permette inoltre la rappresentazione diretta delle relazioni $n \rightarrow n$ (molti a molti) che invece nel modello logico relazionale è scomposta in diverse tabelle per ricondurre la relazione al tipo $[0...1] \rightarrow n$ (zero o uno a molti).

La strutturazione del formato CityGML prevede la suddivisione delle diverse caratteristiche dei fenomeni urbani in diversi moduli tematici corrispondenti agli strati informativi della cartografia tecnica strutturati a partire da un *Core Module*. Le classi definite in ciascuno di questi moduli sono infatti specializzazioni di quelle introdotte nel *Core Module*, che a partire dalla classe GML *Feature* definisce la superclasse *CityObject* da cui derivano tutte le altre. Nel *Core Module* sono inoltre definite alcune classi comuni a diversi moduli come per esempio la classe *Address*. Tutte la classi costituenti i moduli tematici, incluso il *Core*, sono messi in relazione con il modello geometrico-topologico o *Spatial Model* derivato dal corrispondente modello spaziale GML di cui ne rappresenta un'estensione. In ciascun modulo tematico CityGML sono definite le relazioni specifiche tra le classi tematiche e le corrispondenti classi geometriche e ciascuna relazione può essere caratterizzata diversamente a seconda del LOD. La relazione specifica tra la classe tematica e la relativa classe geometrica può essere unica per tutti i LODs oppure essere una diversa per ciascun LOD. Nel *Building Module* ad esempio sono definite 4 diverse tipologie di relazione tra la classe tematica _*AbstractBuilding* e

quella geometrica *gml::MultiSurface*, una per ciascun LOD.

È importante rilevare che l'approccio alla modellazione degli elementi geometrici componenti l'edificio caratterizzante le specifiche CityGML deriva dalle finalità di codificare le informazioni spaziali frutto di osservazioni sui fenomeni che caratterizzano la superficie terrestre. Questo approccio conduce ad una classificazione degli oggetti che deriva dalle misure e quindi descrive i risultati del rilievo metrico. Elementi come ad esempio pilastri, travi e solai, che sono solitamente definiti invece in fase di progettazione dell'edificio, non sono modellati come entità autonome, ma sono delimitate dalle rispettive superfici esterne. La superficie muraria esterna ad esempio è implementata come occorrenza della classe *WallSurface*, mentre quella interna come occorrenza della classe *Room*. Il volume del muro non è quindi esplicitato, ma può essere derivato tramite operazioni booleane tra le due geometrie, a patto naturalmente che siano entrambe modellate come solidi e non come superfici. Quest'aspetto riguardante la componente geometrica, definisce in sintesi le operazioni logico-spaziali che possono essere inferite sulle istanze. Un insieme di superfici aggregate (classe geometrica *gml::MultiSurface*) possiede le stesse caratteristiche della classe *_Surface* da cui deriva, anche se il risultato della loro aggregazione definisce un volume interno chiuso e non possiede quindi la proprietà geometrica del volume che è invece una caratteristica della classe geometrica *gml::_Solid*.

15.1. L'edificio e le sue parti

Il modulo *Building* costituisce la parte più complessa e ricca dal punto di vista semantico di tutto il modello CityGML. Esso consente una modellazione dei principali elementi costituenti l'edificio, attributi e relazioni. Il primo passo verso la classificazione degli elementi da modellare è stata la definizione delle occorrenze delle classi *Building* e *BuildingPart*. Mentre per la prima, corrispondente al concetto di edificio vi è un ampia convergenza riguardo al significato del termine e quindi alla sua rappresentazione nella cartografia urbana, per quanto concerne il significato della classe *BuildingPart* i contorni che definiscono il suo ambito di applicazione sono più sfumati. Le specifiche OGC a questo proposito definiscono così la relazione tra *Building* e *BuildingPart*:

> «*The Building class is one of the two subclasses of _AbstractBuilding. If a building only consists of one (homo-geneous) part, this class shall be used. A building composed of structural segments differing in, for example the number of storeys or the roof type has to be separated into one Building having one or more additional BuildingParts [...]. The geometry and non-spatial properties of the central part of the building should be represented in the aggregating Building feature.*» [1]

La traduzione del termine più vicina all'originale, secondo il significato espresso nelle specifiche, è rappresentata dall' unità volumetrica, la quale definisce appunto una parte di edificio autonoma per forma rispetto all'edificio nel suo complesso. Come evidenziato anche della specifiche IntesaGIS il concetto di l'unità volumetrica si riferisce essenzialmente alle caratteristiche geometriche della forma della parte di edificio che

[1] OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.3.1, p.58.

deve essere autonoma e riconoscibile per poterne computare il volume. Essa è definita come segue.

> «E' il volume elementare riferito ad un edificio. Il termine unità volumetrica indica quindi un corpo costruito la cui sommità è costituita da una superficie piana reale, ad esempio un tetto piano, oppure da una superficie piana ideale che definisce quello che può essere considerato il volume del corpo edificato ai fini di un calcolo, ancorché approssimato, della sua volumetria. La quota di questa superficie piana, reale o ideale, viene detta quota di gronda dell'unità volumetrica.»[2]

Le occorrenze della classe *BuildingPart* essendo specializzazioni come la classe *Building* della stessa classe astratta ne ereditano tutti gli attributi secondo il meccanismo dell'ereditarietà. L'insieme delle relazioni e degli attributi comuni a tutto l'edificio devono naturalmente essere specificati al livello della classe più alta. Le due classi sono legate tra di loro tramite la relazione di aggregazione *consistOfBuildingPart*. Questo tipo di relazione, identificata da un rombo vuoto, permette di stabilire un legame tra la parte aggregante e quella aggregata che non è di tipo compositivo, cioè le parti aggregate possono non completare la parte aggregante. Questo tipo di relazione è utile per formalizzare la relazione tra una parte 'principale' [...*central part of the building*...] caratterizzante l'intero edificio da altre parti che lo compongono.

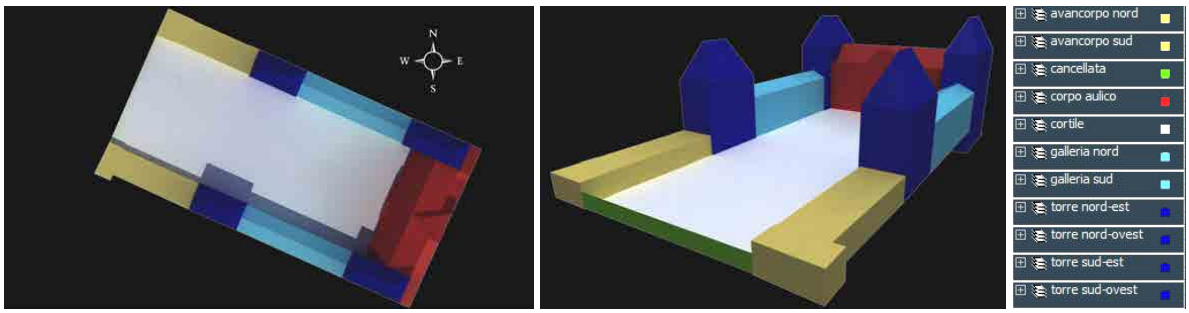


Figura 15.1.: planimetria del complesso e vista prospettica con l'evidenziazione delle diverse unità volumetriche componenti (LOD2).

Gli attributi che definiscono le caratteristiche della classe *Building* sono *class, function, usage, yearOfConstruction, yearOfDemolition, roofType, measuredheight, storeysAboveGround, StoreysBelowGround, storeysHeightsAboveGround* e *storeysHeightsBelowGround*. Questi attributi contribuiscono a definire le caratteristiche principali di un edificio. Le prime tre, *class*, *function* e *usage*, esprimono una classificazione tipologica e funzionale degli edifici. I valori dei loro attributi, espressi da un codice numerico, sono associati una *codelist* esterna basata sulla classificazione ALKIS/ATKIS del catasto tedesco. L'attributo *class* definisce la tipologia edilizia prevalente. L'attributo *function* invece caratterizza in maniera più dettagliata la destinazione d'uso dell'edificio associata in fase di progettazione alla tipologia edilizia. È possibile specificare inoltre una destinazione d'uso differente da quella originale tramite l'attributo *usage*. Le *codelist* dei valori di function e usage sono identiche e comprendono una più di 200 possibili

[2] IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 203.

valori, mentre la *codelist* dei valori di *class* è più limitata e comprende 19 valori. Nel caso studio in oggetto la tipologia edilizia è quella abitativa con funzione residenziale, essendo il complesso appunto progettato come residenza di loisir per i Duchi di Savoia. Considerato che questi tre attributi contribuiscono a definire le caratteristiche principali dell'intero edificio e che queste caratteristiche sono grosso modo identiche per tutte le unità volumetriche che compongono il Castello del Valentino, sono stati pertanto implementati i seguenti valori degli attributi della classe *Building*: *class*=1000 (abitazione) e *function*=1000 (residenziale). La destinazione d'uso universitaria, risalente alla fine del 1800, è stata specificata invece tramite il valore dell'attributo *usage*=2100 (università). Una differenziazione a livello della classe *BuildingPart* probabilmente potrebbe diventare necessaria nel momento in cui gli ambienti del corpo aulico assumessero la destinazione d'uso principale di museo. Al momento essi sono ancora luogo di importanti funzioni amministrative legate all'università che ospita, decisamente prevalenti rispetto alla destinazione museale. Nell'Appendice 8 è specificata la codifica di questi valori. Gli altri attributi che caratterizzano la classe *_AbstractBuilding* sono l'anno di costruzione e demolizione, la tipologia di tetto, l'altezza da terra, il numero dei piani fuori terra e interrati e l'altezza media degli stessi. Questo secondo set di attributi è stato implementato invece al livello della classe *BuildingPart* perché è appunto a questo livello che i valori di questi attributi si manifestano differenziando appunto le caratteristiche delle singole unità volumetriche che compongono l'edificio.

Altri due attributi importanti per classificare gli edifici sono *yearOfConstruction, yearOfDemolition* che permettono di specificare l'informazione temporale generica del *_CityObject* (*creationDate* e *terminationDate*) con quella relativa alla costruzione dell'edificio. Questa caratteristica è stata implementata al livello delle *BuildingPart* perché come abbiamo visto il Castello è composto da diverse unità edificate in tempi differenti. L'attributo *roofType,* permette di specificare la tipologia di copertura, anch'essa come i primi tre attributi codificata da una *codelist.* L'attributo *measuredHeight* permette invece di specificare l'altezza misurata espressa per mezzo della specificazione del valore e dell'unità di misura. Gli altri attributi *storeysAboveGround, StoreysBelowGround, storeysHeightsAboveGround* e *storeysHeightsBelowGround* permettono invece ci specificare il numero di piani fuori terra o interrati e di specificarne inoltre l'altezza.

Nel caso in oggetto, trattandosi di un edificio che segue l'impostazione planimetrica di derivazione francese dei padiglioni (o torri) collegati da maniche principali e/o gallerie delimitanti una corte interna, la relazione di aggregazione mantenuta tra le parti e l'edificio è stata modellata come una relazione compositiva. Tutte le parti pertanto sono occorrenze della stessa classe *BuildingPart* mentre l'unica occorrenza della classe *Building* è definita, a seconda del LOD, o come l'edificio per intero senza partizioni oppure come l'insieme delle parti. Un'alternativa poteva essere rappresentata dall'implementazione della manica principale (corpo aulico) come occorrenza della classe *Building* e invece tutte le altre unità come occorrenza della classe *BuildingPart* definendo così un diverso valore alla parte considerata principale rispetto alle altre. La scelta di utilizzare una relazione compositiva è stata dettata dall'aderenza del concetto di *BuildingPart* alle caratteristiche spaziali dell'oggetto, prescindendo da altre proprietà. Essendo questa tipologia di edificio a corte definita dall'aggregazione di parti diverse e dalla loro diversa forma (padiglioni, gallerie e maniche principali) la scelta più congruente è parsa quella di implementarle tutte come occorrenze della stessa classe. Tutte le relazioni definite al livello della classe astratta *_AbstractBuilding* sono ereditati dalle sue spe-

cializzazioni *Building* e *BuildingPart* come gli attributi. Questo meccanismo permette, per quanto concerne la relazione di aggregazione *consistsOfBuildingPart* che lega *_AbstractBulding* e *BuildingPart* la possibilità di definire aggregazioni ricorsive nelle quali ogni parte dell'edificio risulta a sua volta suddivisa in altre parti. Tutte le relazioni che legano le altre classi del modulo con la classe astratta possono essere quindi esplicitate sia al livello della classe *Building* o *BuildingPart*.

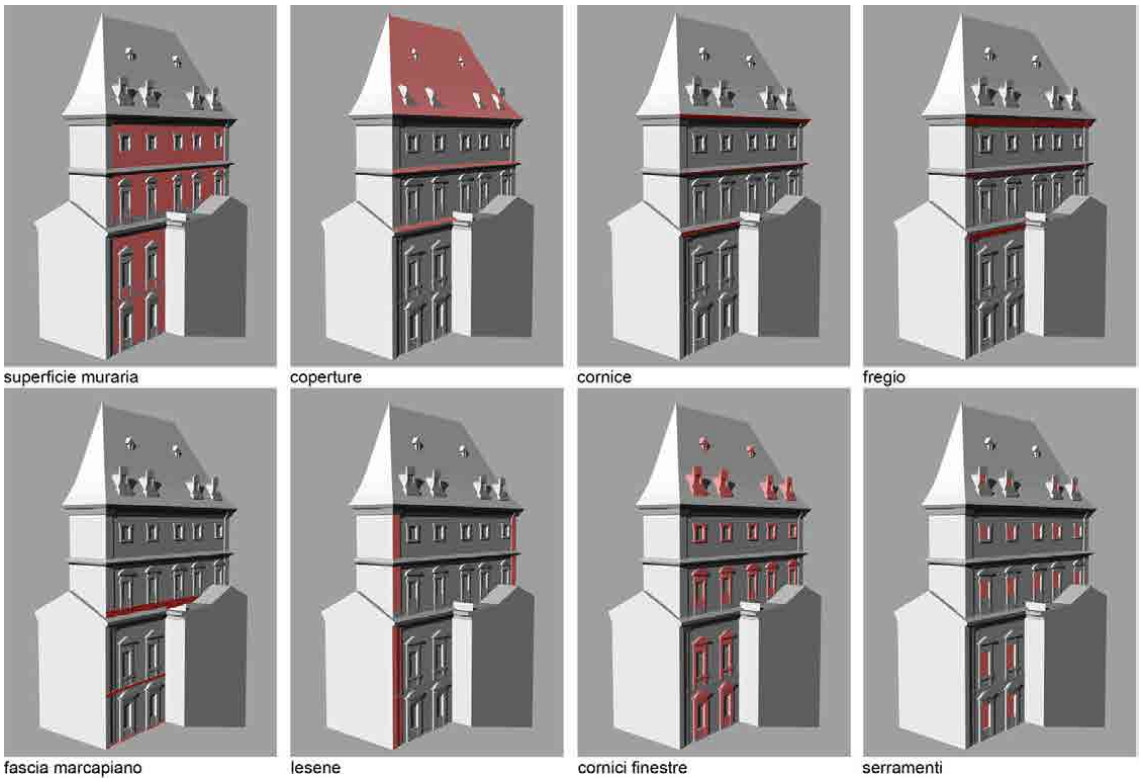


Figura 15.2.: classificazione degli elementi architettonici costituenti l'apparato decorativo al LOD3.

Per poter mettere in relazione il modello di superficie che descrive l'andamento del terreno nel cortile aulico con le altre componenti dell'edifico è stato implementato anche in questo modulo utilizzando la classe *gml::MultiSurface* permettendo quindi di rappresentare la sua funzione importante rispetto alla definizione della tipologia di edificio. Il cortile aulico, realizzato con una pavimentazione di ciottoli di fiume di diverso colore che compongono un elaborato disegno geometrico, costituisce infatti l'elemento generatore della tipologia a corte che è appunto definita dallo sviluppo degli edifici attorno ad uno spazio aperto che viene ad assumere quindi un'importante funzione tipologica. Il modulo prevede la possibilità di integrare nel contenuto geometrico delle classi *gml::MultiSurface* e *gml::Solid* associato alle classi tematiche *Building* e *BuildingPart* anche una *gml::MultiCurve* tramite le due relazioni *lod2-4MultiCurve* e *lod1-4TerrainIntersection*. Relazioni multiple tra le classi tematiche e quelle geometriche permettono di associare alla stessa feature diversi contenuti geometrici, contenuti che nel caso delle relazioni multiple *lod1-4MultiSurface* e *lod1-4Solid* permettono avere oggetti con una geometria multivalente in funzione del livello di dettaglio, mentre le relazioni con primitive geometriche diverse permettono di integrare allo stesso livello di dettaglio contenuti geometrici diversi, creando cioè degli oggetti complessi formati

da primitive n-dimensionali, con n variabile. Questo tipo di aggregazione è definita dagli standard ISO:19107 e OGC GML come *Complex*. Il *Complex* come l'*Aggregate* definisce uno spazio topologico connesso, ma a differenza del secondo non deve essere formato da primitive geometriche della stessa dimensione. Nel loro complesso queste relazioni permettono quindi di creare anche modelli costituiti da aggregazioni di solidi, superfici e linee. Le relazione *lod1-4TerrainIntersection* è simile alla *lod2-4MultiCurve* ma permette di qualificare diversamente il contenuto delle linee e cioè le linee di terra che definiscono il contorno nello spazio $\mathbb{R}^3$ dell'intersezione del modello dell'edificio con quello del terreno. Come vedremo nella fase di serializzazione del modello questa tipologia di oggetto geometrico presenta una strutturazione geometrico-topologica delle sue componenti più elaborata da realizzare.

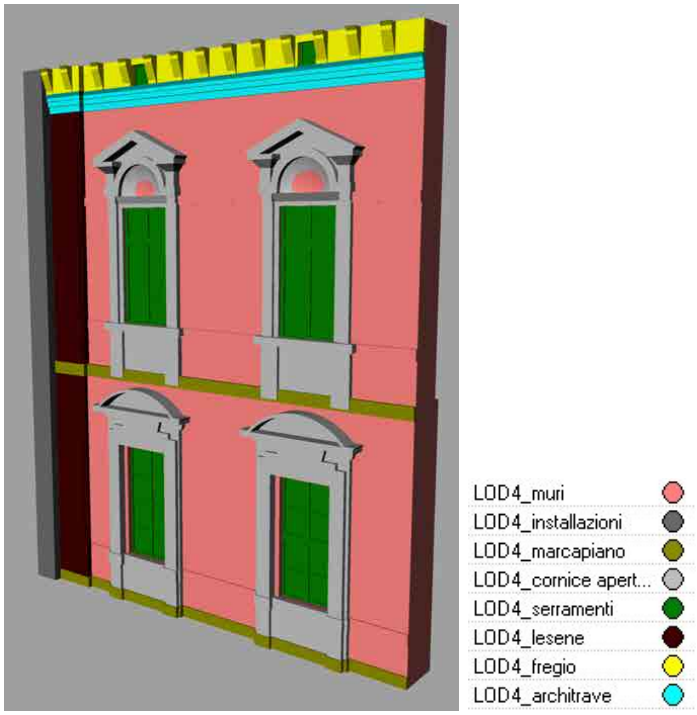


Figura 15.3.: classificazione degli elementi architettonici al LOD4.

Tutte le altre classi appartenenti al modulo *Building* sono specializzazioni di *CityObject*, la superclasse da cui discendono anche *Building* e *BuildingPart*. Una di queste specializzazioni è *BuildingInstallation*, indicata per modellare tutti gli elementi esterni accessori ad un edificio come camini, abbaini o scale. Essa è legata da una relazione di aggregazione *outerBuildingInstallation* con la classe *_AbstractBuilding*. *BuildingInstallation* è stata utilizzata per modellare la cancellata esterna che chiude la corte interna verso ovest, la quale, venendo a configurarsi come un elemento caratterizzante la forma planimetrica, non poteva essere unita ad una delle parti dell'edificio e nemmeno essere considerata come unità volumetrica autonoma. Quest'elemento è stato quindi implementato come occorrenza di *BuildingInstallation*, mentre la relativa relazione *outerBuildingInstallation* è stata legata alla classe *Building*, essendo appunto quest'elemento parte caratterizzante l'edifico nel suo complesso. Un altro elemento modellato come occorrenza di questa classe è la scalinata esterna di accesso dal lato Po (est), la quale a differenza della cancellata è un elemento che per la sua configurazione

spaziale è integrata in una parte dell'edificio, nello specifico manica principale o corpo aulico. La relazione di aggregazione *outerBuildingInstallation* tra quest'elemento, occorrenza della classe aggregata (*BuildingInstallation*), e la sua aggregazione, occorrenza della classe *BuildingPart*, è stata pertanto esplicitata a questo livello e non a quello del *Building*. La classe *BuildingInstallation* è caratterizzata da tre attributi con nome e tipologia di dato identica a quella degli attributi della classe *_AbstractBuilding*: *class*, *function* e *usage* associati ad un *codelist* diversa. A proposito dell'utilizzo delle *codelist* è importante specificare che questi dizionari proposti non sono vincolanti, ma rappresentano una suggestione espressa dal gruppo di ricerca SIG3D che ha sviluppato lo standard CityGML[3]. Il processo di armonizzazione della modellazione urbana, di cui fa parte l'adozione di vocabolari comuni, è una delle finalità principali del progetto comunitario INSPIRE, cui partecipa il progetto EuroSDR di cui fa parte anche lo standard CityGML.

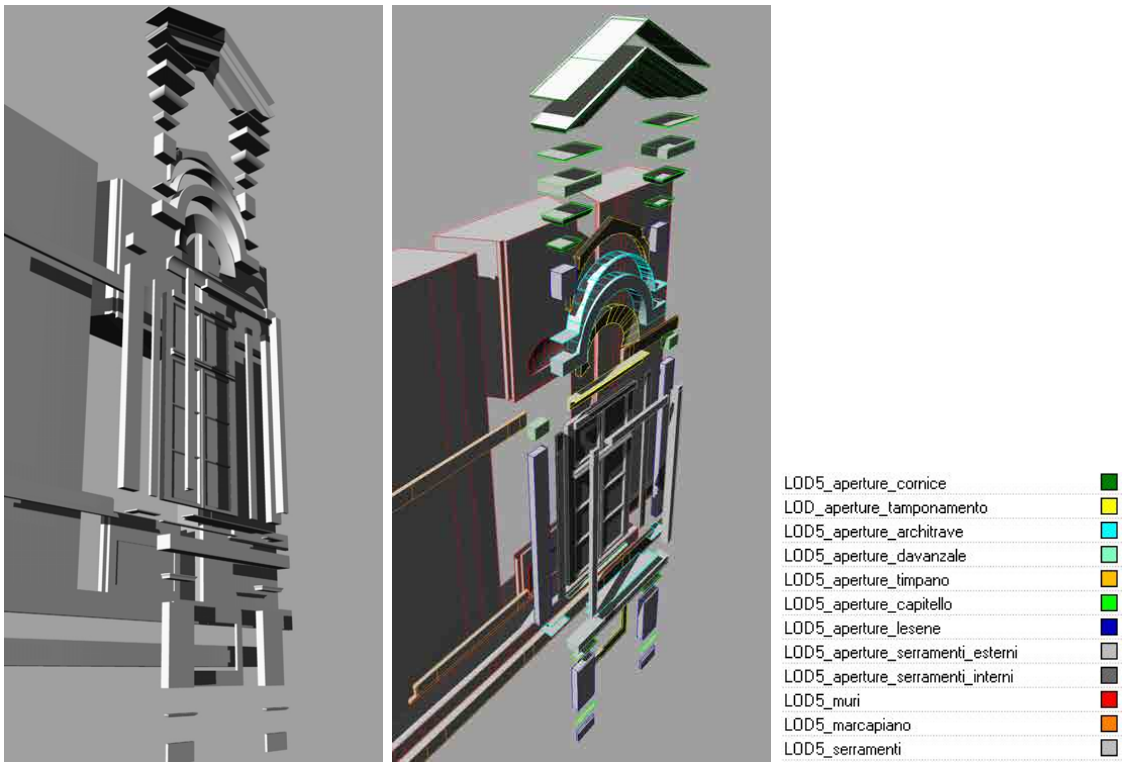


Figura 15.4.: rappresentazione degli elementi architettonici del modulo di una finestra (LOD4).

A partire dal LOD2 sono state modellate le diverse parti componenti le unità volumetriche quali superfici murarie esterne, coperture e superficie di terra. Le classi utilizzate (*WallSurface*, *RoofSurface* e *GroundSurface*) sono tutte specializzazioni della classe astratta *_BoundarySurface*, specializzazione a sua volta di *CityObject* e legata all'*_AbstractBuilding* da una relazione di aggregazione *boundedBy*. Successivamente

[3] «*These files are located in a folder named Codelists, which comes with the CityGML schema document, but is not a normative part of this schema, since it may be modified, augmented, or replaced by other communities. The actual values in the files in the folder Codelists are a suggestion of the SIG 3D.*» OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, Capitolo 10.12 p.107.

sono state implementate le due classi *Window* e *Door* entrambe specializzazioni della classe astratta *_Opening* che è in relazione con l'altra classe astratta *_BoundarySurface* tramite una relazione di aggregazione *opening*. Questo meccanismo permette la modellazione delle aperture (porte e finestre) che caratterizzano le superfici esterne degli edifici. Infine è stata implementata anche la classe *Room* per la sola parte di superficie muraria interna della facciata sud nella torre sud-est approfondita fino al massimo livello di dettaglio.

15.2. Il modello del terreno

La struttura del modulo *Relief*, a differenza del *Building*, è orientata alla rappresentazione delle caratteristiche fisiche del terreno e quindi essenzialmente alla rappresentazione della struttura geometrica e topologica del contenuto. Le classi semantiche sono messe in diretta relazione con le corrispettive geometriche e contribuiscono in maniera integrale alla definizione del contenuto geometrico. Questo modulo infatti risulta molto più caratterizzato dal punto di vista delle relazioni tra le classi tematiche e quelle geometriche. È possibile scegliere tra 4 classi tematiche, ognuna in relazione con la rispettiva classe geometrica: *TINRelief*, *MassPointRelief*, *BreaklineRelief* e *RasterRelief*. Alla prima classe sono associate le due classi geometriche *gml:TriangulatedSurface*, in cui la triangolazione è esplicitata e *gml:TIN* che invece descrive implicitamente attraverso attributi, la geometria di base utilizzata per l'interpolazione, lasciando il procedimento di calcolo agli strumenti applicativi per la gestione dei dati. *MassPointRelief*, in relazione con la classe *gml:MultiPoint*, è utilizzata per i modelli del terreno formati da una collezione di punti di quota, mentre *BreaklineRelief*, legata alla classe geometrica *gml:MultiCurve* è quella utilizzata per descrivere l'andamento del terreno in modo discreto. In questa classe è possibile implementare tutte le tipologie di rappresentazione discrete dell'andamento del terreno che fanno uso di linee per definire le zone di discontinuità (*breakline*), ma anche la rappresentazione per isocline ovvero linee che definiscono porzioni di superficie che presentano la stessa elevazione. L'utilizzo delle classi geometriche *gml:MultiCurve*, *gml:MultiPoint* e *gml::TIN* necessita della specificazione di un estensione della superficie per mezzo di un poligono. Essendo queste classi geometriche legate ad una rappresentazione implicita del modello del terreno, l'estensione è necessaria per limitare il raggio di ricerca utilizzato nell'interpolazione dei dati. L'estensione del modello del terreno viene specificata tramite la relazione *extent* che lega la classe *ReliefComponent*, e quindi le sue specializzazioni *TINRelief*, *MassPointRelief*, *BreaklineRelief* e *RasterRelief*, con la classe *gml::Polygon*.

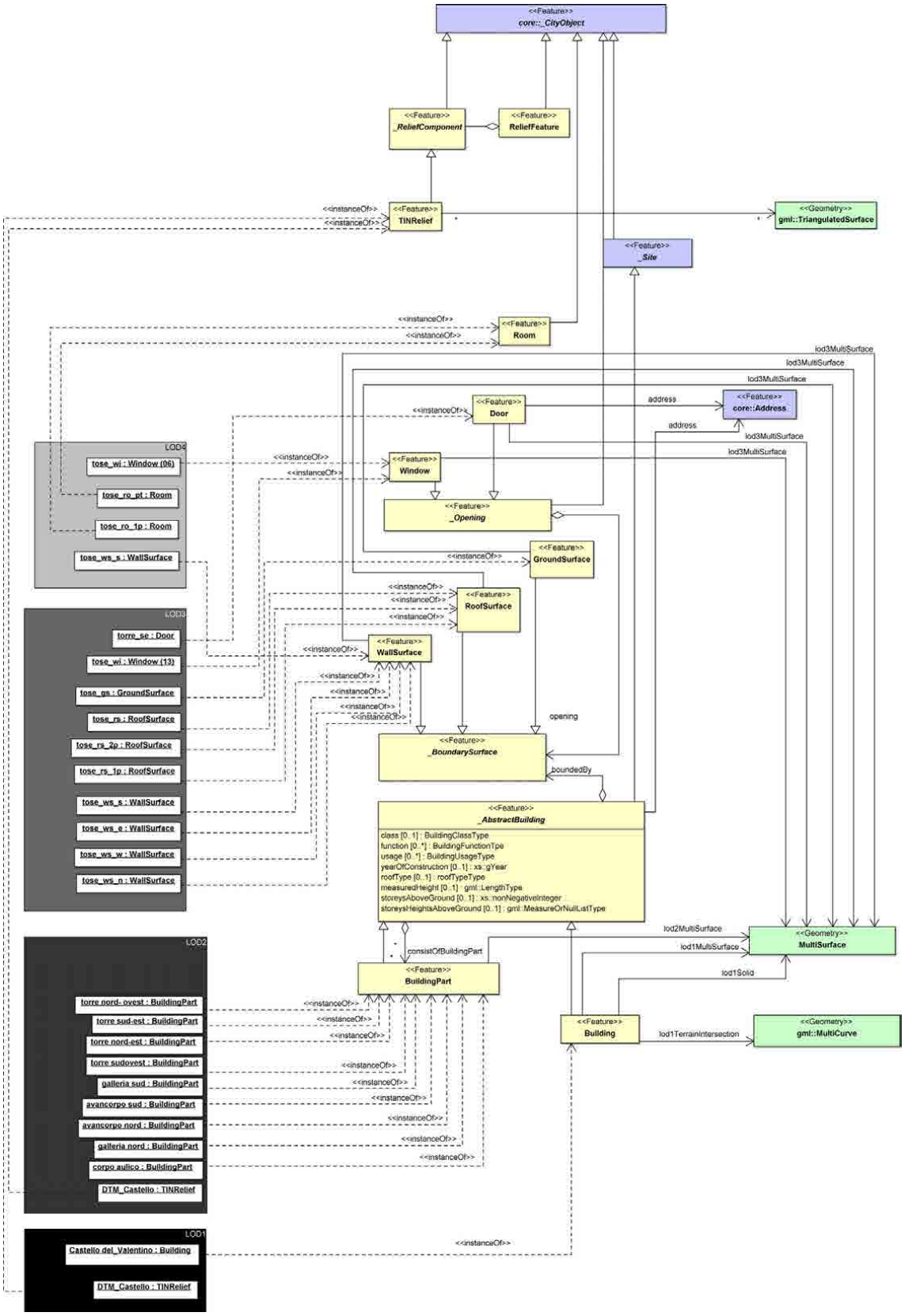


Figura 15.5.: diagramma UML ad oggetti dell'implementazione delle classi CityGML(LOD1-4).

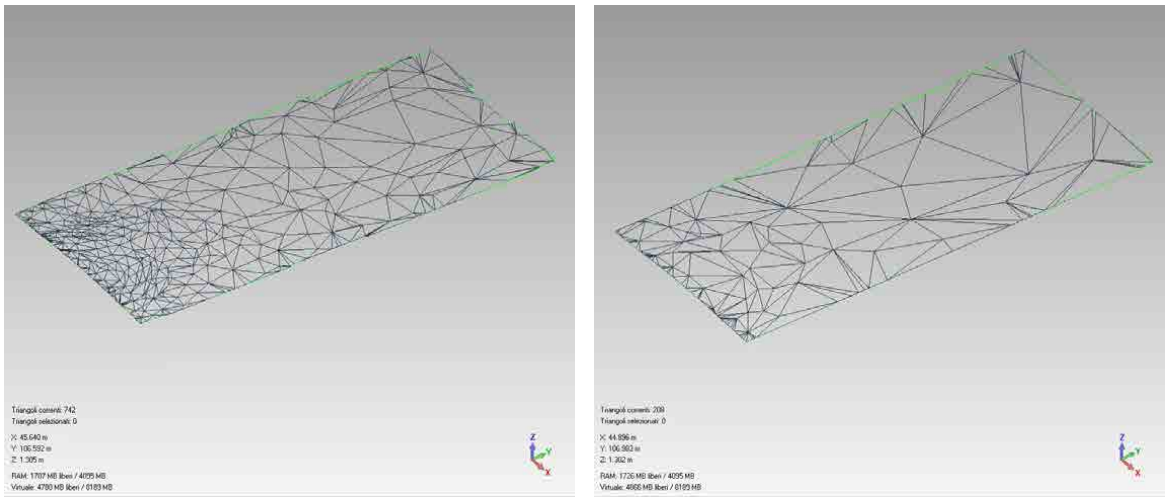


Figura 15.6.: decimazione del modello del terreno originale in scala 1:100: LOD2 742 triangoli (sinistra), LOD1 208 triangoli (destra).

15.3. L'aspetto superficiale

Questo modulo è una delle funzionalità dello standard CityGML che contribuiscono a caratterizzare semanticamente il contenuto geometrico dei dati della cartografia urbana. Esso, grazie all'integrazione nello standard degli strumenti per la modellazione virtuale dei sistemi CAD, permette di definire le caratteristiche fisiche dei materiali che associate a determinate condizioni ambientali di illuminazione determinano la resa fotorealistica degli oggetti. Il modulo permette di definire due tipologie di dati relativi all'aspetto delle superfici tramite le classi: *X3DMaterial* e *_Texture*. Nella prima classe è possibile implementare i parametri che definiscono la risposta della superficie a determinate caratteristiche di illuminazione ed è utilizzata in genere per modellare delle caratteristiche che corrispondono ad una situazione di progetto.

La disposizione del dataset metrico di partenza dei dati raster costituiti dai fotopiani e dall'ortofoto associati direttamente al modello vettoriale per mezzo dei sistemi di riferimento locali usati per il fotoraddrizzamento e l'ortoproiezione ha reso possibile implementare questi dati utilizzando gli strumenti delle applicazioni CAD automatizzando il processo. Questi strumenti consentono di definire al livello del singolo oggetto un sistema di riferimento determinato in modo automatico sulla base della forma geometrica dell'oggetto. Tramite i meccanismi di indicizzazione del MBR e MBV gli applicativi CAD determinano automaticamente l'inviluppo convesso di ciascun oggetto. A questo inviluppo viene associato un sistema di rifermento oggetto che viene utilizzato in tutte operazioni di trasformazione incluse quelle di mappatura delle *texture*. Questo sistema di riferimento può anche essere controllato e modificato a seconda delle esigenze. Il sistema di proiezione dell'immagine sull'oggetto è di tipo geometrico e prevede l'utilizzo di un serie di gabbie di proiezione che definiscono l'inviluppo della superficie sulla quale si vuole proiettare l'immagine. Queste gabbie sono rappresentate da una serie di primitive diversamente sviluppabili sul piano il cui sistema di riferimento viene automaticamente determinato sulla base dello stesso inviluppo convesso utilizzato per la determinazione del sistema di riferimento oggetto. La presenza nel nostro caso di un meccanismo di proiezione molto semplice (quella ortogonale) associata al

vantaggio rappresentato dall'automazione del processo di indicizzazione dell'inviluppo della superficie ha permesso di considerare trascurabile l'inevitabile errore derivante dal sistema di proiezione basato su un approccio geometrico a differenza di uno analitico[4]. Diversamente si sarebbero potute implementare le *texture* andando a specificare direttamente le coordinate immagine e quelle del modello per mezzo dell'URI (*Uniform Resource Identifier*) del *gml::LineraRing*. Quest'ultimo definisce contorno del *gml::Polygon* che è il tipo di superficie piana più semplice. Questo contorno, nel caso delle superfici triangolate che come vedremo sono le uniche ad essere al momento pienamente supportate da tutti i sistemi applicativi, corrisponde al contorno di ciascun triangolo che forma la superficie. Nel modello LOD 2 queste superfici sono costituite nella maggior parte dei casi da quadrilateri, ciascuno scomposto in due triangoli. Nei livelli di dettaglio successivi l'approssimazione di superfici non piane ottenuta tramite la triangolazione inevitabilmente genera un numero alto di triangoli. Questo significa che è necessario specificare le coordinate immagine di ogni *gml::LinearRing* che costituisce il bordo del triangolo che rappresenta una porzione di superficie, scomponendo cioè anche l'immagine da proiettare nelle facce piane su cui deve essere proiettata. La scelta di implementare in modo automatico quest'informazione diventa quini un esigenza imprescindibile nel caso di implementazione di modelli *mesh* complessi.

L'utilizzo di formati dedicati allo scambio di questo tipo di informazioni come VRML, 3DS, ampiamente supportati dai principali software di modellazione CAD, permette l'esportazione delle caratteristiche di aspetto superficiale degli oggetti come materiali e *texture* oltre che dei parametri di illuminazione e delle viste personalizzate. Il collegamento con i file esterni viene effettuato con lo stesso meccanismo dell'URI creando una cartella nello stesso percorso dove si trova il modello geometrico da esportare codificata automaticamente e registrata come URI direttamente nel modello insieme alle coordinate di mappatura. Questo schema è utilizzato anche dal formato CityGML tramite la creazione di una cartella denominata "*nomemodello_Appearance*" nello stesso percorso dove è memorizzato il modello in un unico file con estensione '*nomemodello.gml*'.

I fotopiani originali in scala 1:50, che avevano una dimensione media del *pixel* a terra di circa 0.7 cm, sono stati quindi ritagliati sulla base della proiezione del contorno della superficie sull'immagine reso possibile dall'integrazione nel sistema di riferimento del modello delle immagini da proiettare. Le immagini ritagliate sono state quindi ricampionate e utilizzate per la mappatura delle *texture*. Nel ricampionamento è stata impostata la dimensione minima del pixel: 4 cm per il LOD2, 2 cm per il LOD3 e 1 cm per il LOD4.

[4] Questo è valido sia per i fotogrammi acquisiti sulle facciate che sono stati restituiti tramite fotoraddrizzamento e quindi proiettati sul piano medio della facciata, che per l'ortofoto del cortile che viene anch'essa proiettata ortogonalmente sulla superficie 2.5D utilizzata per l'ortoproiezione

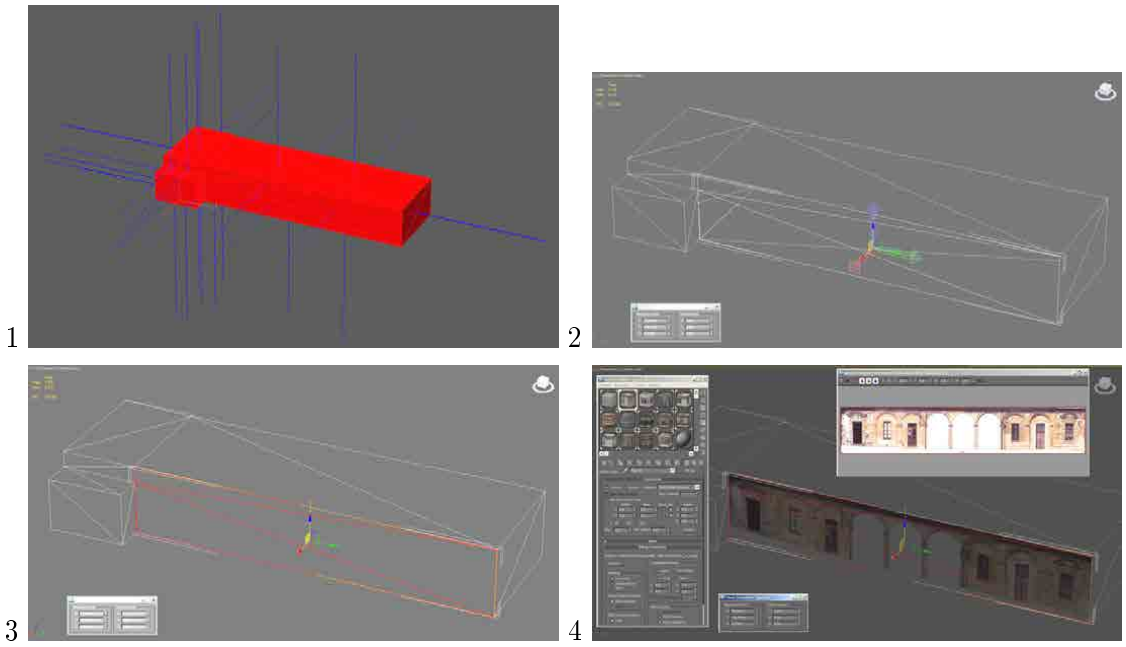


Figura 15.7.: procedure di proiezione delle *texture*: controllo delle normali (1), impostazione del sistema di riferimento oggetto (2), creazione del sistema di proiezione nello stesso sistema di riferimento oggetto (3), trasformazione delle coordinate immagine in quelle oggetto (4).

16. Serializzazione

La serializzazione di un modello dei dati, tradotto dal modello concettuale nella sua forma logica, prevede la scrittura delle informazioni secondo un determinato formato di codifica ovvero la sua trasformazione in un oggetto riproducibile. Il procedimento di scrittura oltre che dal tipo di formato utilizzato dipende anche dal sistema di memorizzazione fisica dei dati sul supporto fisico (*file system*). Nel campo della rappresentazione delle informazioni spaziali e in particolare quelle geografiche si possono distinguere due modalità principali con cui questo meccanismo si esplica: la memorizzazione di tutte le informazioni geometriche e tematiche in un unico file (cui eventualmente possono essere associati altri file tramite *link*) e la memorizzazione dei dati in un sistema di cartelle che solitamente hanno una codifica prefissata nello standard. Il primo caso è quello più utilizzato dalla maggior parte dei sistemi CAD. In questi sistemi infatti l'informazione tematica solitamente è associata in modo diretto a quella geometrica secondo il meccanismo che abbiamo descritto nel Capitolo 5 della parte precedente. Ci sono alcuni formati di codifica ampiamente usati in questo campo per l'interscambio dei dati, come per esempio il formato proprietario *.shp* della ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) e il formato *.kml* del'OGC, molto diffuso per lo scambio dei dati geografici nel web. La maggior parte dei sistemi GIS e in particolare quelli che si basano sul modello relazionale, spesso utilizzano il sistema di archiviazione delle informazioni tramite la struttura a cartelle codificate dal sistema applicativo. La differente tipologia di archiviazione dipende sia dalle caratteristiche dell'oggetto che dal tipo di struttura logica che sottintende a quella fisica. Nei documenti XML ad esempio, la struttura nidificata delle informazioni permette di riuscire organizzarle in un insieme strutturato dove le relazioni tra gli elementi sono esplicite e quindi i documenti XML, che possono essere a tutti gli effetti gestiti come database dai sistemi applicativi che li supportano, sono strutturati in un unico file in cui sono esplicitate le relazioni e le caratteristiche dei dati tramite lo schema XSD. Nei modelli relazionali invece la struttura evidente è quella costituita da tutte le tabelle che contengono i dati, mentre le relazioni tra esse sono implicite nei collegamenti tra le tabelle e vengono esplicitate nel momento in cui si interroga il database. Il sistema di codifica a cartelle è pertanto necessario per permettere al database di riuscire a gestire una serie numerosa di tabelle. Il formato CityGML, analogamente ai documenti XML, permette di memorizzare tutte le informazioni in un unico file cui possono eventualmente essere collegati tramite cartelle ai riferimenti esterni come per esempio le immagini utilizzate come *texture*. Come abbiamo visto lo standard CityGML rappresenta un notevole sforzo verso l'integrazione tra i modelli di dati che si stanno diffondendo in ambito CAD, come il BIM, e quelli in uso nell'ambito della modellazione dei dati geografici. L'integrazione tra i due sistemi è ancora oggetto di studi e ricerche e rappresenta un obiettivo ancora lontano, ma sicuramente raggiungibile seguendo il percorso tracciato fin'ora.

La base di dati di partenza presenta una struttura semantica molto elementare, tipica dei sistemi CAD che sono indirizzati essenzialmente alla gestione del dato geometrico

ed è costituita da un insieme eterogeneo di dati elaborati e scritti con sistemi applicativi diversi, CAD e GIS principalmente. Il passaggio da un insieme eterogeneo di dati geometrici non strutturati semanticamente ad un modello semantico altamente organizzato, come il CityGML, ha quindi necessitato di un approccio all'implementazione dei dati orientato verso la loro completa ristrutturazione piuttosto che ad una semplice traduzione o conversione dei dati. La scelta dello strumento applicativo è quindi ricaduta su un software che supportasse tutte le classi tematiche e geometriche del modello semantico CityGML permettendone la scrittura e soprattutto il controllo completo sui meccanismi di integrazione dei dati. Questo meccanismo di integrazione è stato possibile per mezzo di un *tool* grafico che permette di rappresentare in forma schematica tutte le procedure di ristrutturazione del contenuto tematico e di quello geometrico. A tal proposito è opportuno sottolineare che il formato CityGML introdotto recentemente e ora giunto alla versione 1.0 non è ancora supportato dai principali *software* GIS e CAD. Alcuni applicativi GIS stanno iniziando a integrare il supporto del formato GML mentre stanno iniziando a comparire sul mercato i primi strumenti in grado di modificare e gestire il database XML per mezzo di un interfaccia grafica similmente agli strumenti applicativi GIS. La visualizzazione dei modelli CityGML invece è supportata da parte di diversi programmi *freeware* e *open-source*. Uno dei pochi strumenti a disposizione sul mercato per la lettura e scrittura del formato CityGML è la suite FME della canadese Safe Softwares. Il software supporta una vasta gamma di formati in uso nell'ambito dei Sistemi Informativi Spaziali e della grafica vettoriale e raster, è inoltre presente un potente modulo applicativo (*Workbench*) in grado di leggere le caratteristiche geometriche e gli attributi in forma di schema e di operare trasformazioni sia sul contenuto semantico che su quello geometrico. La necessità di passare da un livello di strutturazione basso dei dati (CAD) ad uno molto più alto (CityGML) e i diversi approcci e linguaggi adottati da questi due sistemi ha determinato quindi la scelta di questo strumento applicativo.

Uno dei primi meccanismi dello standard CityGML che sono stati analizzati ai fini della sua realizzazione è il supporto multiscala. La possibilità di gestire contemporaneamente diversi LODs associati alla stessa feature è una delle caratteristiche più innovative di tutto lo standard e nello stesso tempo una delle meno supportate dai principali sistemi applicativi CAD e GIS. Lo strumento che abbiamo utilizzato implementa questo meccanismo associando il LOD ad una determinata proprietà geometrica che formalizza la relazione tra la classe geometrica e quella tematica negli schemi UML di CityGML. Le proprietà geometriche sono quelle che derivano direttamente dalla tipologia del dato, cioè sono implicite nella natura geometrica e metrica. Concettualmente sono una cosa diversa rispetto a quelli che siamo soliti definire attributi. Tutti gli oggetti appartenenti alla stessa tipologia o primitiva geometrica possiedono le stesse proprietà mentre possono avere una serie arbitraria di altri attributi diversi. Nei DBMS relazionali questa distinzione non è esplicita in quanto secondo questo modello tutto si può rappresentare come relazioni qualificate dai valori degli attributi che ne compongono l'insieme e gli oggetti non possiedono un'identità propria. I meccanismi del metalinguaggio XML, da cui GML e CityGML derivano, permettono di modellare i dati con costrutti simili a quelli dell'approccio ad oggetti e quindi rappresentare meglio la complessità della realtà e la sua natura multivalente. Questo meccanismo permette di specificare l'attributo del LOD di una *feature* tramite la relazione con l'istanza della classe geometrica. Ad ognuno dei modelli divisi per LOD è stato quindi implementato

questo attributo che poi è stato integrato nelle proprietà geometriche.

Un'altra delle caratteristiche principali del modello semantico CityGML è il meccanismo di ereditarietà, caratteristica principale della modellazione ad oggetti. Anche questa caratteristica è stata definita con un attributo specifico (*parent_id*) che viene interpretato e utilizzato per la codifica dei dati permettendo la specializzazione delle classi. Similmente sono state definite anche le altre relazioni, come per esempio quella tra l'edificio e le sue parti (*consistsOfBuildingPart*) o quella tra l'involucro edilizio e le superfici che lo delimitano (*boundedBy).* Queste relazioni sono implementate dall'applicazione per mezzo di attributi che vengono anch'essi codificati nella forma di relazione nella fase di codifica XML.

Nello schema di ristrutturazione del *Workbench* sono rappresentati graficamente i diversi passaggi di ristrutturazione dei dati. Nella parte sinistra dello schema è stato suddiviso il dataset di partenza a seconda del LOD e dei moduli CityGML da implementare*: Relief* e *Building*, l'*Appearance* invece come abbiamo visto è stato implementato in modo automatico integrandolo con il contenuto geometrico. Nel primo blocco di operatori sono stati rinominati gli attributi CAD e i nomi degli oggetti *mesh* che diventano *gml:name*, utilizzato poi in seguito per filtrare gli elementi nelle fasi successive. Nel secondo blocco di operazioni è stato definito il livello di dettaglio con il meccanismo descritto. Nel blocco più piccolo, centrale, sono stati definiti i parametri di rototraslazione per permettere di passare, grazie ad una rotazione e un spostamento rigidi, dal sistema di riferimento locale a quello globale scelto. Nel blocco più grande a destra, sono stati filtrate tutte le *feature* sulla base dei valori degli attributi definiti precedentemente e sono state aggregati i contenuti geometrici che devono essere associati alla stessa feature, come per esempio la linea di intersezione con il terreno. L'ultimo blocco a destra contiene le classi CityGML implementate. Questo è in sintesi la procedura adottata. Lo schema finale della ristrutturazione da CAD a CityGML è il risultato di un progressivo affinamento delle procedure a partire da un primo modello più semplice, comprendente due soli livelli di dettaglio, che è stato poi successivamente sviluppato e ampliato.

Sintetizzando le fasi di creazione dello schema di ristrutturazione dei dati da CAD a CityGML sono state:

1. suddivisione dei modelli a seconda del LOD e dei relativi moduli CityGML da implementare (*Building* e *Relief*);
2. codifica degli attributi CAD da implementare nel modello semantico CityGML; classificazione e aggregazione delle *feature* su base tematica;
3. definizione del LOD tramite attributi e loro codifica come proprietà geometriche;
4. definizione del sistema di riferimento;
5. filtraggio e definizione degli altri attributi delle *feature*;
6. assegnazione delle *feature* alle classi CityGML

Di seguito la corrispondenza tra le feature e le corrispettive classi CityGML implementate:

- dataset LOD1

  - CAD: modello dell'edificio diviso nelle sue unità volumetriche (*mesh*), intersezione con il modello del terreno (linee) → CityGML: classi tematiche: *Building* e *BuildingPart*; classi geometriche: *gml::MultiSolid, gml::MultiCurve.*

  - CAD modello del terreno (*mesh*) → CityGML: classi tematiche: *ReliefFeature, TINRelief* ; classe geometrica *gml::TriangulatedSurface.*

- dataset LOD2

  - CAD: modelli delle varie unità volumetriche (*mesh*), intersezione con il modello del terreno (multilinee) → Classi tematiche: *WallSurface*, *GroundSurface*, *RoofSurface*, *BuildingInstallation*; classe geometrica: *gml::MultiSurface.*

  - CAD: modello del terreno (*mesh*) → CityGML: classi tematiche: *ReliefFeature, TINRelief* ; classe geometrica: *gml::TriangulatedSurface.*

- dataset LOD3

  - CAD: modello della facciata di un unità volumetrica (*mesh*) → CityGML: classi tematiche: *WallSurface*, *RoofSurface*, *BuildingInstallation, Window, Door*; classe geometrica: *gml::MultiSurface.*

  - CAD: modello del terreno DTM isocline (multilinee) → CityGML: classi tematiche: *ReliefFeature, BreaklineRelief* ; classi geometriche: *gml::Multicurve, gml::Polygon.*

  - CAD: modello del terreno TIN (superficie triangolata) → CityGML: classi tematiche: *ReliefFeature, TINRelief* ; classe geometrica: *gml::TriangulatedSurface.*

- dataset LOD4

  - particolare della facciata approfondita al LOD3 (*mesh*) → CityGML: classi tematiche: *WallSurface, Room, Window, Door*; classe geometrica: *gml::MultiSurface.*

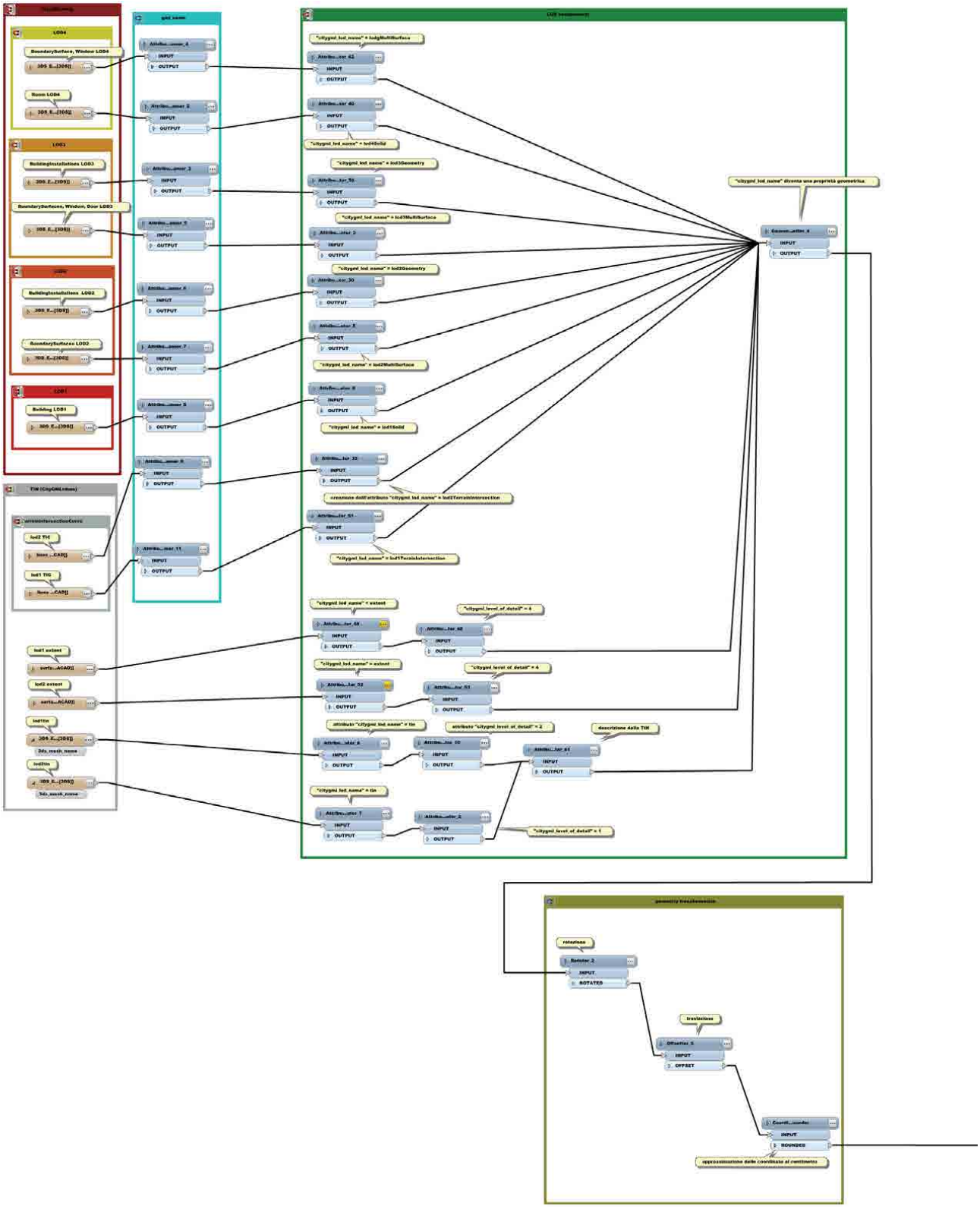


Figura 16.1.: ristrutturazione e traduzione dei dati CAD a GML per mezzo dell'interfaccia grafica FME WorkBench. Lo schema descrive in modo grafico le procedure di analisi e trasformazione dei dati da una fonte (sinistra), costituita dai diversi modelli del dataset, ad un output (destra) rappresentato dalle classi CityGML. Lo schema per comodità è stato diviso in due pagine.

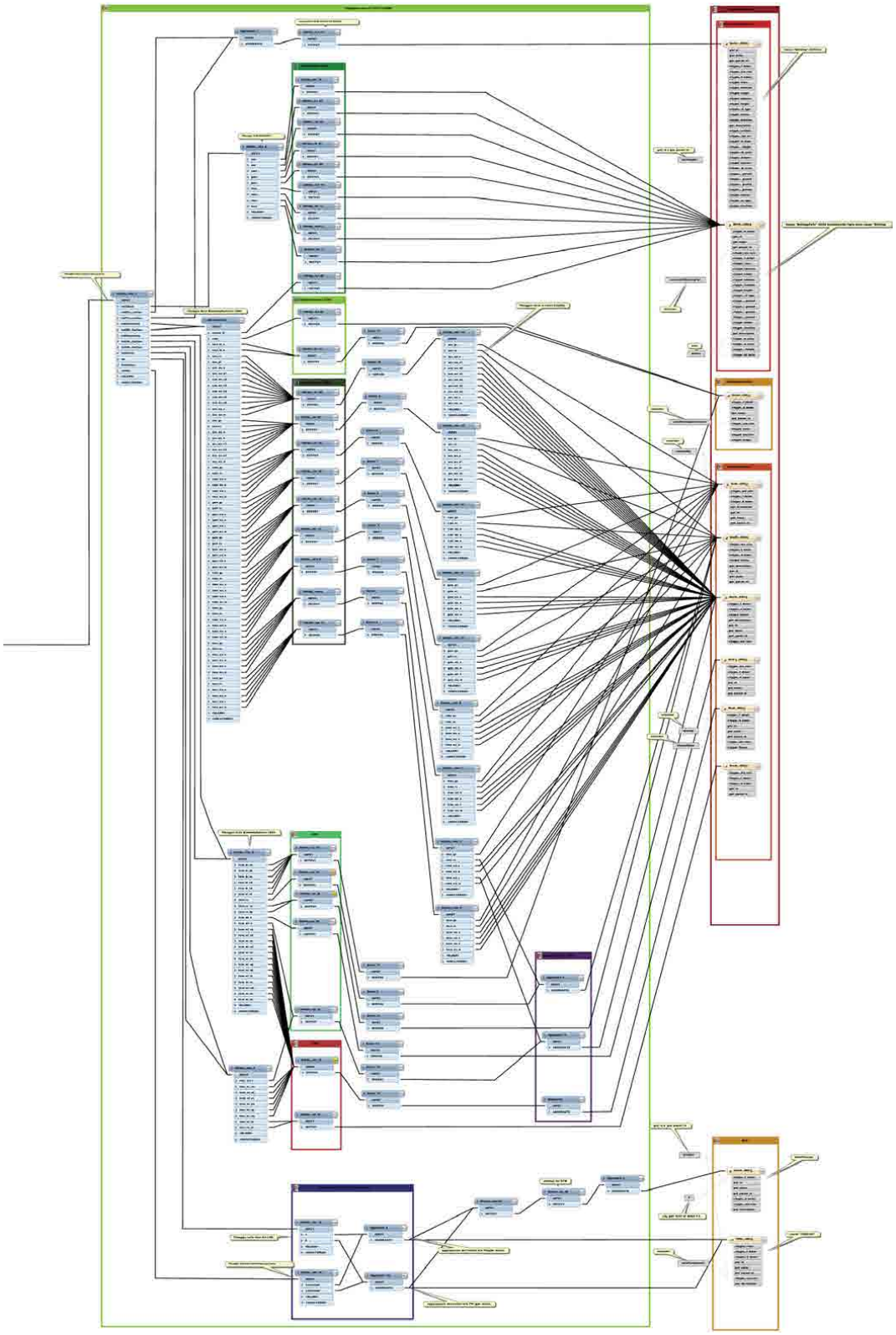


Figura 16.2.: parte destra dello schema nella figura precedente.

17. Gestione dei dati

In questo capitolo verranno presentati i risultati dell'implementazione del modello semantico CityGML e la sua gestione tramite gli strumenti applicativi della tecnologia XML. Verranno quindi descritte le procedure di implementazione in un GeoDatabase relazionale (Oracle Database 11g) e le modalità di gestione e analisi dei dati per mezzo di questo strumento applicativo.

17.1. XML database

La tecnologia XML inizia ad essere sviluppata nel 1998 con la prima finalità di strutturare documenti di testo per il web, successivamente si è allargato l'approccio *document-oriented* che ha caratterizzato il primo sviluppo di XML iniziando a sviluppare le potenzialità che questo strumento offre per la modellazione diverse tipologie di dati. Nel 2005 sono comparse le prime estensioni per permettere la gestione dei dati XML: *XQuery* e *XPath* che sono i meccanismi di estensione del linguaggio che permettono di strutturare le ricerche con un linguaggio formale e indicizzare la struttura dei documenti XML. Queste estensioni hanno permesso la nascita negli stessi anni dei primi database XML. Gli strumenti applicativi che sono stati sviluppati per gestire i dati si basano su queste estensioni e permettono di effettuare ricerche mirate all'interno della struttura del documento XML e specificare il percorso di ricerca. Una delle differenze fondamentali a livello applicativo tra i database XML e quelli relazionali, differenza che dipende dalla maggiore complessità della struttura logica XML rispetto a quella del modello relazionale, è nella struttura del database: un database XML è costituito da un applicazione che effettua una serie di operazioni di ricerca e modifica dei dati su un istanza di documento XML. Il documento XML costituisce la base di dati strutturata secondo uno schema logico codificato che deve essere esplicitato nelle operazioni di accesso alla base. Nei database relazionali invece la base di dati è costituita da un numero arbitrario di tabelle e la struttura logica della base non è esplicitata, ma è implicita nelle relazioni tra le tabelle. Ne consegue che se da un lato nei database relazionali è difficile risalire alla struttura logica dei dati ed effettuare operazioni di ricerca e modifica degli stessi se questa non è nota, le stesse operazioni di ricerca e modifica vengono fatte al livello delle tabelle e quindi direttamente sulle relazioni. Nei database XML la struttura invece è esplicitata tramite le dichiarazioni dei *namespace* e delle *SchemaLocation* che permettono all'applicazione di caricare gli schemi XML e validare il contenuto della base di dati. Gli stessi schemi forniscono all'operatore gli strumenti per accedere alla struttura dei dati specificando le tipologie di dato presenti (*datatype*), gli elementi presenti (*simple type* e *complex type*) e le relazioni (*property*). Le operazioni di modifica quindi nei database XML sono fatte al livello del documento ovvero della base di dati e non su singoli elementi che compongono la base e che corrispondono alle tabelle dei database relazionali.

Le applicazioni della tecnologia XML alla modellazione dei dati spaziali sono altrettanto recenti. Il linguaggio GML viene iniziato ad essere sviluppato a partire dal 2005, praticamente in contemporanea con il CityGML. A partire dalle prime formulazioni del linguaggio GML si è iniziato ad applicare i meccanismi di estensione che permettevano di strutturare le ricerche alla componente geometrica del dato. I linguaggi *GQuery* [13] e GQL [47] sono alcune di queste prime estensioni del linguaggio *XQuery* ai dati spaziali GML. Tramite questi strumenti è stato possibile implementare i dati in database *object-relational* (ORDBMS) specificando le procedure di *data loading*, ovvero di traduzione dal modello GML a quello ORDBMS, di traduzione dai linguaggi XQuery a SQL e di ricostruzione della struttura GML per permettere di trasformare i risultati delle query SQL in un documento GML [102].

Integrazione dei dati

L'editazione del codice GML, resa necessaria per superare alcuni limiti imposti dagli strumenti di scrittura CityGML della Safe Softwares, è stata l'occasione per sperimentare la possibilità di caratterizzare il modello con diversi aspetti superficiali degli oggetti secondo viste personalizzate. Il modulo *Appareance* è strutturato proprio per gestire le caratteristiche superficiale degli oggetti e permette di creare un numero arbitrario di temi *(themes)* o viste personalizzate dell'oggetto per mezzo dell'associazione del contenuto geometrico vettoriale con informazioni che caratterizzano l'aspetto superficiale dello stesso. Queste informazioni sono realizzate tramite un collegamento diretto con una rappresentazione del dato secondo formati codificati. La rappresentazione può essere specificato tramite parametri specifici oppure con un collegamento ad un formato esterno di rappresentazione costituito da un *grid* raster associato ai sistemi di proiezione. Questo modulo consente una ampia gamma di applicazioni alla caratterizzazione del contenuto geometrico per le finalità di comunicazione e visualizzazione dei modelli CityGML. Le superfici degli oggetti possono essere caratterizzate da una componente di rappresentazione grafica del dato che contribuisce alla comprensione immediata dell'informazione. Il meccanismo con cui viene realizzata questa rappresentazione consiste in un collegamento diretto ad un file esterno che contiene il dato tematico, cioè l'immagine raster. Questo contenuto non viene cioè implementato nel modello e gestito con delle classi e relazioni opportune, come per esempio nel caso delle *Coverage* di GML. In termini più rigorosi la tematizzazione del dato tramite questo meccanismo è effettuata per mezzo di una relazione diretta tra gli oggetti, in questo caso *SurfaceDataMember* ovvero le classi del modulo *Appearance*, e l'informazione tematica da descrivere. Questa relazione può essere espressa da parametri che modificano la realizzazione del dato geometrico nella fase di *parsing*[1] da parte del sistema applicativo, oppure da matrici di trasformazione nel caso dell'associazione con formati di rappresentazione codificati. Queste caratteristiche che vengono implementate possono contribuire a rappresentare determinati attributi degli oggetti, ma non permettono di gestire internamente il dato utilizzato per la caratterizzazione.

Per sperimentare l'applicazione di diversi temi al modello implementato è stato scelto di utilizzare questo meccanismo per permettere una immediata rappresentazione di un intervento di trasformazione dell'oggetto. La componente temporale del modello GML non è implementata direttamente in CityGML e le caratteristiche che descrivono

[1] Il *parsing* corrisponde alla decodifica del contenuto fisico del dato da parte dell'applicazione.

la dimensione temporale degli oggetti (*CityObjects*) è definita genericamente dagli attributi *yearOfConstruction, yearOfDemolition* che non permettono però di modellare le trasformazioni degli edifici che sono una caratteristica importante da rappresentare nel caso in cui questi edifici costituiscano un bene culturale. Una descrizione logica dell'informazione temporale è possibile solo integrando gli schemi temporali del linguaggio GML.

In questo esempio si è invece voluto utilizzare uno strumento applicativo per implementare un dato che rappresenta la trasformazione nel tempo tramite una tematizzazione diretta del contenuto tematico attraverso i fotopiani precedentemente integrati per rappresentare l'aspetto delle facciate. Sono stati acquisiti dei nuovi fotogrammi sulle stesse porzioni di facciate la cui forma geometrica non era stata modificata. I fotogrammi sono stati sottoposti a fotoraddrizzamento sulla base degli stessi punti di controllo a terra utilizzati nell'elaborazione degli altri fotopiani. Questi fotopiani hanno costituito la base tematica per descrive le caratteristiche dell'intervento di restauro sull'edificio attraverso la sua rappresentazione grafica diretta.

Sono stati così creati due *theme* uno per i fotopiani pre-restauro e uno per i fotopiani post-restauro.

Struttura

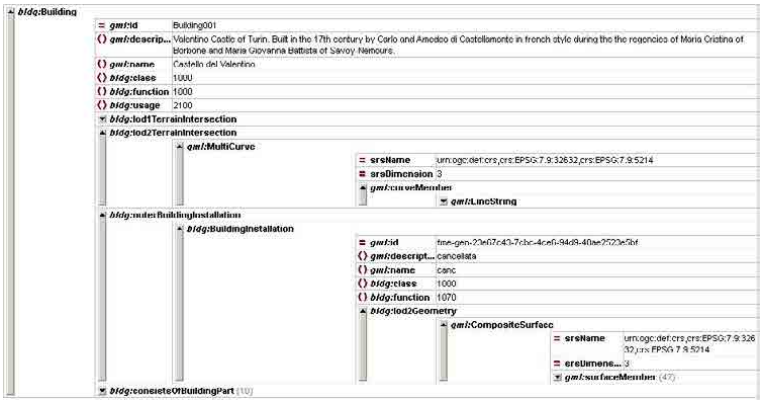


Figura 17.1.: vista della struttura dell'istanza della classe _*Building,* sono definiti gli attributi *class*=1000 (abitazione), *function*=1000 (residenziale) e *usage*=2100 (università). Gli elementi che lo compongono sono: le intersezioni con il modello del terreno (*lod1-2TerrainIntersection*), gli elementi accessori (*outerBuildingInstallation*) e le unità volumetriche (*BuildingPart*).

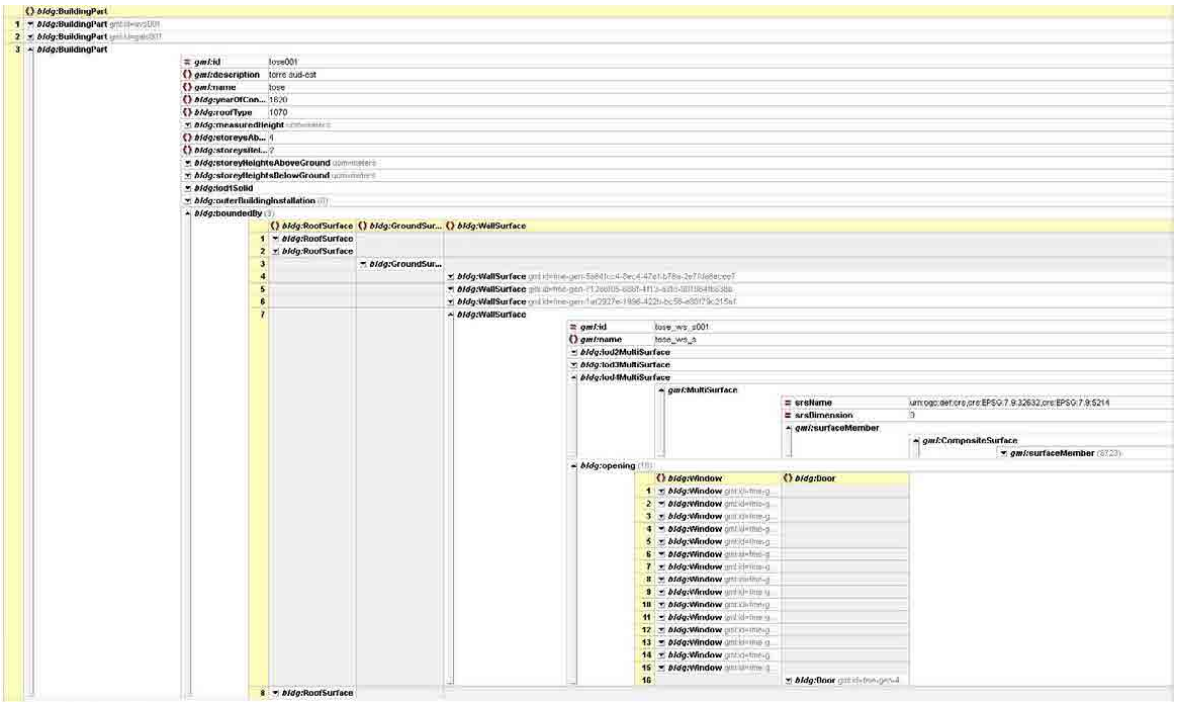


Figura 17.2.: vista della struttura di un unità volumetrica (*BuildingPart*): sono stati specificati gli attributi roofType=1070 (padiglione), l'anno di costruzione, l'altezza e il numero dei piani; di seguito compaiono le diverse superfici che compongono l'involucro (LOD2-4).

Rappresentazione

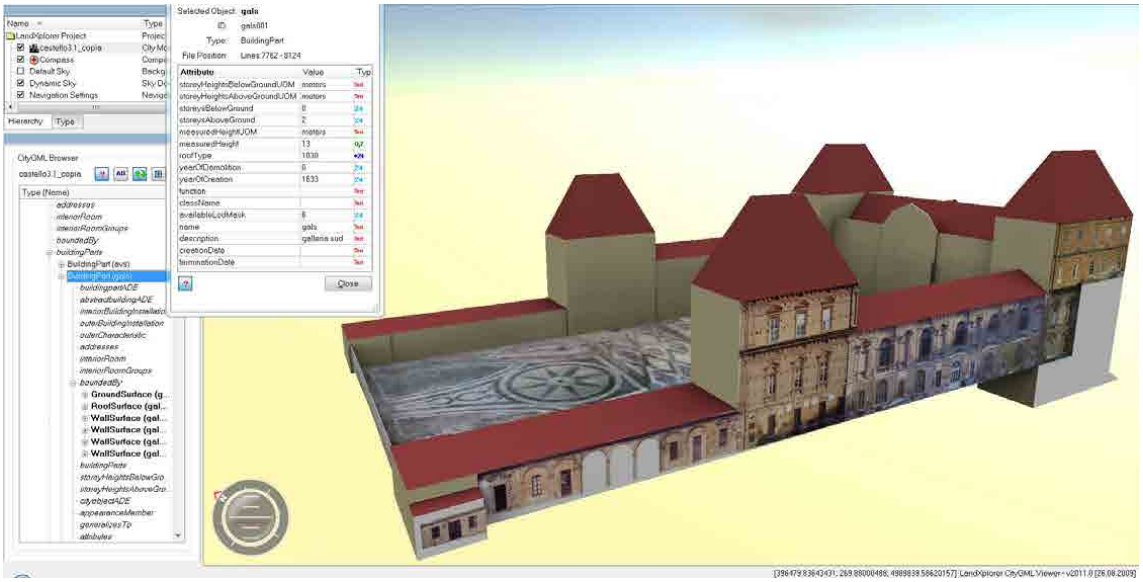


Figura 17.3.: LOD2, tema *lod2rectifiedphoto2008* (fotopiani pre-restauro).

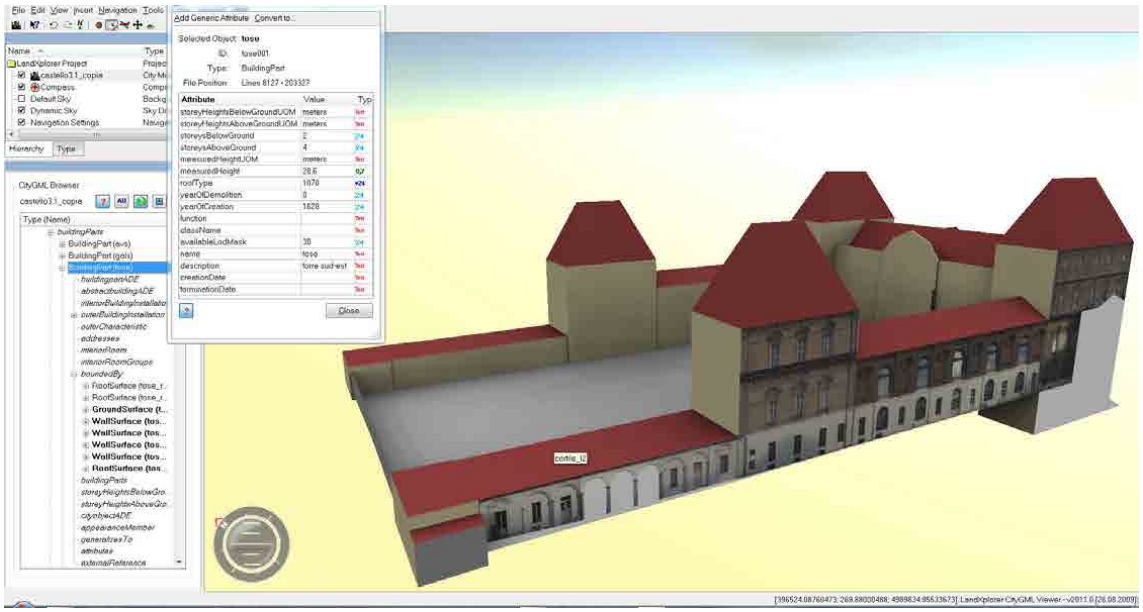


Figura 17.4.: LOD2, tema *lod2rectifiedphoto2011* (fotopiani post-restauro).

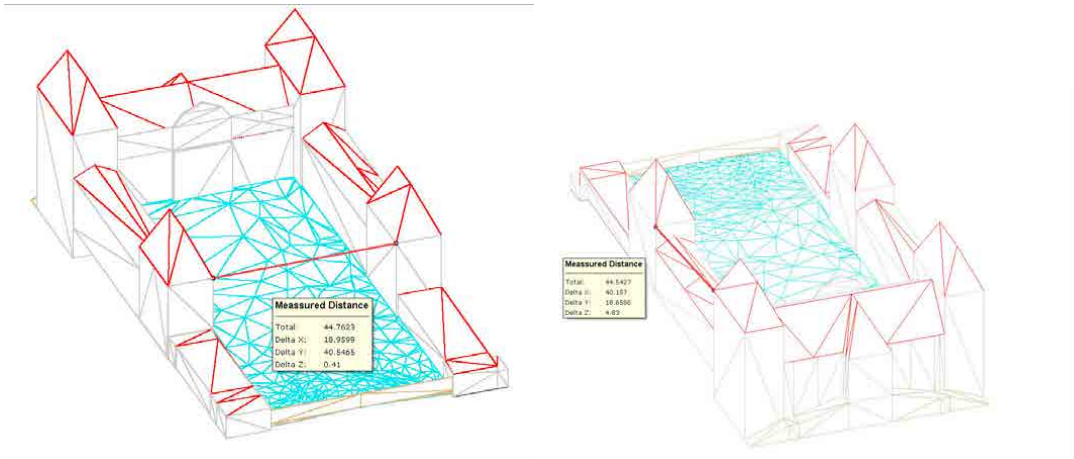


Figura 17.5.: analisi di due distanze nello spazio $\mathbb{R}^3$.

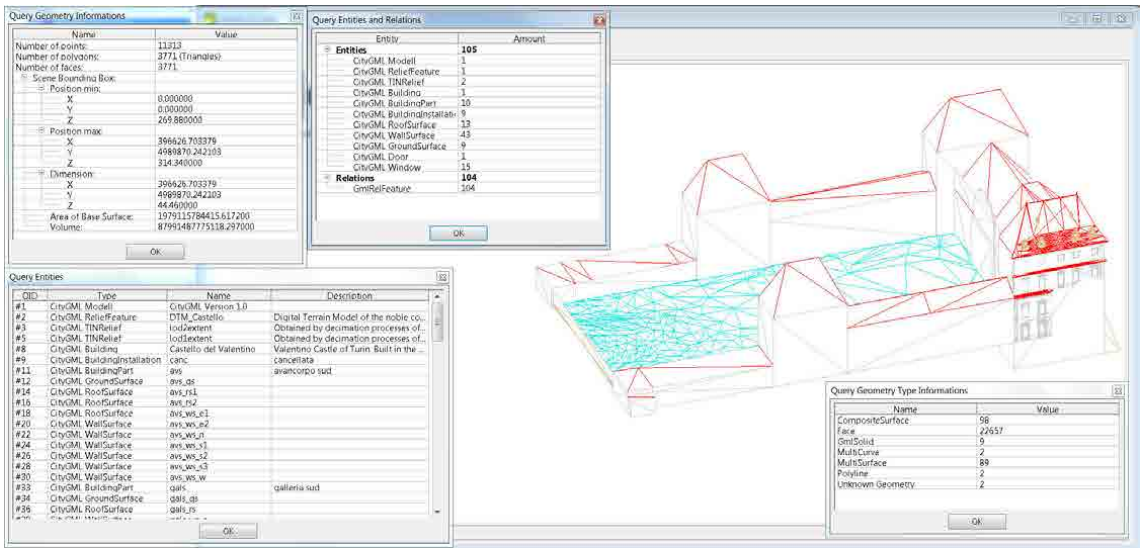


Figura 17.6.: riepilogo delle statistiche relative alla geometria, le entità e le relazioni.

Validazione

Il meccanismo della validazione dei contenuto della base di dati segue una serie di procedure che nel loro insieme definiscono la qualità dei dati implementati. Queste procedure sono applicate alla base di dati compiendo una serie di verifiche sul contenuto e sulla struttura logica degli stessi. Le verifiche sulla struttura logica della base sono quelle che definiscono le principali caratteristiche logiche di un database: la consistenza, ovvero non contraddittorietà delle istanze tra di loro e l'integrità che premette di definire logicamente le relazioni tra le istanze sulla base dell'unicità dei valori degli attributi di ciascuna istanza. Le verifiche sul contenuto dei dati riguardano invece la corrispondenza del tipo di dato con quello dichiarato, verifiche sulla memorizzazione fisica e altre verifiche sulla quantità e presenza dei dati. Le caratteristiche logiche permettono di formalizzare matematicamente la struttura della base di dati e sono indispensabili per permettere la gestione della stessa. Quelle sul contenuto invece permettono di assicurare la corrispondenza delle informazioni con lo schema usato per descriverle. Questi meccanismi di validazione sono effettuati successivamente all'implementazione del dato e permettono le successive operazioni di accesso e modifica della base di dati. I database XML prevedono che i meccanismi di validazione sulla struttura dei dati e sul contenuto vengano fatti sulla base degli schemi XML dichiarati nel documento. Essi vengono specificati tramite il *namespace* e la *SchemaLocation* che permettono all'applicazione di reperire il contenuto dello schema e utilizzarlo per validare la base di dati.

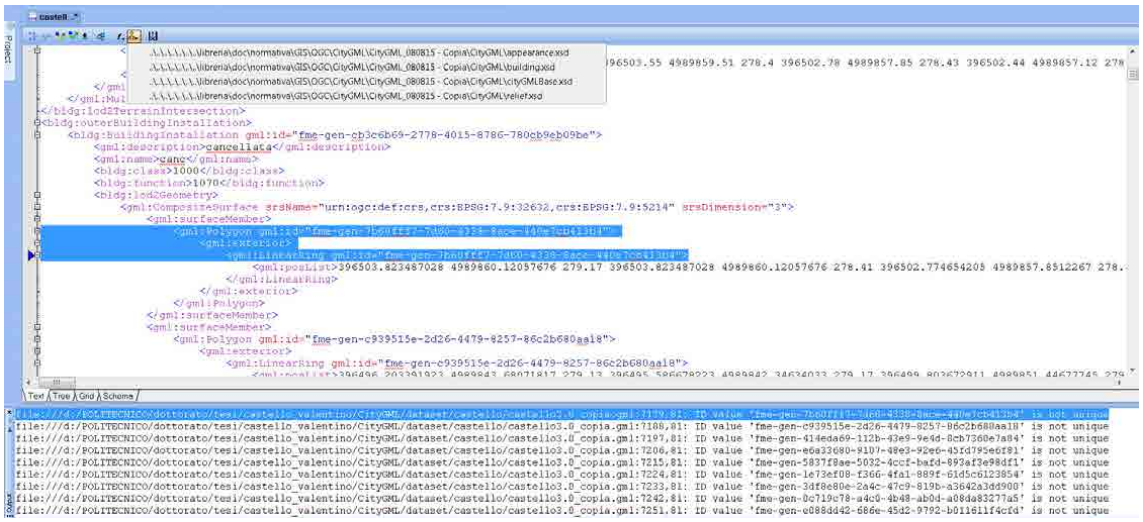


Figura 17.7.: validazione del contenuto del documento XML.

XQuery

Gli strumenti del linguaggio *XQuery* permettono di formulare ricerche sul contenuto tematico, ovvero sui valori degli attributi delle occorrenze. Sulla base degli schemi CityGML, dichiarati nel namespace del documento, è possibile specificare i nodi che rappresentano la struttura ad albero del documento per mezzo del linguaggio *XPath* e quindi il percorso dove trovare i valori degli attributi da ricercare. Il contenuto della ricerca, che corrisponde all'istanza di interrogazione, viene invece formalizzato per mezzo degli operatori logici come il FLWOR (*For Let Where Order Return*). Un'istanza di interrogazione è costituita dalla definizione di un attributo, la specificazione del percorso di ricerca e l'espressione della condizione di ricerca ovvero la corrispondenza tra il valore dell'attributo e il risultato di un operazione logica booleana. Il FLOWR, simile alle clausole *Select, From, Where* di SQL, è costituito dalle seguenti clausole *For, Let, Where, Order, Return*. *For* permette di specificare un percorso di ricerca tramite una sequenza di nodi; *Let* definisce l'associazione con la variabile cioè la specificazione del collegamento tra nodo alla condizione; *Where* esprime la condizione di ricerca; *Order* ordina i nodi su cui viene applicata la clausola precedente e *Return* restituisce il risultato per ciascun nodo. Le prime due clausole del FLWOR permettono di formalizzare la relazione tra il *Select* e il *From* di SQL, mentre le ultime due rappresentano la relazione tra il *Select* e il *Where*. Questo meccanismo descrive la differenza a livello applicativo di una formalizzazione diretta delle relazioni tramite la funzione della tupla e un meccanismo di strutturazione ad oggetti dove la corrispondenza tra i valori degli attributi e le relazioni non è diretta ma mediata dagli oggetti.

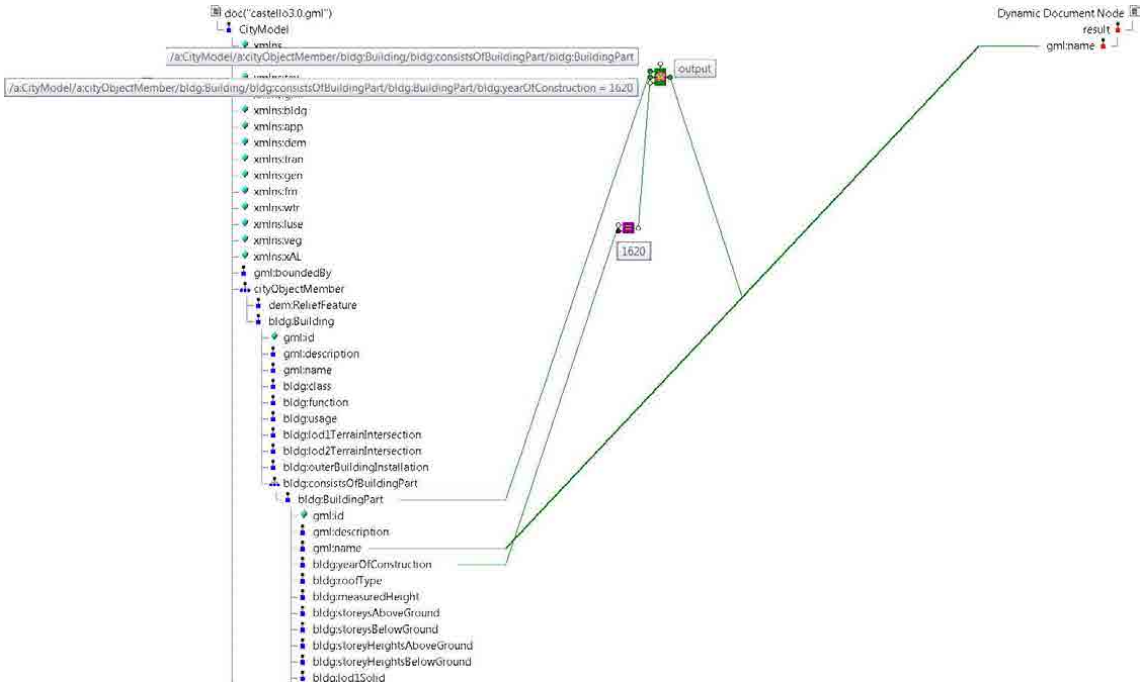


Figura 17.8.: utilizzo dell'operatore FLWOR: in magenta la clausola *Where*, in verde in alto a sinistra *For*, sotto *Let* e a destra *Return*; le linee visualizzano i riferimenti al documento delle clausole.

17.2. Geodatabase

Nel panorama degli strumenti applicativi dei GIS come è stato evidenziato gli unici strumenti che permettono la gestione e le analisi spaziali delle rappresentazioni 3D sono i Geodatabase. Oracle Database è al momento una delle poche applicazioni che supporta questo tipo di funzionalità. Nello specifico si tratta di un ORDBMS, cioè un database relazionale che ha implementato alcune funzionalità proprie dei database ad oggetti. Questi sistemi, progettati per la gestione di grosse banche di dati, possiedono infatti tutta una serie di funzionalità e meccanismi automatici che permettono il mantenimento di grossi sistemi in presenza di un flusso di dati notevole. Queste funzionalità permettono di garantire procedure per l'accesso e modifica dei dati, la condivisione dei dati nei sistemi distribuiti, la gestione della sicurezza, l'aggiornamento automatico dei dati e la verifica della consistenza e integrità del database. L'implementazione dei dati del caso studio in oggetto in un Geodatabase è stata orientata essenzialmente a valutare le modalità di implementazione del modello creato in un sistema informativo più ampio contenente un archivio di beni culturali su scala urbana o comprendente un'estensione più ampia.

Traduzione verso il modello relazionale

Come abbiamo visto la struttura logica del modello GML, basata sul metalinguaggio XML, è caratterizzata da un approccio alla modellazione dei dati diverso da quello relazionale e la traduzione dei dati da un modello all'altro necessita di una ristrutturazione di tutto lo schema concettuale e logico sottostante. Oracle Database ha implementato

alcune funzionalità che permettono di costruire delle aggregazioni di attributi simili alle classi del modello ad oggetti. Queste aggregazioni vengono costruite a partire dalla definizione degli *Object Type.* Questo costrutto rappresenta la base sulla quale possono essere definite aggregazioni di oggetti più complessi costituiti da diverse istanze di tabelle diverse, con funzionalità simili ai meccanismi di ereditarietà e polimorfismo dei database ad oggetti. Gli *Object Type* vengono definiti al livello della singola colonna di una tabella, gli *Object Columns* sono dei raggruppamenti di più colonne e gli *Object Table* intere tabelle. Un *Object Type* viene definito tramite gli stessi meccanismi delle tabelle quindi contiene un identificativo e una serie di attributi, i cui valori possono essere espressi da altri *Object Type* permettendo quindi il meccanismo di aggregazione. Il collegamento tra le tabelle che contengono *Object Type* diversi è realizzato tramite gli *Object Reference* che sono costituite da clausole SQL con le quali viene formalizzato il collegamento tra gli oggetti. Questo collegamento viene realizzato con un meccanismo simile ai puntatori utilizzati nel linguaggio C++. Il meccanismo di aggregazione degli *Object Type* permette di creare una struttura per organizzare lo schema logico di un database. Gli *Object Type* sono a tutti gli effetti delle tabelle con relativi attributi memorizzate nel *file system* al pari delle altre tabelle. Un meccanismo simile è invece implementato in Oracle per organizzare i dati presenti in istanza di database creando invece delle *Object View* che consistono in viste virtuali sulle tabelle esistenti. Esse sono costituite da una serie di clausole che selezionano determinati attributi da tabelle diverse che contribuiscono a descrivere una categoria di oggetti simili. Le *Object View* contengono anche una serie di procedure per codificare l'aggiornamento dei dati sulle stesse tabelle. Gli utenti possono cioè modificare i dati direttamente sulle viste aggiornando automaticamente anche le tabelle di cui esse rappresentano l'istanza di interrogazione. Questi strumenti, caratteristici degli ORDBMS, permettono di organizzare e gestire una base di dati relazionale utilizzando alcuni costrutti della modellazione ad oggetti che permettono di gestire e organizzare le informazioni che descrivono fenomeni complessi come quelli geografici.

Le esigenze di garantire ai dati il maggior livello di interoperabilità ha determinato la scelta utilizzare solo le estensioni al modello relazionale di Oracle che sono compatibili con il collegamento della base con altri sistemi GIS come per esempio AscSDE della ESRI che utilizzano il modello relazionale al momento il più diffuso nel panorama applicativo. L'implementazione dei dati in Oracle è stata effettuata sulla base dello schema di traduzione dei dati dell'applicazione 3d CityDatabase [48]. Questo schema è stato elaborato dall'Institute for Geodesy and Geoinformation Science della Technische Universität Berlin per garantire l'interoperabilità tra i GeoDatabase come Oracle Database e i modelli CityGML. Essa è costituita da una serie di *script* SQL per la traduzione verso il modello relazionale e un tool per l'implementazione dei dati.

Gestione dei dati

Il pacchetto di Oracle Database comprende una serie di applicazioni per gestire tutte queste funzionalità. I principali strumenti che permettono l'implementazione, l'interrogazione e la modifica dei dati sono costituiti dalle due applicazioni Enterprise Manager e SQL Developer, i *tool* assistiti per la creazione e l'eliminazione delle istanze di database, oltre ad altri strumenti più specifici destinati agli amministratori del database

come per esempio linguaggio di programmazione PL/SQL che permette la creazione di procedure, *package* e *triggers* per la gestione automatica dei sistemi.

L'applicazione Enterprise Manager è lo strumento che permette la gestione del database al livello più alto, cioè quello degli amministratori. Esso possiede una serie di strumenti per il monitoraggio delle prestazioni del sistema, le operazioni di accesso e modifica sui dati e il controllo della sicurezza. Questo strumento è necessario per creare o eliminare un'istanza di database oppure per assegnare le credenziali agli utenti. Un'altra funzionalità importante di questo strumento è il *versioning* ovvero la possibilità di memorizzare diversi stati di modifica del sistema permettendo ad esempio di modificare il contenuto dei dati mantenendo la versione originale.

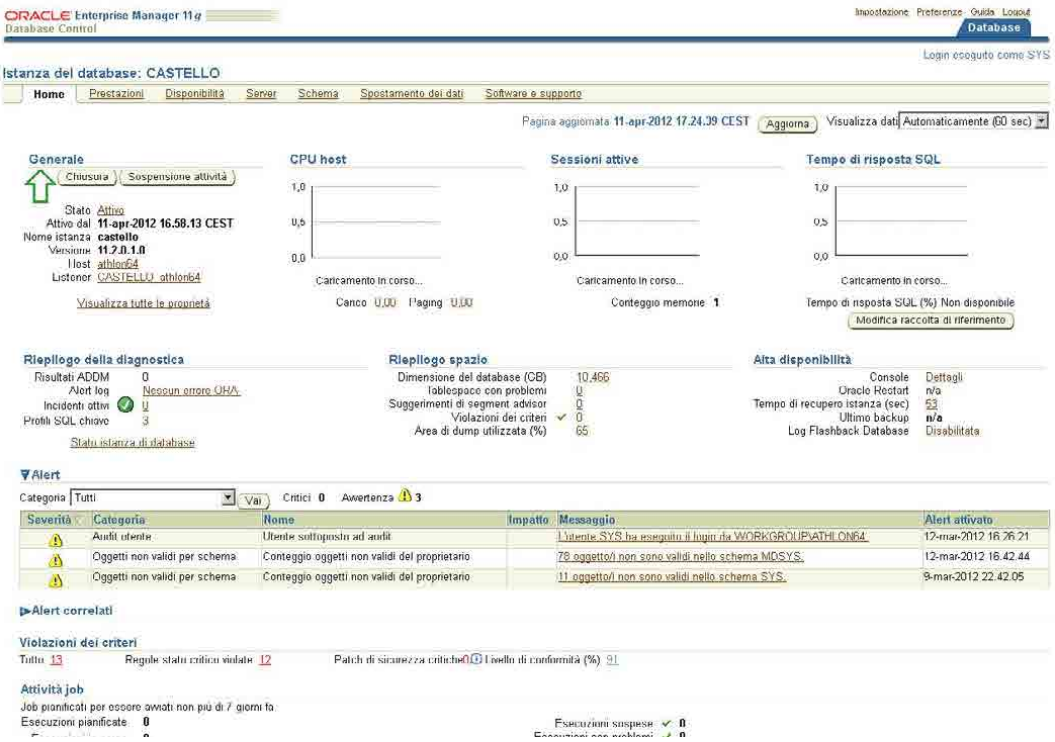
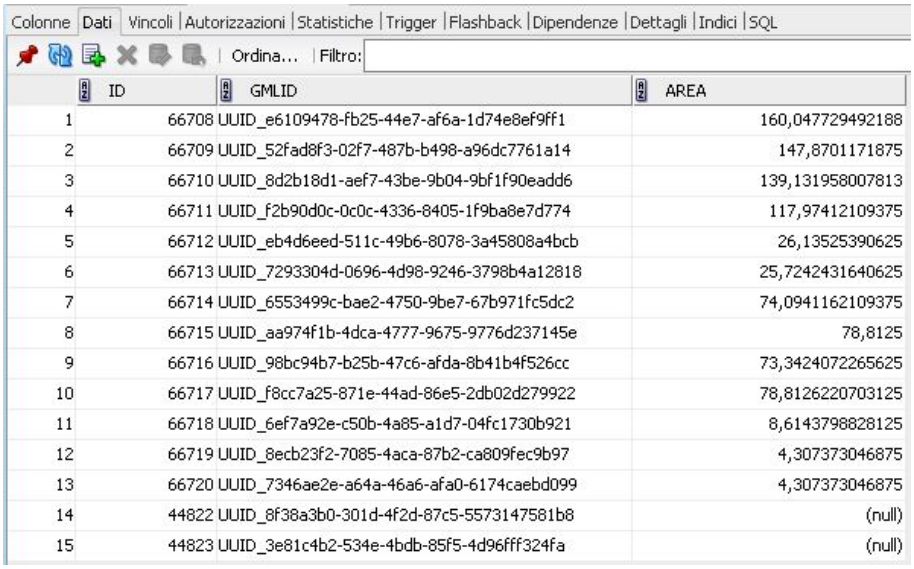


Figura 17.9.: Oracle 11g Enterprise Manager: prestazioni dell'istanza di database.

L'applicazione SQL Developer invece costituisce lo strumento principale per la gestione delle informazioni contenute nel database. Esso permette una vista sugli elementi che costituiscono la struttura del database e un interfaccia per la visualizzazione dei dati, costituiti da tabelle, per la formulazione delle *query* e la visualizzazione dei risultati. Gli elementi principali del database sono costituiti dalle tabelle, gli indici, le viste e i *package*. Le tabelle contengono le informazioni implementate, sotto forma di tuple. Gli indici sono uno strumento logico per l'ottimizzazione delle ricerche nei database e sono basati sul meccanismo di indicizzazione dell'*R-Tree*. Questo meccanismo Oracle come negli altri GeoDatabase viene applicato anche all'indicizzazione dei dati spaziali tramite i meccanismi di segmentazione basati sulla distanza come il MBR e il MBV9.1. Le viste o *Object View* come abbiamo visto consentono un'organizzazione dell'accesso ai dati secondo uno schema logico coerente con le caratteristiche delle informazioni rappresentate nella base. I *package* insieme ai *triggers* invece sono uno strumento di programmazione che consente lo sviluppo dei database. I *package* consentono di rag-

gruppare procedure, funzioni e singoli script SQL in unità logiche che possono essere considerate come una serie di istruzioni per gestire in modo automatico le modifiche e l'aggiornamento dei dati. I *triggers* sono invece dei meccanismi che sono attivabili ad un determinato evento del database come per esempio la creazione o la modifica di un record. Essi possono essere associati alle *Object View* permettendo di aggiornare le modifiche anche sulle tabelle di cui le viste rappresentano le istanze di interrogazione.



Colonne | Dati | Vincoli | Autorizzazioni | Statistiche | Trigger | Flashback | Dipendenze | Dettagli | Indici | SQL

Ordina... | Filtro:

	ID	GMLID	AREA
1	66708	UUID_e6109478-fb25-44e7-af6a-1d74e8ef9ff1	160,047729492188
2	66709	UUID_52fad8f3-02f7-487b-b498-a96dc7761a14	147,8701171875
3	66710	UUID_8d2b18d1-aef7-43be-9b04-9bf1f90eadd6	139,131958007813
4	66711	UUID_f2b90d0c-0c0c-4336-8405-1f9ba8e7d774	117,97412109375
5	66712	UUID_eb4d6eed-511c-49b6-8078-3a45808a4bcb	26,13525390625
6	66713	UUID_7293304d-0696-4d98-9246-3798b4a12818	25,7242431640625
7	66714	UUID_6553499c-bae2-4750-9be7-67b971fc5dc2	74,0941162109375
8	66715	UUID_aa974f1b-4dca-4777-9675-9776d237145e	78,8125
9	66716	UUID_98bc94b7-b25b-47c6-afda-8b41b4f526cc	73,3424072265625
10	66717	UUID_f8cc7a25-871e-44ad-86e5-2db02d279922	78,8126220703125
11	66718	UUID_6ef7a92e-c50b-4a85-a1d7-04fc1730b921	8,6143798828125
12	66719	UUID_8ecb23f2-7085-4aca-87b2-ca809fec9b97	4,307373046875
13	66720	UUID_7346ae2e-a64a-46a6-afa0-6174caebd099	4,307373046875
14	44822	UUID_8f38a3b0-301d-4f2d-87c5-5573147581b8	(null)
15	44823	UUID_3e81c4b2-534e-4bdb-85f5-4d96fff324fa	(null)

Figura 17.10.: *query* spaziale: calcolo delle aree di tutte le superfici di un'unità volumetrica e creazione di una nuova tabella con i risultati.

18. Modellazione di un fenomeno culturale

Il modello dei dati GML e CityGML ha conosciuto una rapida diffusione nelle applicazioni alla gestione dei dati spaziali grazie alla sua capacità di descrivere semanticamente la complessità dei fenomeni geografici caratterizzati da un'articolato insieme di relazioni reciproche e dalla multivalenza dei dati. L'implementazione dei dati del caso studio secondo lo standard CityGML ha dimostrato la flessibilità del modello per la descrizione delle diverse caratteristiche dei fenomeni urbani e si è dimostrato anche un sistema di codifica delle informazioni basato su una tecnologia che offre potenzialità di analisi e gestione proprie di un DBMS. Queste caratteristiche però non sono sufficienti per definire questo modello come un valido strumento per la rappresentazione dei beni culturali e più specificatamente quelli architettonici. Questa tipologia di oggetti infatti comprende un'insieme complesso e variegato di caratteristiche che coinvolgono tutti diversi livelli di lettura del rapporto tra informazione spaziale e tematica che abbiamo analizzato.

Uno di questi livelli è costituito dalla rappresentazione multiscala che ci ha consentito di analizzare le caratteristiche di questo rapporto a seconda del diverso livello di dettaglio e di comprendere come questo livello condizioni sia la struttura geometrica dell'informazione che le caratteristiche del rapporto con l'informazione tematica e la sua formalizzazione logica. Possiamo identificare una serie di caratteristiche che contribuiscono a caratterizzare il valore culturale degli oggetti spaziali che sono indipendenti da questo livello di dettaglio e abbracciano tutte le scale di rappresentazione, da quelle cartografiche a quelle architettoniche, mentre altre caratteristiche che riguardano più specificatamente i beni architettonici si manifestano solo passando ad un livello di dettaglio più alto. A partire dal LOD3 è infatti necessaria una specializzazione delle classi che sono state utilizzate per modellare le componenti dell'edificio al fine di identificare gli elementi architettonici che costituiscono l'apparato decorativo e i loro rapporti con la componente geometrica. Nella modellazione concettuale e logica di questi elementi e rapporti gli apporti multidisciplinari delle discipline coinvolte nella documentazione dei beni culturali contribuiscono in modo integrante a definire le caratteristiche della rappresentazione geometrica del dato. Nella modellazione dei rapporti tra contenuto tematico e geometrico dei dati spaziali relativi ai beni culturali è necessario quindi il contributo che le diverse discipline danno all'indirizzo degli strumenti logico-geometrici per la rappresentazione del valore semantico del contenuto informativo. Contributo che può quindi realizzarsi pienamente solo attraverso un lavoro multidisciplinare. Quello che abbiamo cercato di seguire in questa ricerca è stato, oltre a caratterizzare i contributi specialistici della Geomatica con un approccio multidisciplinare, quello di cercare di fornire alle altre discipline che devono guidare e indirizzare gli scelte dei sistemi e delle tecniche di rappresentazione un panorama abbastanza esaustivo dei possibilità che questi strumenti offrono lasciando appunto all'attività multidisciplinare le scelte

che finalizzano questi strumenti.

Abbiamo visto come i costrutti fondamentali dalla modellazione concettuale si basano sulla definizione di classi che comprendono insiemi omogenei di oggetti, qualificate essenzialmente da attributi e relazioni. Attraverso questi strumenti è possibili organizzare gli elementi in classi tematiche, caratterizzarli attraverso gli attributi e definire le relazioni tra le stesse classi tematiche e tra quelle tematiche e quelle geometriche. La definizione degli attributi di una classe corrisponde al livello più basso e specializzato della modellazione delle caratteristiche di un fenomeno, mentre sono le relazioni che costituiscono l'aspetto che più degli altri permette di rendere il modello ricco dal punto di vista semantico. La definizione delle caratteristiche degli elementi architettonici dell'apparato decorativo è uno degli aspetti nei quali l'approccio seguito dagli standard adottati può facilmente realizzare questi obiettivi utilizzando gli strumenti logico-informatici della modellazione ad oggetti e della tecnologia XML. Come abbiamo evidenziato, le caratteristiche del modello ad oggetti permettono di estendere uno schema concettuale attraverso la specializzazione delle sue classi. Attraverso il meccanismo dell'ereditarietà è quindi possibile definire con un livello di dettaglio maggiore questi elementi e nello stesso tempo definire i rapporti con le classi geometriche. Questa caratteristica della rappresentazione metrica dei beni culturali è quindi facilmente sviluppabile con gli strumenti a disposizione una volta chiarite le linee guida che devono regolare lo sviluppo applicativo.

18.1. Modello concettuale UML

Uno degli aspetti più complessi da definire dal punto di vista della realizzazione logico - formale è quello della multivalenza del valore culturale del bene che comprende tutti i diversi fenomeni urbani e geografici e si manifesta diversamente a seconda delle caratteristiche di questi fenomeni pur conservando la sua specificità culturale. Cercando di rappresentare tramite un modello concettuale questo aspetto di complessità dobbiamo partire quindi da un analisi delle caratteristiche del bene culturale in relazione ai diversi livelli dell'informazione spaziale. Lo standard GML è uno degli strumenti normativi e allo stesso tecnologici più importanti della Geomatica nella rappresentazione geografica, mentre il CityGML rappresenta il livello di lettura della rappresentazione urbana. La modellazione di un fenomeno come i beni culturali deve partire quindi da questi due livelli di lettura definendo innanzitutto dove si colloca. Si può ipotizzare di definire una serie di attributi comuni e specifici per ogni classe esistente nel modello CityGML e permettere quindi di definire un livello informativo costituito da tutte le occorrenze delle classi tematiche urbane che presentano un determinato attributo che definisce il valore culturale del bene. Questo livello di definizione però non ci permette di modellare le relazioni diverse che possono legare fenomeni che ad una lettura puramente orientata alla rappresentazione delle caratteristiche del fenomeno urbano non sono evidenti e che si manifestano solo nel momento in cui questi fenomeni hanno un valore culturale. La semplice definizione degli attributi inoltre non ci consente la specializzazione richiesta dal livello di dettaglio più alto richiesta da questo tipo di documentazione.

Il punto di partenza è quindi quello di considerare la manifestazione del valore culturale di un bene come un ambito applicativo specifico dello sviluppo urbano e specializzare la superclasse da cui discendono tutti gli altri tematismi oppure partire da un livello più alto e specializzare direttamente la superclasse del modello GML. Abbiamo

visto che tutte le classi dei moduli che compongono il modello CityGML discendono dalla superclasse CityGML *CityObject* che è una specializzazione della superclasse GML *AbstractFeature* da cui derivano tutti i tematismi cartografici ("*features with geometry*" e "*features as coverage*"). La superclasse CityGML *CityObject,* come tutte le altre classi del modello CityGML, possiede due attributi che la differenziano dalla superclasse *AbstractFeature*: *creationDate* e *terminationDate.* Questi due attributi circoscrivono l'insieme dei fenomeni urbani a questa dimensione della caratterizzazione temporale. Il modello GML invece possiede strumenti per la modellazione delle caratteristiche temporali dei fenomeni geografici più articolati che permettono di definire in modo più articolato queste caratteristiche.

Immaginando di definire quindi una superclasse da cui discendono tutti i fenomeni culturali e le loro relazioni con le classi tematiche che descrivono i fenomeni urbani e geografici ci dobbiamo porre il problema di chiarire se il fenomeno culturale può sempre essere espresso tramite gli attributi della superclasse CityGML *CityObject* oppure è necessario specializzare la superclasse *Feature* per avere la possibilità di modellare la dimensione temporale prescindendo da una data di inizio e di fine che limita la descrizione del fenomeno ad una dimensione statica. Alcuni beni culturali come per esempio quelli archeologici presentano una relazione con la dimensione temporale molto articolata in cui essa rappresenta una chiave di lettura fondamentale del fenomeno e quindi non sarebbe possibile rappresentare questa tipologia di oggetti nella cartografia urbana specializzando la superclasse CityGML *CityObject*, ma bisogna derivare questo tipo di oggetti dalla superclasse *AbstractFeature.* È evidente che il problema è complesso e necessita di un lavoro multidisciplinare per definire le caratteristiche del fenomeno culturale, classificarlo e contribuire a definire i valori che si vogliono qualificare tramite le relazioni e gli attributi.

In quest'ultima fase conclusiva del percorso delineato all'inizio della ricerca si è voluto cercare di esplorare le possibilità applicative di una modellazione logico-formale del contenuto semantico della rappresentazione del fenomeno culturale nell'ambito dello specifico ambito applicativo dei beni architettonici, senza però rinunciare all'approccio multidisciplinare che deve caratterizzare la ricerca in questo campo a prescindere che essa sia il contributo di una singola disciplina oppure il frutto del contributo di discipline diverse. Partendo quindi dalle premesse precedenti si è ipotizzato uno schema di modello che permetta di descrivere il fenomeno del degrado degli edifici integrandolo in una rappresentazione più ampia dell'insieme più vasto dei fenomeni culturali.

Nel modello si è partiti dalla definizione della superclasse *ch:_ CulturalHeritageFeature* che essendo astratta costituisce la rappresentazione formale del meccanismo che permette la specializzazione di diverse classi istanziabili che possiedano tutti gli attributi e le relazioni della superclasse. Questo per lasciare lo spazio aperto ad una definizione successiva di questi elementi e nello stesso tempo sviluppare un livello di dettaglio di definizione del fenomeno coerente con le caratteristiche di complessità dei beni culturali. La classe *ch:_ CulturalHeritageFeature* è stata quindi specializzata in un'altra classe astratta *ch::_ CHSite* che analogamente alla classe CityGML *core::_ Site* permette di derivare da essa una famiglia di classi caratterizzate dalla comune caratteristica di essere strettamente connessi con l'attività edilizia, ma non sono necessariamente edifici. Usando uno schema simile è possibile definire la classe *ch::_ CHSite* come quella che caratterizza i beni culturali che possiedono una precisa collocazione nell'ambito della scala di rappresentazione urbana e permettere anche attraverso la sua specializzazione

di creare una serie di classi che descrivano tutti i beni architettonici che non possono essere ricondotti alle classi del modulo *Building*. La classe *ch::_CHSite* è quindi stata specializzata nella classe *ch::_AbstractDeterioration* che, essendo astratta come tutte le precedenti, permette di essere specializzata in una serie diversa di altre classi che descrivono le differenti tipologie di degrado che possono caratterizzare i diversi tematismi urbani consentendo allo stesso tempo di definire una serie di attributi e relazioni comune al degrado inteso in senso generale come fenomeno che aggredisce un oggetto spaziale. Per tutte queste classi non si è quindi voluto definire nessun tipo di attributi o relazioni perché sarebbe al di la dei limiti della disciplina nella quale la presente ricerca si inserisce.

La descrizione del fenomeno del degrado della superficie degli edifici può essere quindi definita attraverso la classe *ch:_BoundarySurfaceDeterioration* la quale definisce un insieme di relazioni specifiche con la classe *bldg:: _BoundarySurface* ed essendo allo stesso tempo una classe astratta permette di definire diverse tipologie di degrado superficiale a seconda delle caratteristiche dei diversi elementi che compongono l'involucro edilizio. Questo consente una prima differenziazione del degrado permettendo ad esempio di definire attributi e relazioni specifiche per il degrado del manto di copertura, delle superfici murarie o le sue aperture. Le relazione del degrado superficiale con le superficie aggredite deve essere definita sia come relazione tra le classi tematiche che definiscono l'insieme degli oggetti che quelle geometriche che permettono la rappresentazione della componente spaziale. La relazione tra classe *bldg:: _BoundarySurface* e *ch:_BoundarySurfaceDeterioration* è stata definita quindi come un'aggregazione della seconda nella prima. Le relazioni con il contenuto geometrico sono invece diverse per i due livelli di dettaglio LOD3 e LOD4 e qualificate dal tipo di relazione geometrica *lod3-4MultiSurface* e *lod3-4MultiCurve*. Tutte le specializzazioni della classe *ch:_BoundarySurfaceDeterioration* come per esempio *ch::RoofSurfaceDeterioration* e *ch::WallSurfaceDeterioration* saranno quindi caratterizzate dalle stesse relazioni e attributi. Lo stesso meccanismo dell'ereditarietà applicato alle specializzazioni *bldg:: _BoundarySurface* permette loro di ereditare la relazione con la *ch:_BoundarySurfaceDeterioration.*

La rappresentazione del fenomeno del degrado secondo questo schema permette di integrare il contenuto metrico che descrive l'estensione nello spazio del degrado con il contenuto metrico che invece rappresenta la porzione di superficie dell'involucro edilizio e effettuare delle analisi che mettano in relazione i due dati. Analisi che possono essere filtrate attraverso la definizione degli attributi specifici che descrivono le caratteristiche fisiche del degrado. Queste caratteristiche potranno essere definite attributi delle stesse specializzazioni della *ch:_BoundarySurfaceDeterioration* e definendo nuovi attributi per le classi *bldg:: _BoundarySurface*. Tramite gli attributi che descrivono quindi le caratteristiche delle superfici come per esempio il materiale e gli attributi che definiscono il tipo di degrado è possibile quindi mettere in relazione questi dati con il contenuto geometrico e modellare il fenomeno con gli strumenti dei sistemi informativi spaziali. Per completare il quadro della rappresentazione concettuale del bene architettonico e della sua relazione con il tema edificato si sono definiti degli attributi specifici per la classe *bldg::_AbstractBuilding* che possano consentire una gestione di un archivio metrico dei beni architettonici. La specificazione dei nomi degli attributi e dei tipi di dato può essere fatta direttamente sullo schema logico XML.

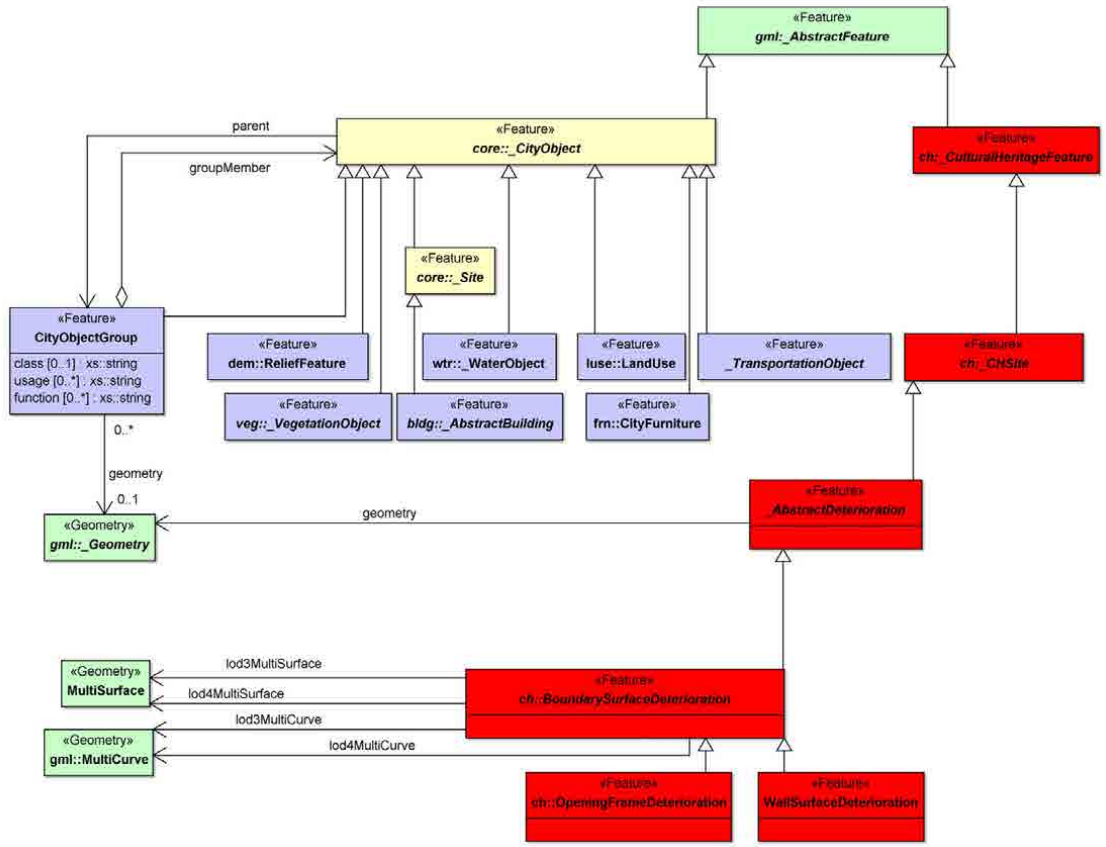


Figura 18.1.: schema UML della modello dei dati del Cultural Heritage ADE (*Application Domain Extension*). Lo schema descrive la derivazione delle classi a partire dalla superclasse *gml::_ AbstractFeature*.

18.2. Schema XML

La traduzione del modello concettuale UML nello schema logico viene fatta utilizzando i costrutti del metalinguaggio XML. Ciascuna classe viene scomposta in un tipo complesso e il suo relativo elemento, quindi sono definite le specializzazioni delle classi tramite gli attributi *base* e *derivedBy* per il tipo complesso e il gruppo di sostituzione (*substitutionGrp*) per l'elemento. La relazione tra le due classi viene definita tramite un altro tipo complesso *BoundarySurfaceDeteriorationPropertyType.* Nel tipo che definisce la relazione viene specificata la destinazione ovvero il tipo complesso dove la relazione è entrante. La definizione delle relazioni viene completata specificando nel tipo complesso dove la relazione è uscente il collegamento con tipo complesso in cui la relazione è entrante.

A questo livello di di definizione dei dati possono essere direttamente specificati gli attributi della classe *bldg::_ AbstracBuilding.* La formulazione di questi attributi è stata studiata per permettere una gestione integrata di un archivio metrico contenente diversi strati informativi incluso quello relativo ai beni architettonici. Un primo attributo *isCH* [0...1] ci permette di qualificare l'edificio come bene culturale. Il tipo di dato è *gml::booleanOrNull* che è un tipo particolare di valore booleano nel quale è ammessa la falsificazione (*nillable*) cioè la presenza di un valore vuoto. Il significato

di questa falsificazione può essere ulteriormente specifica tramite una lista codificata (*nillableReasonList*). Questo tipo di attributo ammette la possibilità che non si sappia definire un valore e specificarne la ragione, caso che può accadere nel caso in cui non sia possibile definire un modo definito l'appartenenza dell'edificio alla categoria dei beni architettonici. Utilizzando lo stesso tipo di dato si è implementato l'attributo *isCHAuth* [0...1] che invece permette tramite lo stesso meccanismo di definire se il bene architettonico sia o meno codificato da uno preciso ente normativo preposto alla tutela e gestione del patrimonio architettonico ed eventualmente non definire questo valore. Altri due attributi *CHAuthName* [0...∗] e *CHAuthCode* [0...∗] che possono avere valori multipli invece definiscono il codice che identifica l'ente normativo e quello che corrisponde al codice identificativo che l'ente normativo ha assegnato al bene. Il valore multiplo permette ad esempio la classificazione dello stesso bene da parte di enti normativi diversi proprio a perché diversi sono i valori culturali che lo stesso bene può esprimere.

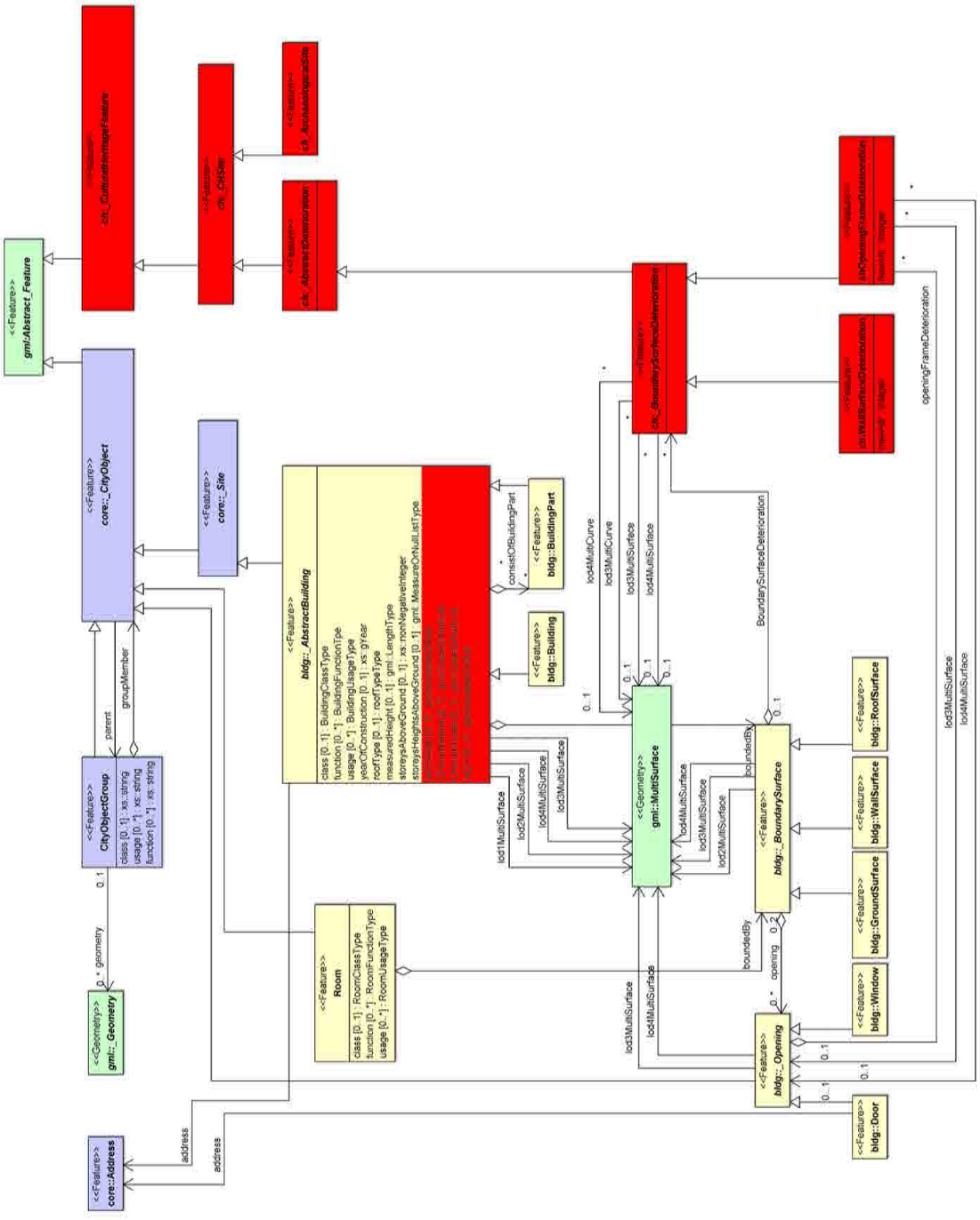


Figura 18.2.: schema UML dell'applicazione dell'estensione al modulo *Building*. Nello schema sono evidenziate le specializzazioni della classe *ch_BoundarySurfaceDetrioration* e delle sue relazioni con le classi *_BoundarySyrface* e *gml::MultiCurve*. Sono inoltre rappresentati gli attributi aggiunti alla classe *_AbstractBuilding*.

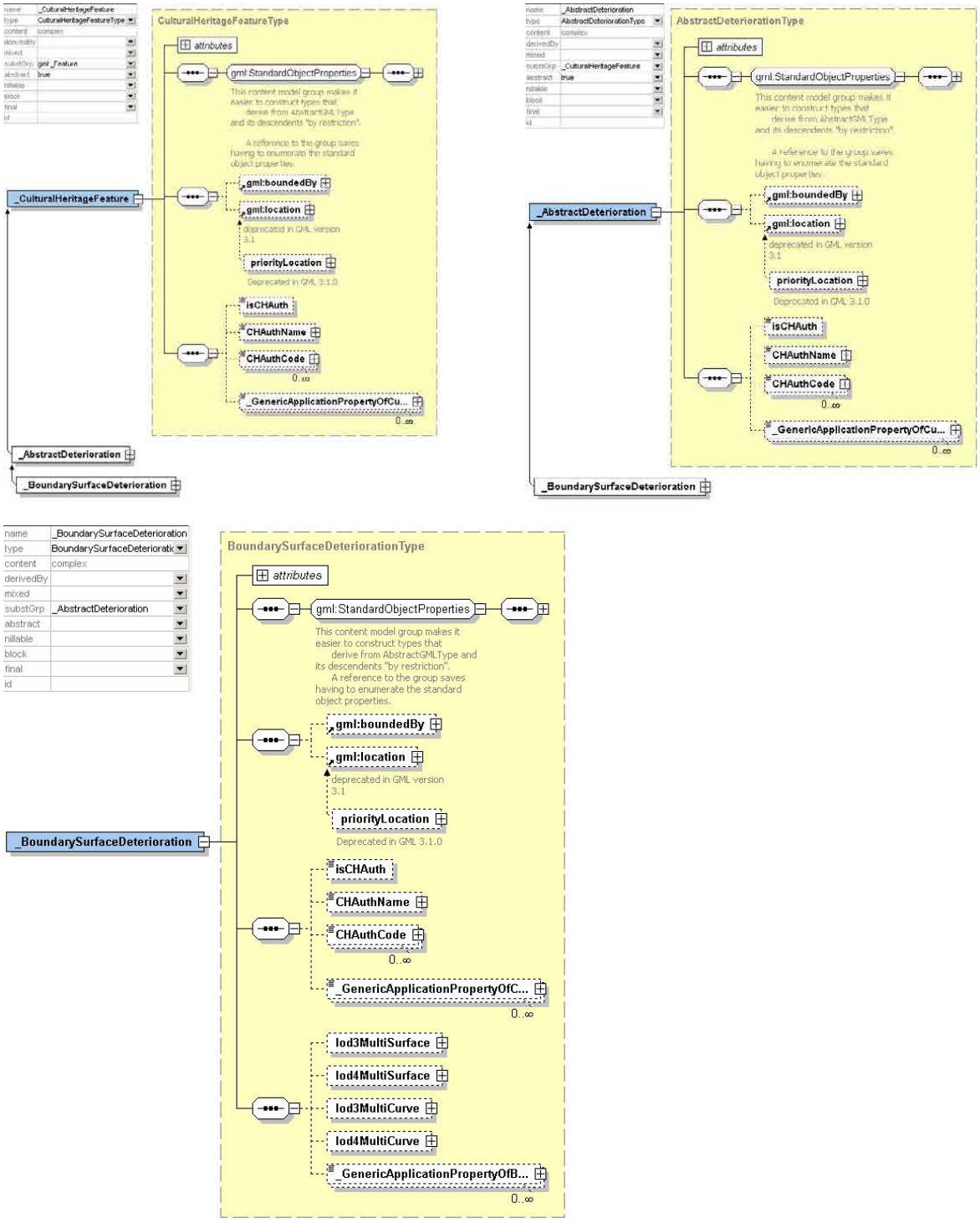


Figura 18.3.: rappresentazione logica dello schema. Lo schema XSD delle specifiche OGC - CityGML è stato esteso per comprende re le classi, le relazioni e gli attributi definiti al livello concettuale tramite lo schema UML. In ordine dall'alto verso il basso i tipi complessi: *_CulturalHeritageFeature*, *_AbstractDeterioration* e *_BoundarySurfaceDeterioration*.

Considerazioni

Le finalità di questa ricerca, delineate nella prima parte, sono partite dall'analisi delle caratteristiche della documentazione metrica dei beni culturali attraverso la comprensione dei meccanismi che legano il contenuto tematico e geometrico dell'informazione geografica. Nella definizione di queste caratteristiche è stato evidenziato come i beni architettonici facciano parte di un insieme più complesso che coinvolge tutti fenomeni geografici. Questo insieme è caratterizzato dal valore che i diversi approcci disciplinari contribuiscono a rappresentare e comunicare. Le relazioni tra le due componenti che caratterizzano tutti i fenomeni geografici, culturali compresi, sono state analizzate sotto il duplice aspetto della rappresentazione geometrica dell'informazione e dei meccanismi logici che legano queste rappresentazioni al contenuto tematico.

Si è cercato di applicare questo approccio ad un caso studio che avesse i requisiti per essere rappresentativo dal punto di vista metodologico e nello stesso significativo dal punto di vista della complessità del fenomeno da trattare. Questi due requisiti formalmente contraddittori necessitano di un superamento di una visione limitata della specializzazione del proprio ambito disciplinare per riuscire ad conciliare le esigenze di rappresentare la significatività estremamente complessa di un oggetto con quelle di dare alla ricerca un'impostazione rigorosa nella modellazione dei dati spaziali. Il vantaggio di poter definire un determinato ambito disciplinare con precisione è quello di poter disporre di un complesso di regole e domini in cui è possibile delineare con precisione la validità di determinati risultati raggiunti. L'approccio multidisciplinare richiede invece un necessario grado di incertezza nella determinazione dei risultati per poter riuscire superare questi limiti [33]. L'esigenza di superamento non va nella direzione di un allargamento dei confini della propria disciplina quanto come di una comprensione di come quella disciplina faccia sempre parte di un insieme più vasto di relazioni che nel loro mutare la caratterizzano. L'approccio multidisciplinare quindi ci permette di integrare la multivalenza di determinati fenomeni complessi come i beni culturali. Questo approccio però deve sempre essere caratterizzato da un metodo rigoroso nell'analisi di ciascun aspetto della realtà secondo gli strumenti che le diverse discipline forniscono per formulare una ricerca scientifica. Nella presente ricerca sono stati analizzati i due diversi livelli di lettura dei beni architettonici ovvero quello della loro rappresentazione geometrica e quello della strutturazione logica del valore semantico e quindi analizzati i meccanismi di definizione formale di queste relazioni.

Molti aspetti della presente ricerca per i motivi citati non sono stati sviluppati completamente e potrebbero essere oggetto di successivi sviluppi. I risultati dello studio dimostrano che gli standard e i linguaggi adottati permettono la gestione del contenuto semantico dell'informazione spaziale relativa alla documentazione dei manufatti architettonici in ambito urbano e supportano la gestione della componente bi e tridimensionale del contenuto geometrico. Le tipologie di rappresentazioni geometriche supportate dallo standard CityGML comprendono la maggior parte di quelle vettoriali utilizzate nell'ambito CAD e GIS. Le rappresentazioni raster sono invece gestite

come una tematizzazione del dato geometrico e possono contribuire ad arricchirne il significato. Uno degli aspetti suscettibili di approfondimento in gestione negli archivi nazionali della documentazione metrica dei beni culturali è l'integrazione dei diversi livelli di definizione dei dati spaziali che corrispondono ai diversi approcci di lettura del contenuto informativo. L'adozione di standard internazionali e l'utilizzo di modelli semantici rappresentano un primo passo per un'integrazione più completa tra il contenuto tematico-geometrico dei dati e le esigenze di una rappresentazione dei dati su più livelli di lettura diversa. Quest'integrazione contribuisce a realizzare gli obiettivi di comunicazione del valore culturale dell'informazione metrica.

Per quanto concerne gli aspetti applicati dell'implementazione dei dati sono sicuramente da approfondire le possibilità di gestione che lo sviluppo della tecnologia XML può offrire. Il metalinguaggio XML su cui si basa lo standard utilizzato permette l'estensione del modello dei dati e delle estensioni come per esempio i linguaggi di interrogazione. Il modello dei dati può essere adattato alla descrizione di specifiche tipologie di informazioni e adattato a determinati ambiti applicativi. La tecnologia XML permette di tradurre le informazioni modellate al livello concettuale nello schema logico di XML e viceversa per mezzo di tecniche di *reverse engineering* che consentono di garantire una corrispondenza semantica nei diversi passaggi di traduzione. Le estensioni di XML XQuery [100] e XPath [98] sono degli strumenti per la ricerca modifica delle informazioni nei documenti XML. La possibilità di integrare in questo linguaggio gli strumenti degli operatori spaziali per permetter di compiere analisi anche sulla componente geometrica dei dati è uno dei campi ancora aperti della ricerca in questo campo. Studi in questo campo [13, 47] hanno dimostrato la possibilità di integrare gli operatori spaziali più comuni utilizzati nei GIS nelle estensioni del linguaggio XQuery. Il Geo Module di EXPath[1], organizzazione che si occupa dello sviluppo del linguaggio XPath, fornisce gli strumenti per la codifica delle classi geometriche GML e integra gli operatori di analisi spaziale del DE-9IM (*Dimensional extended nine Intersection Model*) [27, 22]. Questa proposta di standard permette lo sviluppo di API (*Application Programming Interface*) che implementino queste funzioni nei *query processor* dei database XML nativi.

Per quanto riguarda invece la strutturazione del contenuto geometrico e le analisi spaziali più complesse che su questo si possono effettuare per mezzo dei Geodatabase un aspetto da approfondire è l'integrazione nel dataset di dati metrici più eterogenei e non strutturati come le nuvole di punti. L'analisi delle funzionalità di indicizzazione dei dati spaziali potrebbe essere un aspetto interessante per quanto riguarda la possibilità di integrare nel database questo tipo di dati.

[1] http://expath.org/spec/geo

Parte V.

APPENDICI

Standard

3. Metric Survey Specifications for English Heritage

- ***General Performance and Control of Metric Survey***

Precision

Required maximum tolerance for precision of detail

scale	acceptable precision
1:10	+/- 5mm
1:20	+/- 6mm
1:50	+/- 15mm
1:100	+/- 30mm
1:200	+/- 60mm
1:500	+/- 150mm

No less than 67% of a sample is to be within the stated tolerances and no less than 90% is to be within 1.65 times the stated tolerances.

Point density/Rate of capture

Required distribution of measured points

scale	point cloud	digitising*	field survey†
1:10	1mm	1–15mm	2–30mm (max 0.5m)
1:20	3mm	3–30mm	5–60mm (max 1m)
1:50	5mm	5–50mm	10–100mm (max 2m)
1:100	15mm	15–100mm	20–200mm (max 3m)
1:200	30mm	30–300mm	50–600mm (max 5m)
1:500	75 mm	75–750mm	0.1–1.5m (max 10m)

* From photogrammetric stereo model or point cloud: the higher value in each range represents the maximum permissible point interval.

† For example by electromagnetic distance measurement (EDM) or global positioning system (GPS). Where lines appear straight or detail is sparse the interval may be increased up to the maximum shown in brackets.

Figura 4.: Requisiti di precisione riferiti alla tolleranza della scala di rappresentazione (sinistra) e requisiti di accuratezza espressi tramite la densità dei punti misurati (destra). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 2.1.2.

- ***Standard Specification for Image-based Metric Survey***

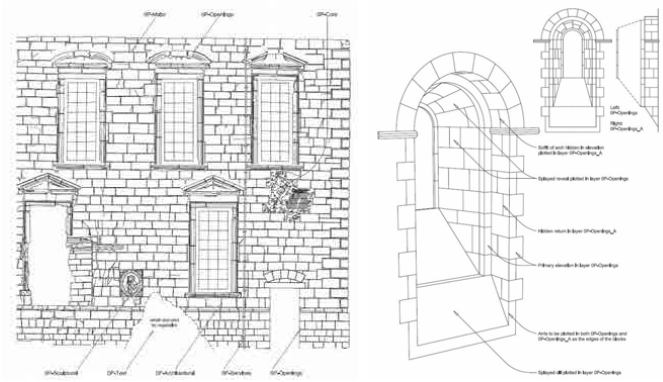


Figura 5.: Esemplificazione dell'utilizzo dei simbolismi grafici (scala di restituzione 1:20). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 4

- ***Standard Specification for Measured Building Survey***

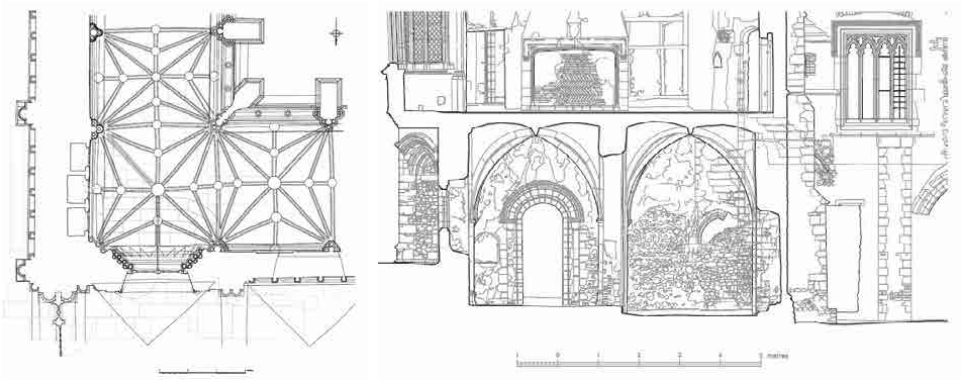


Figura 6.: Esemplificazione dei simbolismi grafici per pianta e sezione-prospetto (*sectional elevation*). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 5

- ***Standard Specification for Topographical Survey***

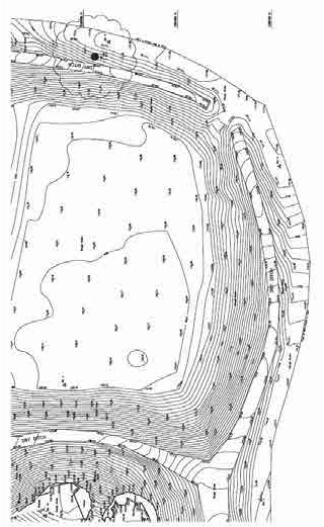


Figura 7.: Estrazione delle curve di livello a partire dal DTM e dalle *breakline*. English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 6

4. Notazioni UML

Struttura e costrutti

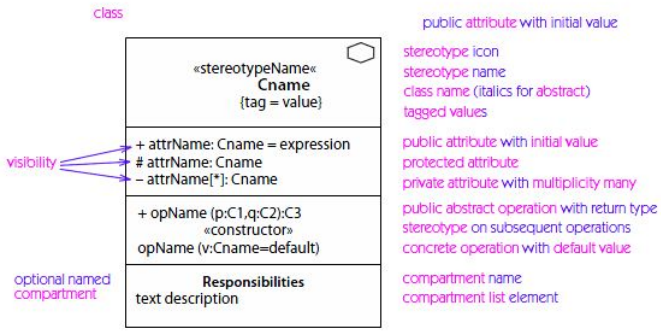


Figura 8.: rappresentazione del contenuto della classe. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Appendice B, p. 521.

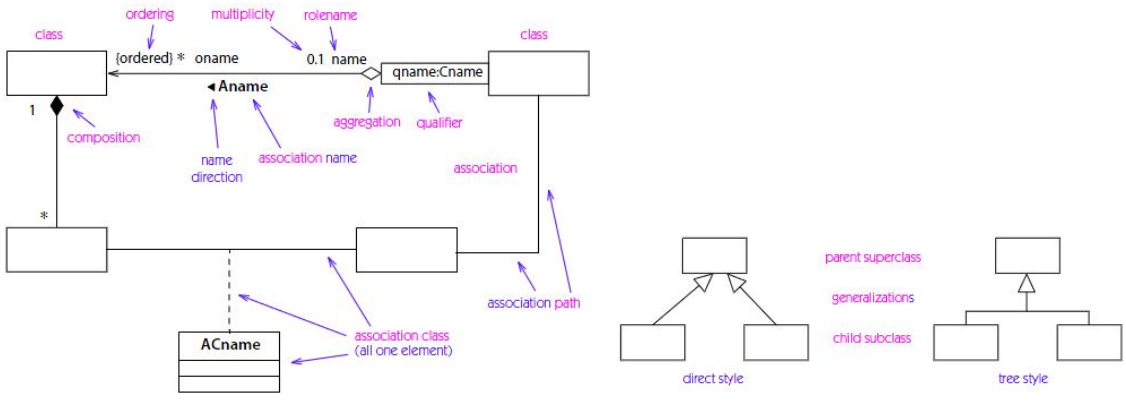


Figura 9.: rappresentazione grafica delle informazioni relative ad associazioni tra classi (sinistra) e generalizzazione (destra). Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Appendice, B p. 521,522.

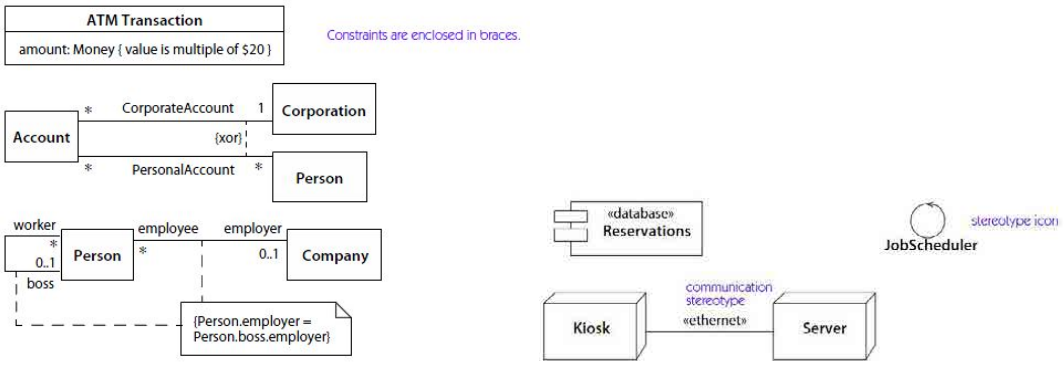


Figura 10.: estensibilità del linguaggio: *constraints* (sinistra) e *stereotypes* (destra). Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Parte 2, p. 102.

5. Specifiche ISO

ISO 10101 REFERENCE MODEL

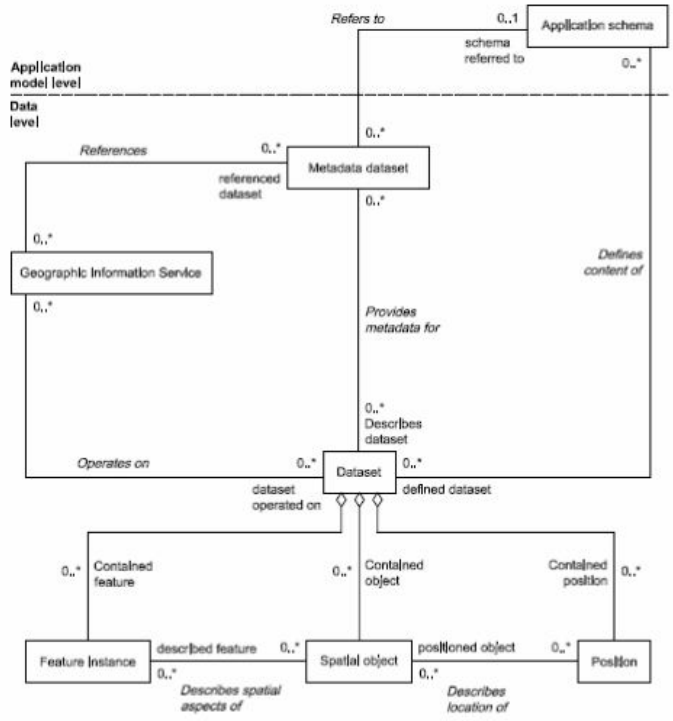


Figura 11.: diagramma UML del Domain Reference Model. ISO/TC211 *Geographic Information/Geomatics Standards Guide*, p.19.

ISO 19107:2003 SPATIAL SCHEMA

Primitive geometriche

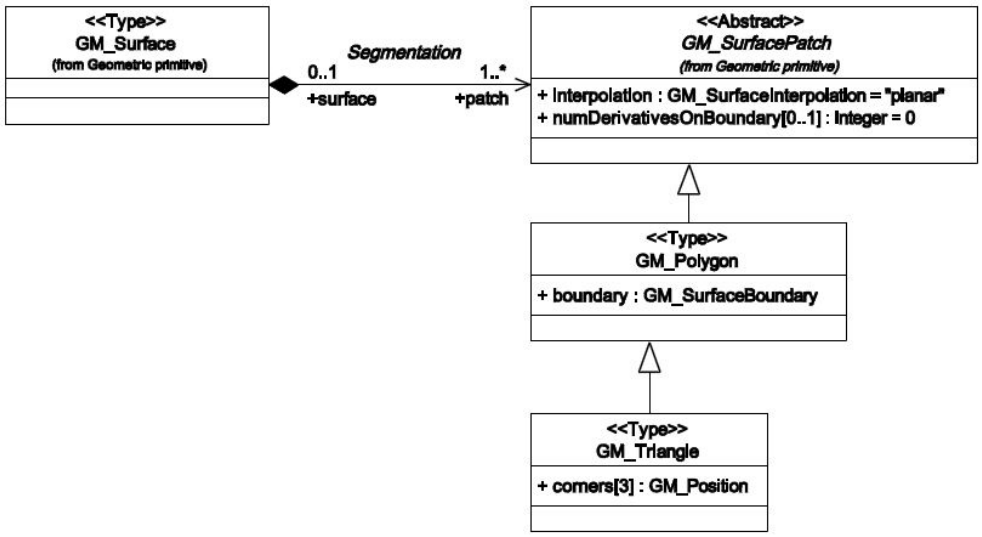


Figura 12.: superfici. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

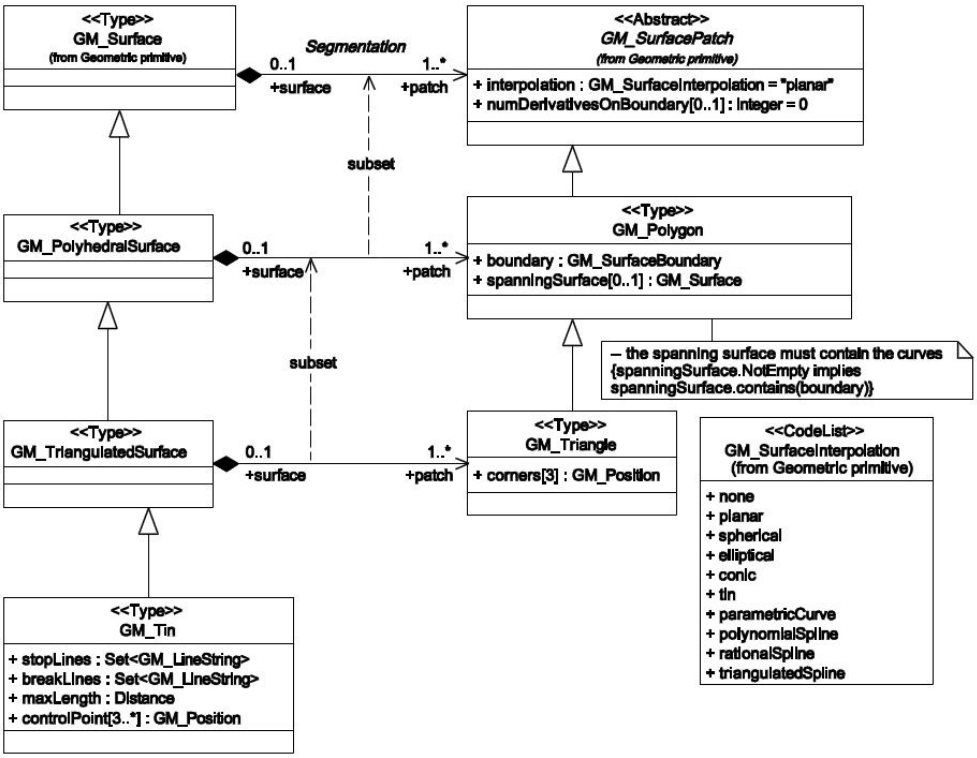


Figura 13.: superfici poligonali e triangolate. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

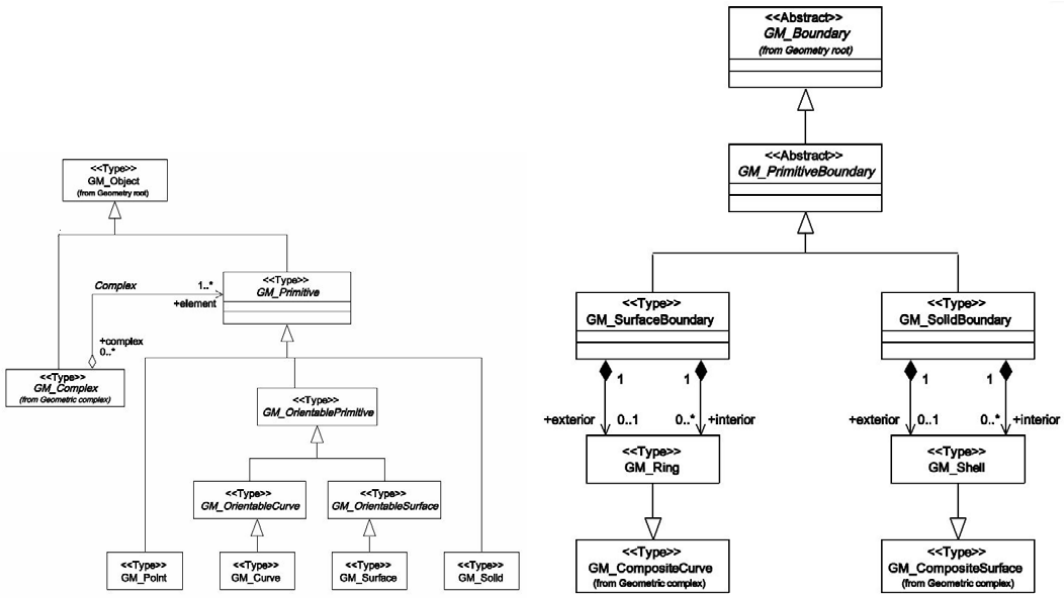


Figura 14.: primitive geometriche e contorni. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

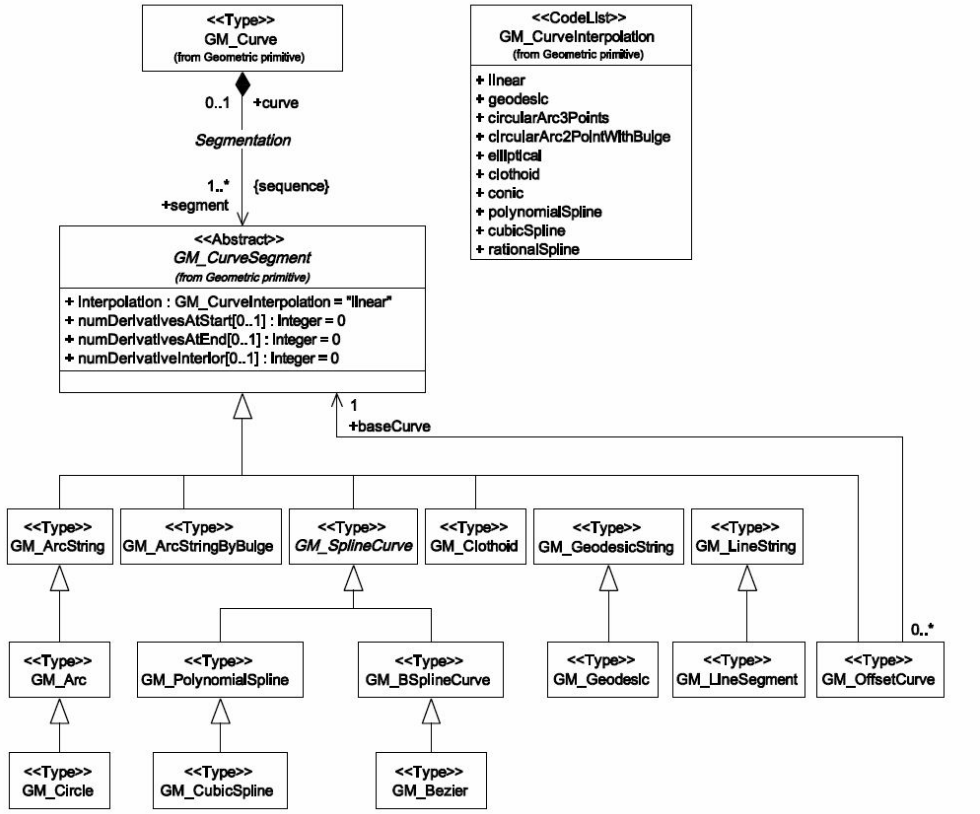


Figura 15.: diagramma delle classi che definiscono le curve. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

Aggregati, Composti, Complessi

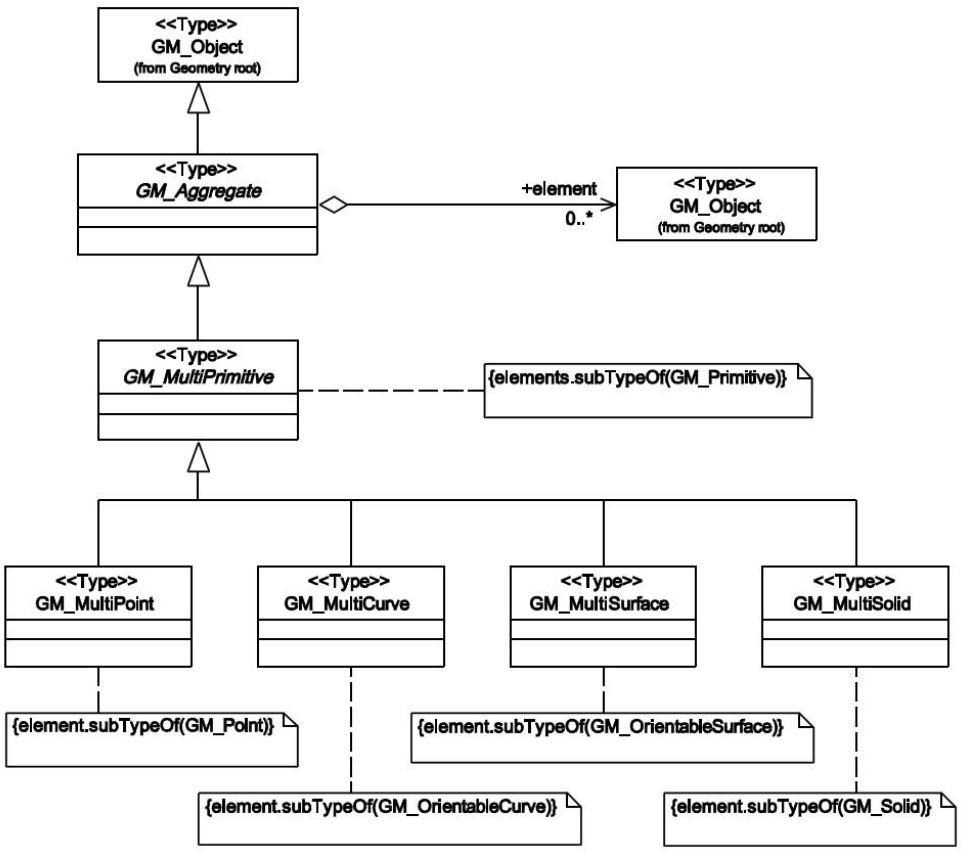


Figura 16.: aggregati. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

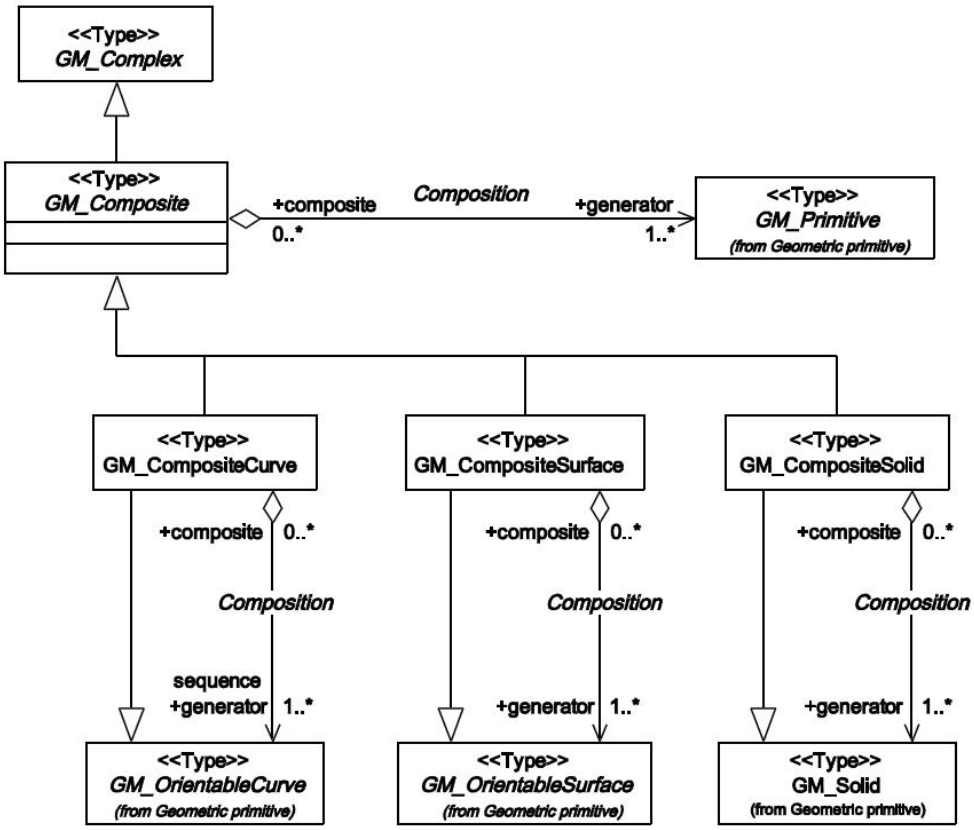


Figura 17.: composti. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

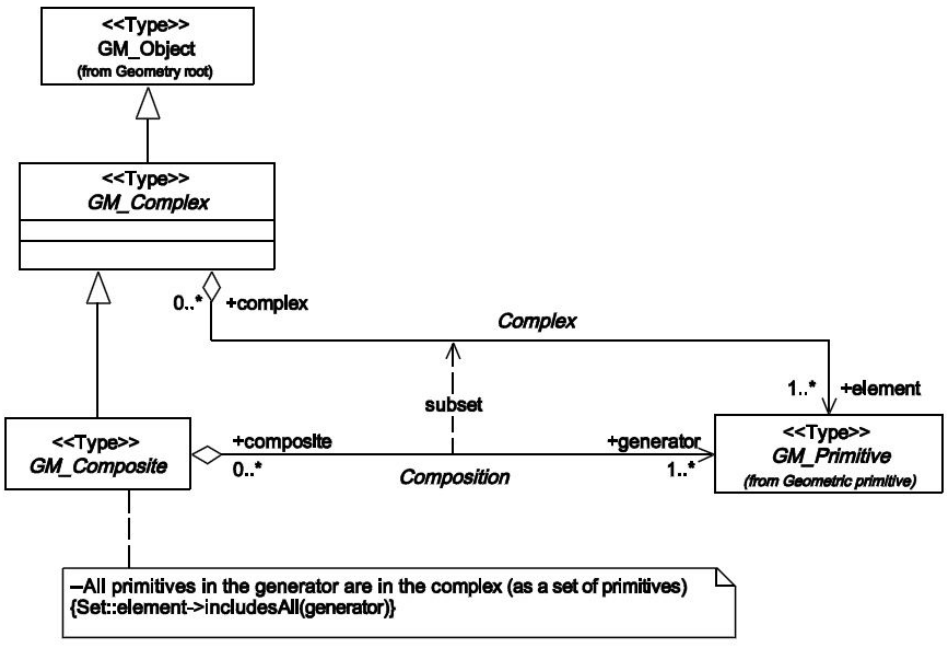


Figura 18.: complessi. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.*

Modello topologico

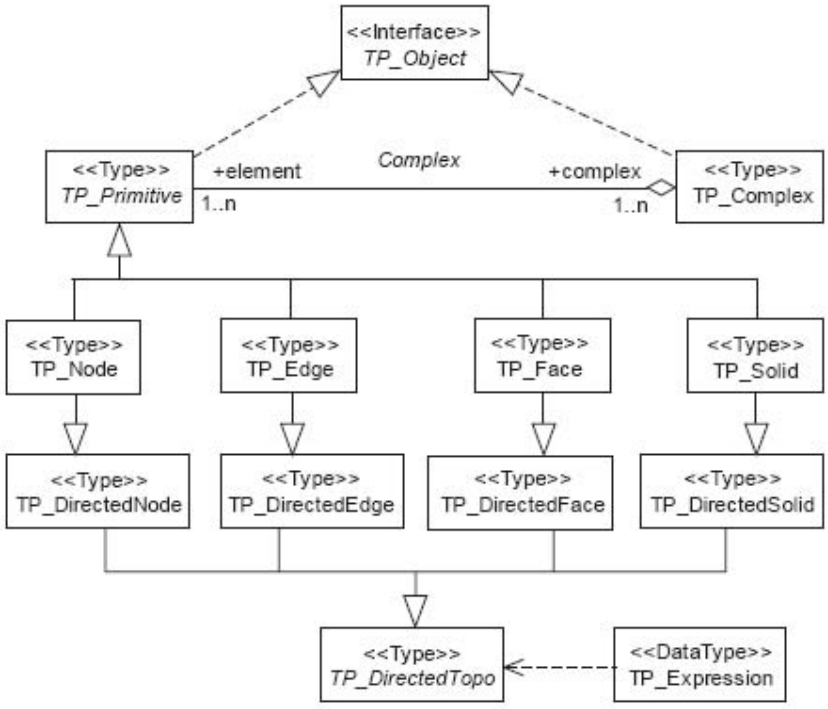


Figura 19.: diagramma della struttura topologica. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards Guide*, p.32

ISO 19108:2002 Temporal Schema

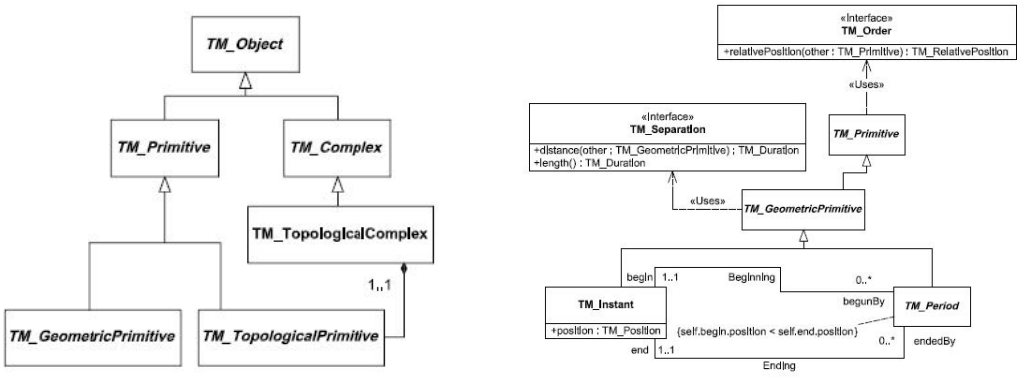


Figura 20.: diagramma UML della struttura degli oggetti temporali: classi, specializzazioni e relazioni. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards Guide,* p.36,37.

6. *OGC Abstract Specification*

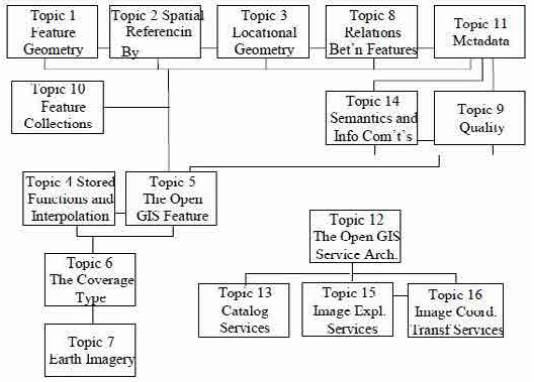


Figura 21.: *Abstract Specification Topic Dependencies*. OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 0. Abstract Specification Overview*, Capitolo 2.4, p. 4.

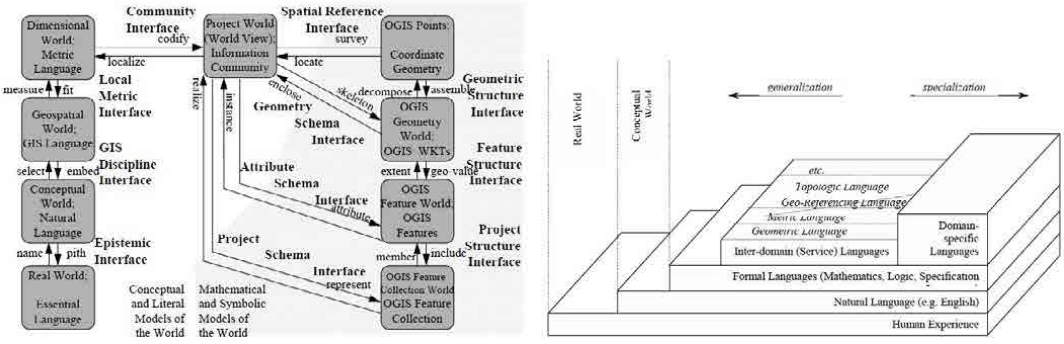


Figura 22.: meccanismo di astrazione (sinistra) e modello concettuale (destra). OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 5. Features*, Capitoli. 2.11, 2.12, p. 23,24.

Feature

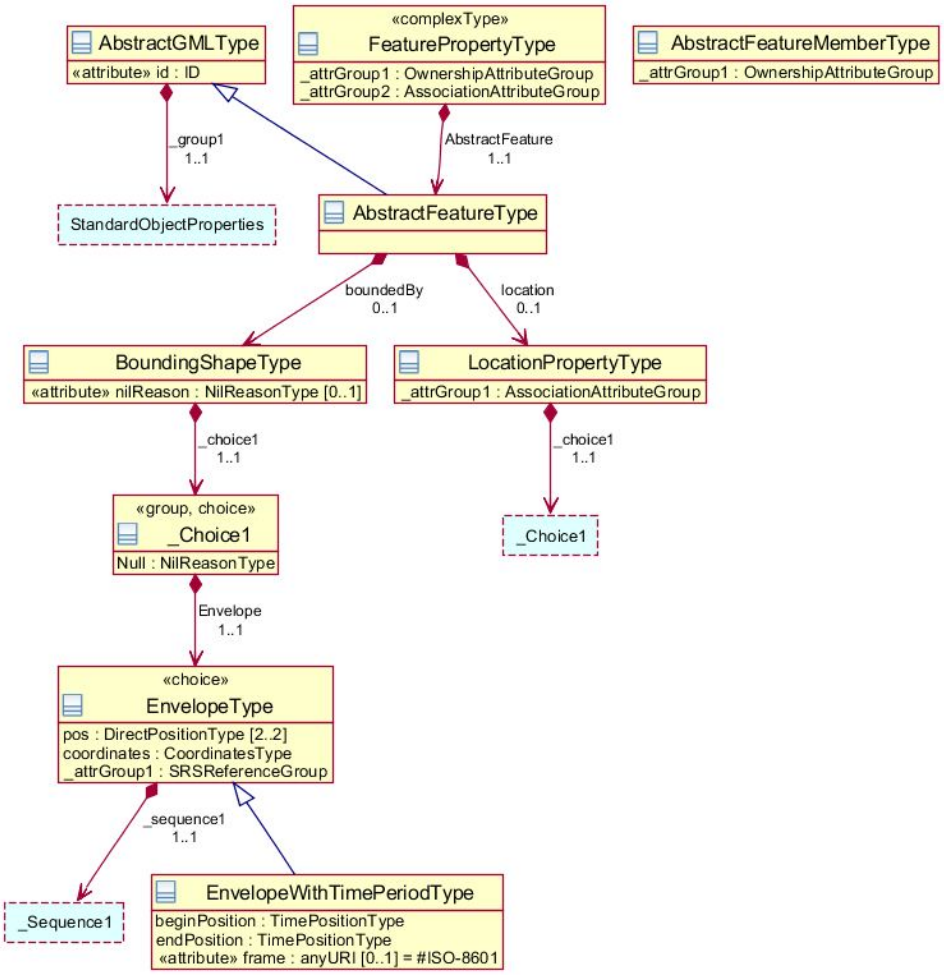


Figura 23.: *Features* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD.

Coverage

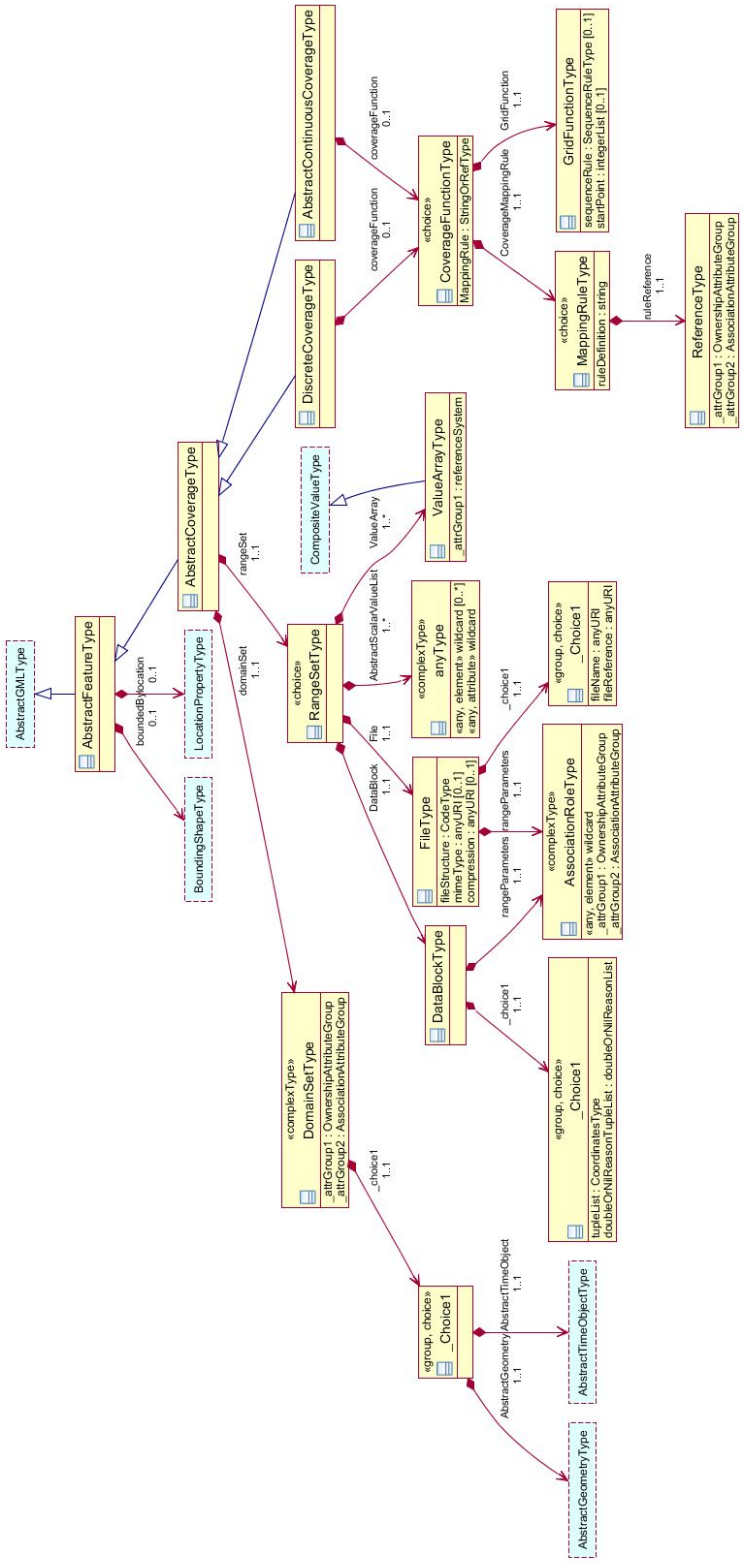


Figura 24.: *Coverages* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD.

7. Geographic Markup Language

GML Spatial Model

Change	Explanation
GM_Primitive: association "Interior to" deleted	Currently not supported by GML
GM_Polygon: attribute "spanningSurface" deleted	Currently not supported by GML
GM_Solid: converted the operation "boundary()" to an attribute	As the boundary of GM_Solid is accessible only via the "boundary()" operation, an attribute of the same name has been added. The attribute value is the result of the "boundary()" operation as defined in ISO 19107.
GM_Complex: association "Contains" deleted	Currently not supported by GML
Derived attributes deleted in GM_MultiPrimitive subtypes	These attributes may be derived from the digital representation of the objects, therefore the redundant information has been omitted.
GM_CompositePoint: deleted	GM_CompositePoint does not add any additional information. The type has been added in ISO 19107 for completeness only, but it is not expected that it would be used in instance documents. Therefore, it has been omitted in GML.
GM_PolynomialSpline has been made abstract	Currently not instantiable in GML, but the subtype GM_CubicSpline is.
GM_LineSegment: deleted	Not supported by GML, a GM_LineString with two control points shall be used instead.
GM_CurveBoundary: deleted	Only used in operations
GM_ComplexBoundary: deleted	Only used in operations

Tabella 1.: differenze tra i modelli spaziali GML e ISO 10107. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1*, Annex D, p. 275.

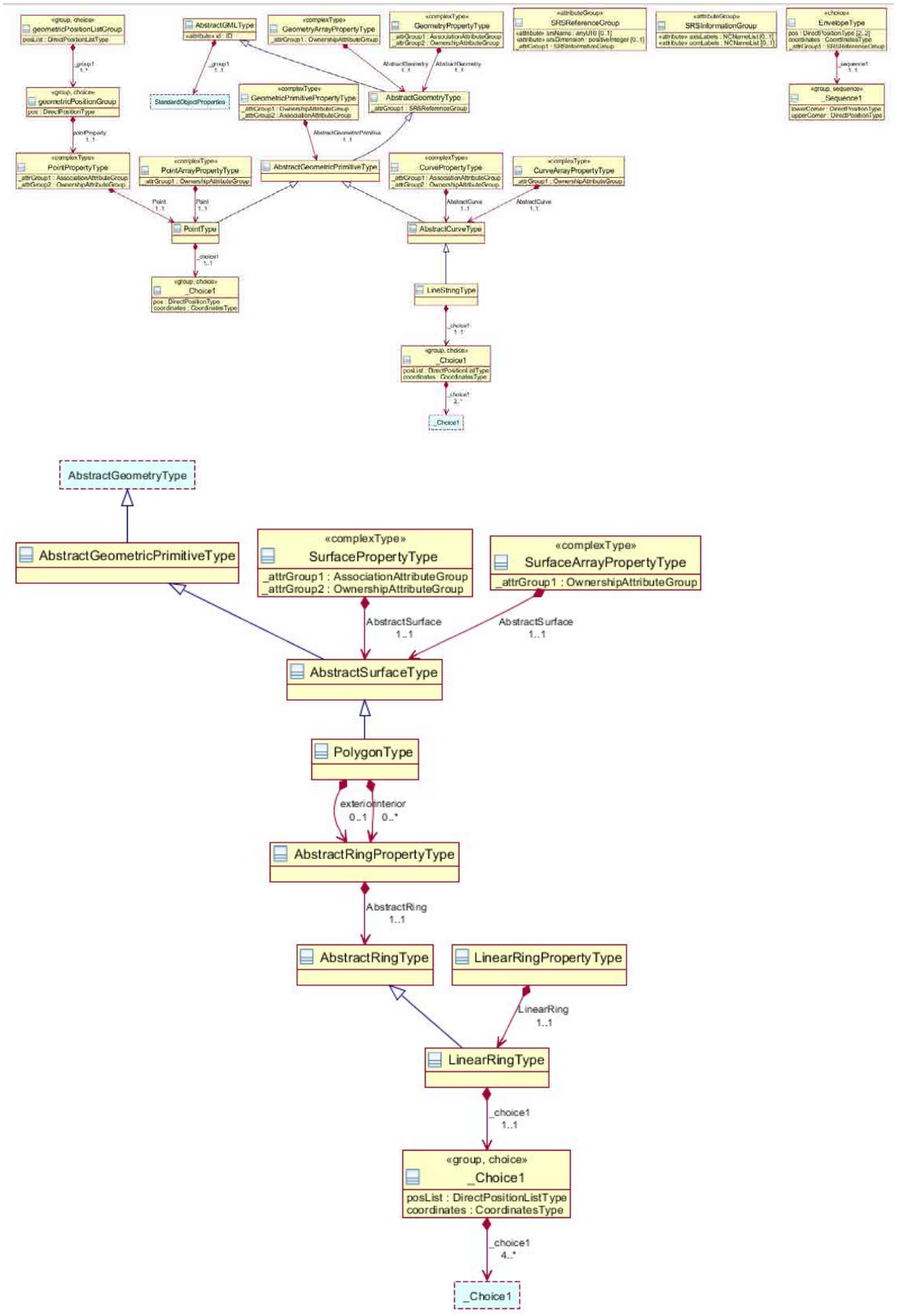


Figura 25.: *geometry basic* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD.

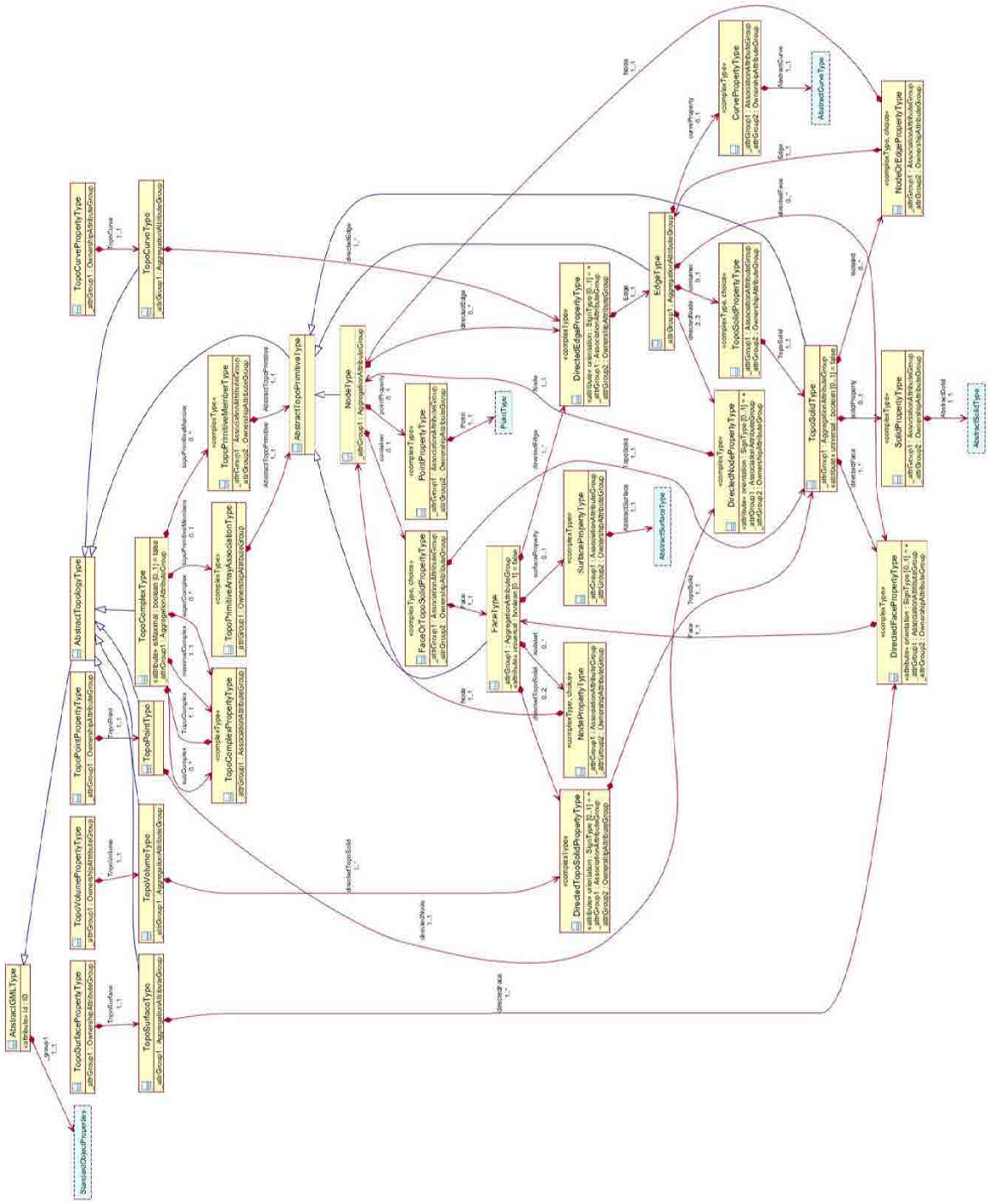


Figura 26.: *GML topology* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD.

8. City Geographic Markup Language

Spatial Model

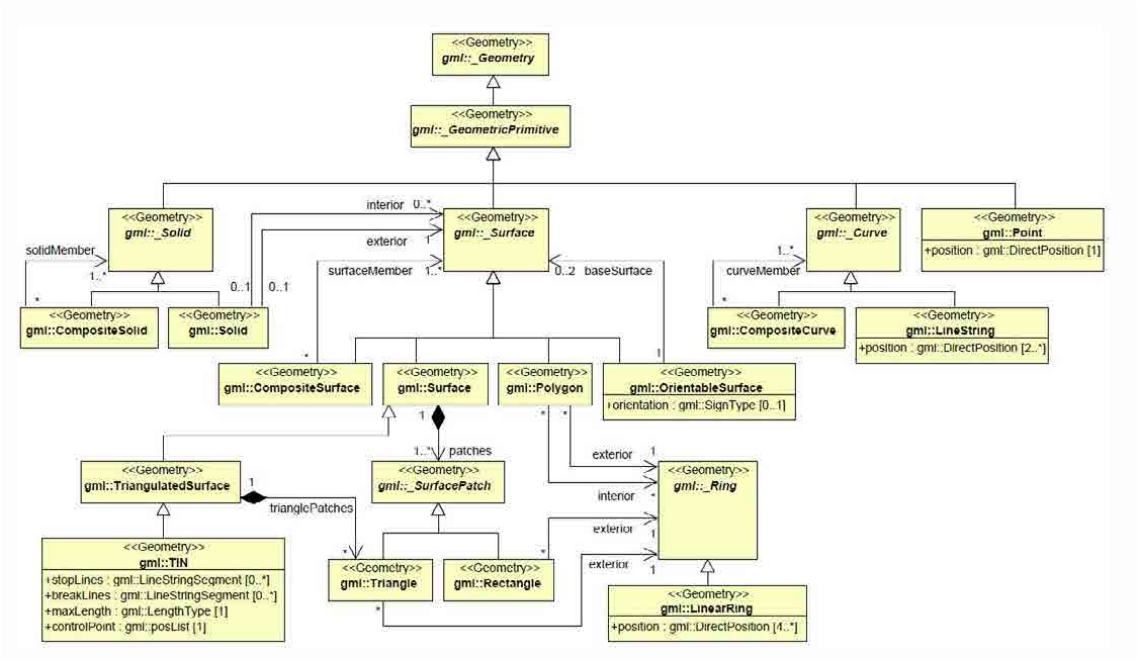


Figura 27.: diagramma UML del modulo geometrico: Primitives and Composites. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 8.1, p.23.

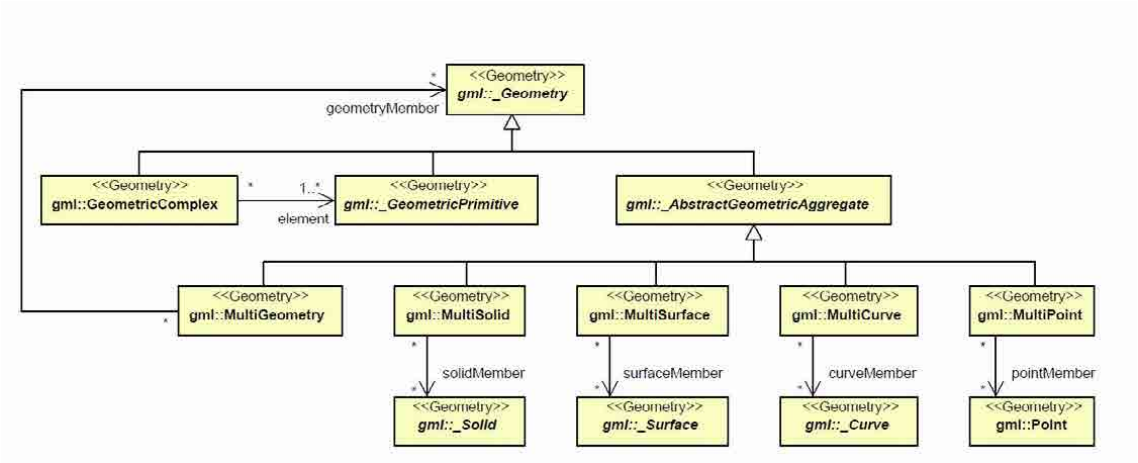


Figura 28.: diagramma UML del modulo geometrico: complessi e aggregati. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 8.1, p.23.

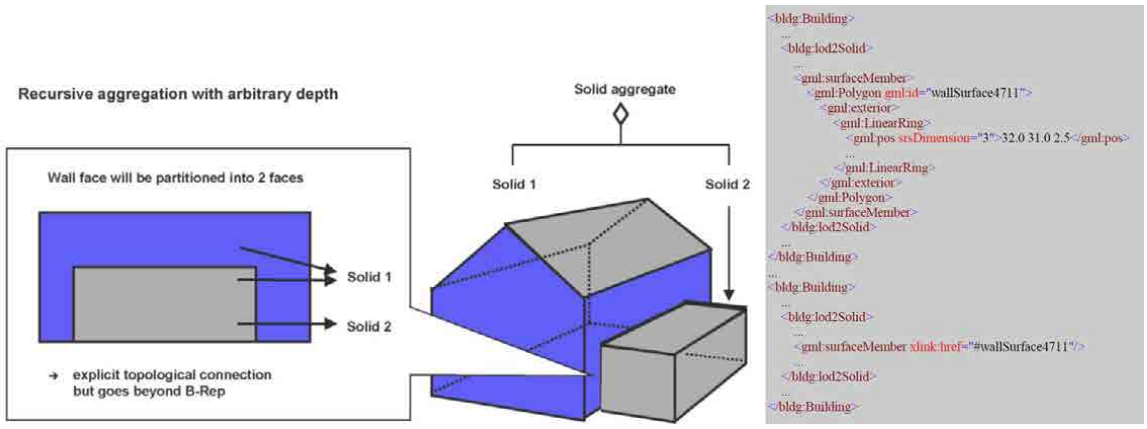


Figura 29.: aggregazione ricorsiva di oggetti e geometrie. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*, p.25.

LODs

FEATURE CLASS	PROPERTY	TYPE	LOD
core:CityModelType			0 – 4
	cityObjectMember	gml:FeaturePropertyType	0 – 4
	app:appearanceMember	app:AppearancePropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfCityModel	xs:anyType	0 – 4
core:AbstractCityObjectType			0 – 4
	creationDate	xs:date	0 – 4
	terminationDate	xs:date	0 – 4
	externalReference	core:ExternalReferenceType	0 – 4
	generalizesTo	core:GeneralizationRelationType	0 – 4
	app:appearance	app:AppearancePropertyType	0 – 4
	gen:_genericAttribute	gen:AbstractGenericAttributeType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfCityObject	xs:anyType	0 – 4
core:AbstractSiteType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfSite	xs:anyType	1 – 4
core:AddressType			0 – 4
	xalAddress	core:xalAddressPropertyType	0 – 4
	multiPoint	gml:MultiPointPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfAddress	xs:anyType	0 – 4
app:AppearanceType			0 – 4
	theme	xs:string	0 – 4
	surfaceDataMember	app:SurfaceDataPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfAppearance	xs:anyType	0 – 4
app:AbstractSurfaceDataType			0 – 4
	isFront	xs:Boolean	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfSurfaceData	xs:anyType	0 – 4
app:AbstractTextureType			0 – 4
	imageURl	xs:anyURI	0 – 4
	mimeType	core:MimeTypeType	0 – 4
	textureType	app:TextureTypeType	0 – 4
	wrapMode	app:WrapModeType	0 – 4
	borderColor	app:ColorPlusOpacity	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfTexture	xs:anyType	0 – 4
app:ParameterizedTextureType			0 – 4
	target	app:TextureAssociationType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfParameterizedTexture	xs:anyType	0 – 4
app:GeoreferencedTextureType			0 – 4
	preferWorldFile	xs:boolean	0 – 4
	referencePoint	gml:PointPropertyType	0 – 4
	orientation	core:TransformationMatrix2x2Type	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfGeoreferencedTexture	xs:anyType	0 – 4
app:X3DMaterialType			0 – 4
	ambientIntensity	core:doubleBetween0and1	0 – 4
	diffuseColor	app:Color	0 – 4
	emissiveColor	app:Color	0 – 4
	specularColor	app:Color	0 – 4
	shininess	core:doubleBetween0and1	0 – 4
	transparency	core:doubleBetween0and1	0 – 4
	isSmooth	xs:boolean	0 – 4
	target	xs:anyURI	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfX3DMaterial	xs:anyType	0 – 4
bldg:AbstractBuildingType			1 – 4
	class	bldg:BuildingClassType	1 – 4
	function	bldg:BuildingFunctionType	1 – 4
	usage	bldg:BuildingUsageType	1 – 4
	yearOfConstruction	xs:gYear	1 – 4
	yearOfDemolition	xs:gYear	1 – 4
	roofType	bldg:RoofTypeType	1 – 4
	measuredHeight	gml:LengthType	1 – 4
	storeysAboveGround	xs:nonNegativeInteger	1 – 4
	storeysBelowGround	xs:nonNegativeInteger	1 – 4
	storeyHeightsAboveGround	gml:MeasureOrNullListType	1 – 4
	storeyHeightsBelowGround	gml:MeasureOrNullListType	1 – 4
	lod1Solid	gml:SolidPropertyType	1
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod1TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	1
	lod2Solid	gml:SolidPropertyType	2
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod2MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	2
	lod2TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	2
	outerBuildingInstallation	bldg:BuildingInstallationPropertyType	2 – 4
	interiorBuildingInstallation	bldg:IntBuildingInstallationPropertyType	4
	boundedBy	bldg:BoundarySurfacePropertyType	2 – 4
	lod3Solid	gml:SolidPropertyType	3
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod3MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	3
	lod3TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	3
	lod4Solid	gml:SolidPropertyType	4
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	lod4MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	4
	lod4TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	4
	interiorRoom	bldg:InteriorRoomPropertyType	4
	consistsOfBuildingPart	bldg:BuildingPartPropertyType	1 – 4
	address	core:AddressPropertyType	1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding	xs:anyType	1 – 4
bldg:BuildingType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfBuiding	xs:anyType	1 – 4
bldg:BuildingPartType			1 – 4

Tabella 2.: corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard* Annex E, p.179.

	emissiveColor	app:Color	0 – 4
	specularColor	app:Color	0 – 4
	shininess	core:doubleBetween0and1	0 – 4
	transparency	core:doubleBetween0and1	0 – 4
	isSmooth	xs:boolean	0 – 4
	target	xs:anyURI	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfX3DMaterial	xs:anyType	0 – 4
bldg:AbstractBuildingType			1 – 4
	class	bldg:BuildingClassType	1 – 4
	function	bldg:BuildingFunctionType	1 – 4
	usage	bldg:BuildingUsageType	1 – 4
	yearOfConstruction	xs:gYear	1 – 4
	yearOfDemolition	xs:gYear	1 – 4
	roofType	bldg:RoofTypeType	1 – 4
	measuredHeight	gml:LengthType	1 – 4
	storeysAboveGround	xs:nonNegativeInteger	1 – 4
	storeysBelowGround	xs:nonNegativeInteger	1 – 4
	storeyHeightsAboveGround	gml:MeasureOrNullListType	1 – 4
	storeyHeightsBelowGround	gml:MeasureOrNullListType	1 – 4
	lod1Solid	gml:SolidPropertyType	1
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod1TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	1
	lod2Solid	gml:SolidPropertyType	2
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod2MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	2
	lod2TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	2
	outerBuildingInstallation	bldg:BuildingInstallationPropertyType	2 – 4
	interiorBuildingInstallation	bldg:IntBuildingInstallationPropertyType	4
	boundedBy	bldg:BoundarySurfacePropertyType	2 – 4
	lod3Solid	gml:SolidPropertyType	3
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod3MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	3
	lod3TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	3
	lod4Solid	gml:SolidPropertyType	4
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	lod4MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	4
	lod4TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	4
	interiorRoom	bldg:InteriorRoomPropertyType	4
	consistsOfBuildingPart	bldg:BuildingPartPropertyType	1 – 4
	address	core:AddressPropertyType	1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding	xs:anyType	1 – 4
bldg:BuildingType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfBuiding	xs:anyType	1 – 4
bldg:BuildingPartType			1 – 4

	_GenericApplicationPropertyOfBuidingPart	xs:anyType	1 – 4
bldg:BuildingInstallationType			2 – 4
	class	bldg:BuildingInstallationClassType	2 – 4
	function	bldg:BuildingInstallationFunctionType	2 – 4
	usage	bldg:BuildingInstallationUsageType	2 – 4
	lod2Geometry	gml:GeometryPropertyType	2
	lod3Geometry	gml:GeometryPropertyType	3
	lod4Geometry	gml:GeometryPropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfBuidingInstallation	xs:anyType	2 – 4
bldg:IntBuildingInstallationType			4
	class	bldg:IntBuildingInstallationClassType	4
	function	bldg:IntBuildingInstallationFunctionType	4
	usage	bldg:IntBuildingInstallationUsageType	4
	lod4Geometry	gml:GeometryPropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfIntBuidingInstallation	xs:anyType	4
bldg:AbstractBoundarySurface Type			2 – 4
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	opening	bldg:OpeningPropertyType	3 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfBoundarySurface	xs:anyType	2 – 4
bldg:RoofSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfRoofSurface	xs:anyType	2 – 4
bldg:WallSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWallSurface	xs:anyType	2 – 4
bldg:GroundSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfGroundSurface	xs:anyType	2 – 4
bldg:ClosureSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfClosureSurface	xs:anyType	2 – 4
bldg:FloorSurfaceType			4
	_GenericApplicationPropertyOfFloorSurface	xs:anyType	4
bldg:InteriorWallSurfaceType			4
	_GenericApplicationPropertyOfInteriorWallSurface	xs:anyType	4
bldg:CeilingSurfaceType			4
	_GenericApplicationPropertyOfCeilingSurface	xs:anyType	4
bldg:AbstractOpeningType			3 – 4
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfOpening	xs:anyType	3 – 4
bldg:WindowType			3 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWindow	xs:anyType	3 – 4
bldg:DoorType			3 – 4
	address	core:AddressPropertyType	3 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfCeilingSurface	xs:anyType	3 – 4

Tabella 3.: corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179.

	usage	xs:string	0 – 4
	lod0Geometry	gml:GeometryPropertyType	0
	lod1Geometry	gml:GeometryPropertyType	1
	lod2Geometry	gml:GeometryPropertyType	2
	lod3Geometry	gml:GeometryPropertyType	3
	lod4Geometry	gml:GeometryPropertyType	4
	lod0TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	0
	lod1TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	1
	lod2TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	2
	lod3TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	3
	lod4TerrainIntersection	gml:MultiCurvePropertyType	4
	lod0ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	0
	lod1ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	1
	lod2ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	2
	lod3ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	3
	lod4ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	4
luse:LandUseType			0 – 4
	class	luse:LandUseClassType	0 – 4
	function	luse:LandUseFunctionType	0 – 4
	usage	luse:LandUseUsageType	0 – 4
	lod0MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	0
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfLandUse	xs:anyType	0 – 4
dem:ReliefFeatureType			0 – 4
	lod	core:integerBetween0and4	0 – 4
	reliefComponent	dem:ReliefComponentPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationProperty	xs:anyType	0 – 4
dem:AbstractReliefComponent Type			0 – 4
	lod	core:integerBetween0and4	0 – 4
	extent	gml:PolygonPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfReliefComponent	xs:anyType	0 – 4
dem:TINReliefType			0 – 4
	tin	dem:tinPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfTINRelief	xs:anyType	0 – 4
dem:RasterReliefType			0 – 4
	grid	dem:gridPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfRasterRelief	xs:anyType	0 – 4
dem:MassPointReliefType			0 – 4
	reliefPoints	gml:MultiPointPropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfMassPointRelief	xs:anyType	0 – 4
dem:BreakLineReliefType			0 – 4

	ridgeOrValleyLines	gml:MultiCurvePropertyType	0 – 4
	breaklines	gml:MultiCurvePropertyType	0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfBreakLineRelief	xs:anyType	0 – 4
tran:AbstractTransportationObject Type			0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfTransportationObject	xs:anyType	0 – 4
tran:TransportationComplexType			0 – 4
	function	tran:TransportationComplexFunction Type	0 – 4
	usage	tran:TransportationComplexUsageType	0 – 4
	trafficArea	tran:TrafficAreaPropertyType	0 – 4
	auxilaryTrafficArea	tran:AuxilaryTrafficAreaPropertyType	0 – 4
	lod0Network	gml:GeometricComplexPropertyType	0
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfTransportationComplex	xs:anyType	0 – 4
tran:TrafficAreaType			1 – 4
	usage	tran:TrafficAreaUsageType	1 – 4
	function	tran:TrafficAreaFunctionType	1 – 4
	surfaceMaterial	tran:TrafficSurfaceMaterialType	1 – 4
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfTrafficArea	xs:anyType	1 – 4
tran:AuxillaryTrafficAreaType			1 – 4
	function	tran:AuxiliaryTrafficAreaFunctionType	1 – 4
	surfaceMaterial	tran:TrafficSurfaceMaterialType	1 – 4
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfAuxiliaryTrafficArea	xs:anyType	1 – 4
tran:TrackType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfTrack	xs:anyType	1 – 4
tran:RoadType			1 – 4
	_GenericApplicationProperty	xs:anyType	1 – 4
tran:RailwayType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfRailway	xs:anyType	1 – 4
tran:SquareType			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfSquare	xs:anyType	1 – 4
veg:AbstractVegetationObject Type			1 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfVegetationObject	xs:anyType	1 – 4
veg:PlantCoverType			1 – 4

Tabella 4.: corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179.

	class	veg:PlantCoverClassType	1 – 4
	function	veg:PlantCoverFunctionType	1 – 4
	averageHeight	gml:LengthType	1 – 4
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod2MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	2
	lod3MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	3
	lod4MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	4
	lod1MultiSolid	gml:MultiSolidPropertyType	1
	lod2MultiSolid	gml:MultiSolidPropertyType	2
	lod3MultiSolid	gml:MultiSolidPropertyType	3
	_GenericApplicationPropertyOfPlantCover	xs:anyType	1 – 4
veg:SolitaryVegetation ObjectType			1 – 4
	class	veg:PlantClassType	1 – 4
	function	veg:PlantFunctionType	1 – 4
	species	veg:SpeciesType	1 – 4
	height	gml:LengthType	1 – 4
	trunkDiameter	gml:LengthType	1 – 4
	crownDiameter	gml:LengthType	1 – 4
	lod1Geometry	gml:GeometryPropertyType	1
	lod2Geometry	gml:GeometryPropertyType	2
	lod3Geometry	gml:GeometryPropertyType	3
	lod4Geometry	gml:GeometryPropertyType	4
	lod1ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	1
	lod2ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	2
	lod3ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	3
	lod4ImplicitRepresentation	core:ImplicitRepresentationPropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfSolitaryVegetationObject	xs:anyType	1 – 4
wtr:AbstractWaterObjectType			0 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWaterObject	xs:anyType	0 – 4
wtr:WaterBodyType			0 – 4
	class	wtr:WaterBodyClassType	0 – 4
	function	wtr:WaterBodyFunctionType	0 – 4
	usage	wtr:WaterBodyUsageType	0 – 4
	lod0MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	0
	lod1MultiCurve	gml:MultiCurvePropertyType	1
	lod0MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	0
	lod1MultiSurface	gml:MultiSurfacePropertyType	1
	lod1Solid	gml:SolidPropertyType	1
	lod2Solid	gml:SolidPropertyType	2
	lod3Solid	gml:SolidPropertyType	3
	lod4Solid	gml:SolidPropertyType	4
	boundedBy	wtr:BoundedByWaterSurface PropertyType	2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWaterBody	xs:anyType	0 – 4
wtr:AbstractWaterBoundary SurfaceType			2 – 4

	lod2Surface	gml:SurfacePropertyType	2
	lod3Surface	gml:SurfacePropertyType	3
	lod4Surface	gml:SurfacePropertyType	4
	_GenericApplicationPropertyOfWaterBoundarySurface	xs:anyType	2 – 4
wtr:WaterSurfaceType			2 – 4
	waterLevel	WaterLevelType	2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWaterSurface	xs:anyType	2 – 4
wtr:WaterGroundSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationPropertyOfWaterGroundSurface	xs:anyType	2 – 4
wtr:WaterClosureSurfaceType			2 – 4
	_GenericApplicationProperty	xs:anyType	2 – 4

Tabella 5.: corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179.

Moduli tematici

BuildingClassType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	habitation	1100	schools, education, research
1010	sanitation	1110	maintainence and waste management
1020	administration	1120	healthcare
1030	business, trade	1130	communicating
1040	catering	1140	security
1050	recreation	1150	storage
1060	sport	1160	industry
1070	culture	1170	traffic
1080	church institution	1180	function
1090	agriculture, forestry		

BuildingFunctionType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	residential building	1840	rubbish bunker
1010	tenement	1850	building for rubbish incineration
1020	hostel	1860	building for rubbish disposal
1030	residential- and administration building	1870	building for agrarian and forestry
1040	residential- and office building	1880	barn
1050	residential- and business building	1890	stall
1060	residential- and plant building	1900	equestrian hall
1070	agrarian- and forestry building	1910	alpine cabin
1080	residential- and commercial building	1920	hunting lodge
1090	forester's lodge	1930	arboretum
1100	holiday house	1940	glass house
1110	summer house	1950	moveable glass house
1120	office building	1960	public building
1130	credit institution	1970	administration building
1140	insurance	1980	parliament
1150	business building	1990	guildhall
1160	department store	2000	post office
1170	shopping centre	2010	customs office
1180	kiosk	2020	court
1190	pharmacy	2030	embassy or consulate
1200	pavilion	2040	district administration
1210	hotel	2050	district government
1220	youth hostel	2060	tax office
1230	campsite building	2070	building for education and research
1240	restaurant	2080	comprehensive school
1250	cantine	2090	vocational school
1260	recreational site	2100	college or university
1270	function room	2110	research establishment
1280	cinema	2120	building for cultural purposes
1290	bowling alley	2130	castle

Tabella 6.: *codelist* dei valori dell'attributo *class* e un estratto di quelli di *function* (identici a *usage*). In evidenza quelli implementati per le occorrenze della classe *Building*: in azzurro i valori di *class* e *function*, in giallo quelli di *usage*.

CityGML core

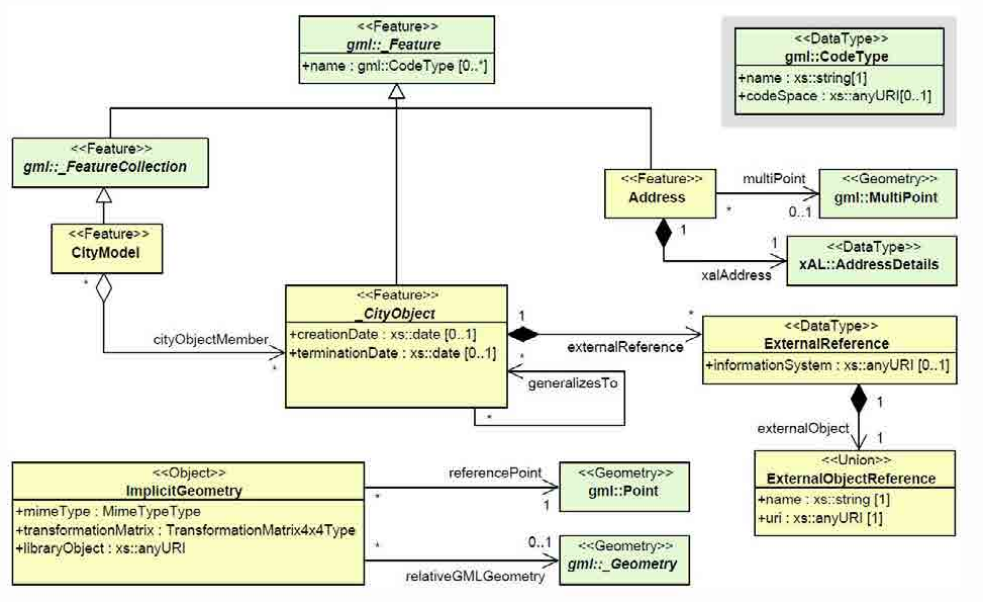


Figura 30.: diagramma UML del *Core Module*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.44.

GenericCityObject

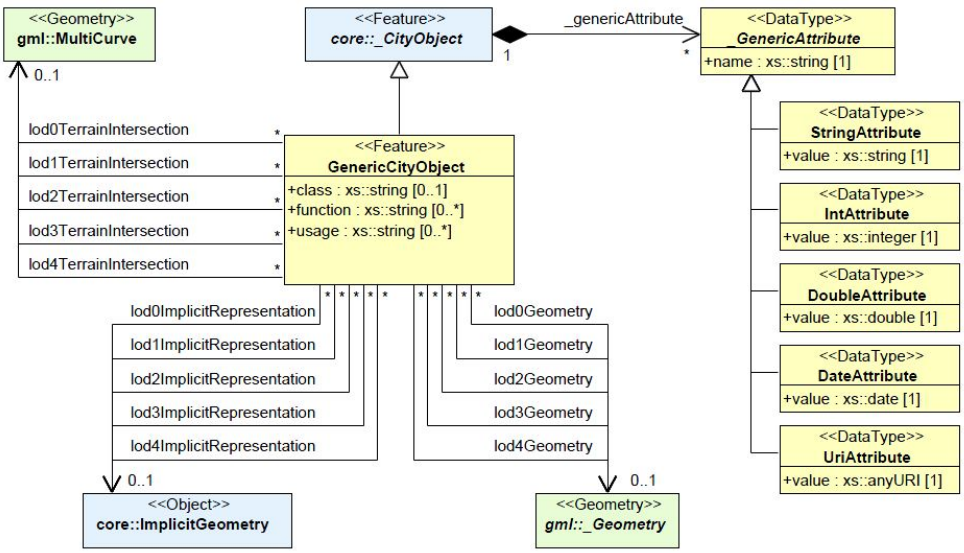


Figura 31.: diagramma UML della classe *GenericCityObjects* con le relative dipendenze. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.98.

Building Module

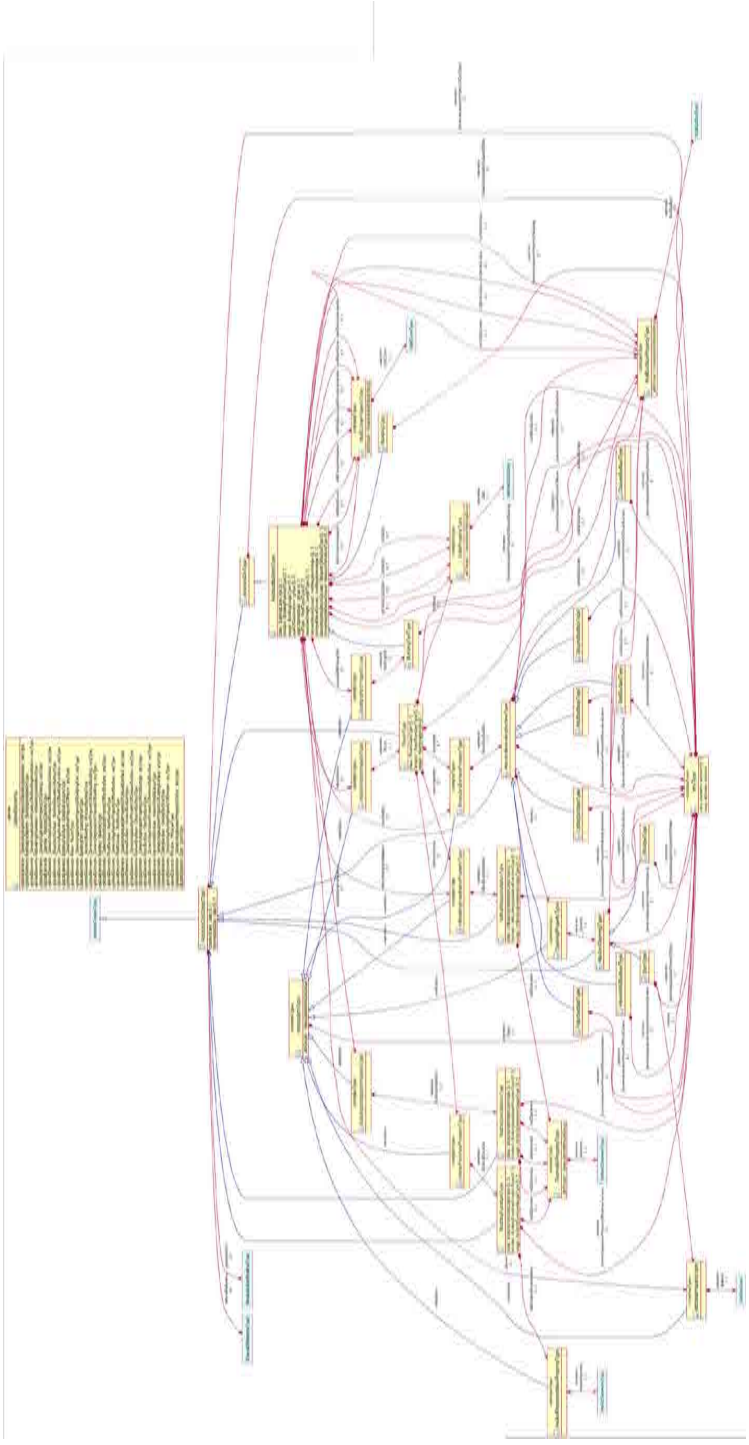


Figura 32.: *unmarshalling* dello schema XSD *bldg::Building*. Il diagramma UML può essere confrontato con quello fornito nelle specifiche dell'OGC. A differenza dello schema UML puro, come quello dell'OGC, in questo schema le relazioni sono rappresentate come classi, con lo stesso nome della classe da cui la relazione è uscente cui si aggiunge il suffisso *PropertyType*.

LandUse Module

Questo modulo è utilizzato l'uso del suolo ovvero per qualificare porzioni della superficie della terra caratterizzate diversamente dall'attività antropica. È costituita da un'unica classe *LandUse* che dispone di tre attributi: *class*, *function*, *usage* che similmente a quelli dell'_*AbstractBuilding* classificano la tipologia e la funzione dell'oggetto spaziale. La classe è legata tramite 4 relazioni diverse, una per ciascun LOD, con la classe *gml::MultiSurface*. Questo modulo trova la sua più diretta applicazione nella gestione dei dati catastali, ma si presta ad essere utilizzato in tutti i casi in cui è necessario qualificare semanticamente il contenuto geometrico delle rappresentazioni del territorio.

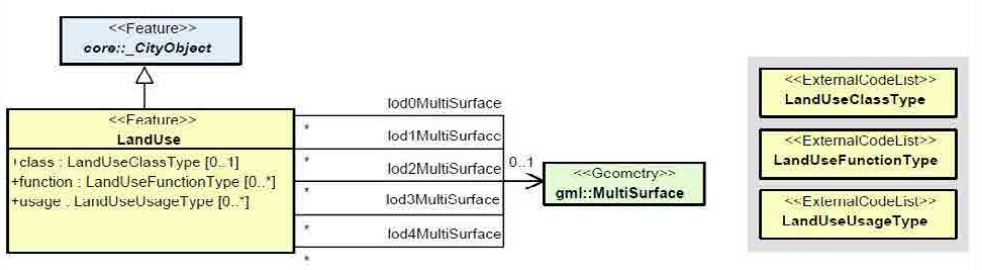


Figura 33.: Land Use OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.94.

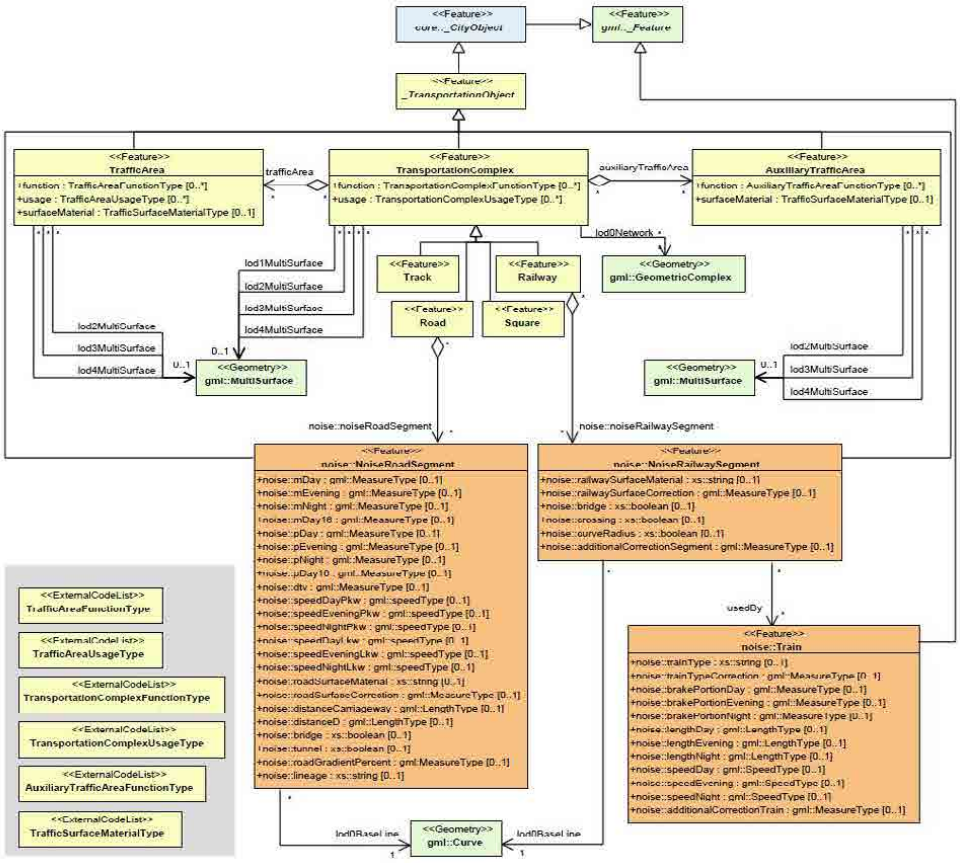


Figura 34.: Noise ADE: schema dell'estensione del modulo *Transportation*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.44.

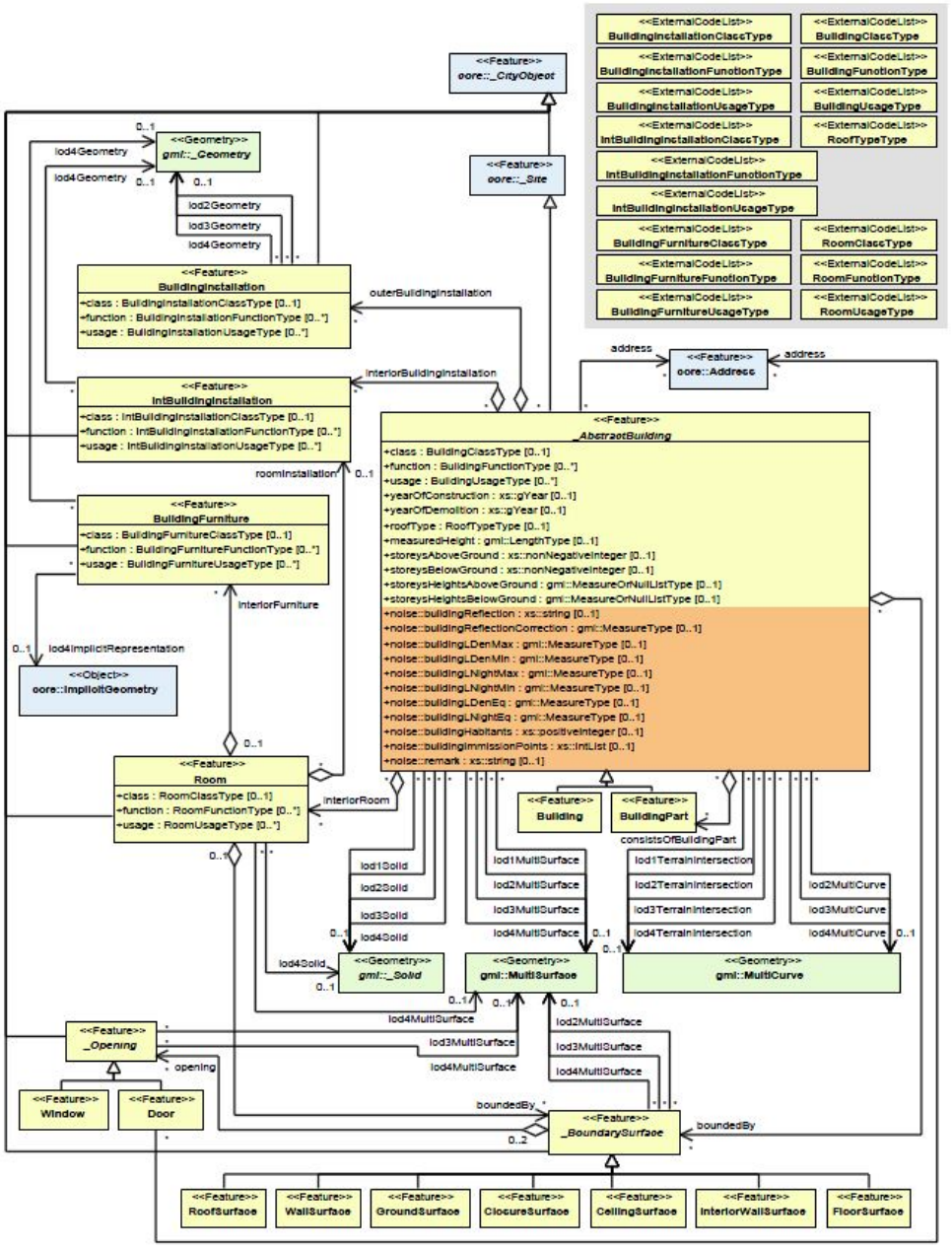


Figura 35.: Noise ADE: schema dell'estensione del modulo *Building*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.44.

Noise ADE

9. Specifiche IntesaGIS

Il Catalogo degli Oggetti (1n1007_1-2)

CLASSE DI GEOUML	SIGNIFICATO	CLASSE DI SPATIAL SCHEMA
GU_Point2D	punto 2D	GM_Point
GU_Point3D	punto 3D	GM_Point
GU_CPCurve2D	linea (composta) 2D	GM_CompositeCurve
GU_CPCurve3D	linea (composta) 3D	GM_CompositeCurve
GU_CPRing2D	anello 2D	GM_CompositeCurve
GU_CPRing3D	anello 3D	GM_CompositeCurve
GU_CPSurface2D	superficie (composta) 2D	GM_CompositeSurface
GU_CNCurve2D	curva connessa 2D	GM_Complex
GU_CNCurve3D	curva connessa 3D	GM_Complex
GU_CXCurve2D	curva complessa 2D	GM_Complex
GU_CXCurve3D	curva complessa 3D	GM_Complex
GU_CXRing2D	anello complesso 2D	GM_Complex
GU_CXRing3D	anello complesso 3D	GM_Complex
GU_CXSurface2D	superficie complessa 2D	GM_Complex
GU_Complex2D	complesso 2D	GM_Complex
GU_Complex3D	complesso 3D (contiene solo linee e punti)	GM_Complex
GU_Aggregate2D	aggregato (insieme) 2D	GM_Aggregate
GU_Aggregate3D	aggregato 3D	GM_Aggregate
GU_MPoint2D	insieme di punti 2D	GM_MultiPoint
GU_MPoint3D	insieme di punti 3D	GM_MultiPoint
GU_MCurve2D	insieme di linee 2D	GM_MultiCurve
GU_MCurve3D	insieme di linee 3D	GM_MultiCurve
GU_MSurface2D	insieme di superfici 2D	GM_MultiSurface
GU_MRing2D	insieme di anelli 2D	GM_Aggregate
GU_MRing3D	insieme di anelli 3D	GM_Aggregate
GU_Complex3D	complesso 3D (contiene solo linee e punti)	GM_Complex
GU_Aggregate2D	aggregato (insieme) 2D	GM_Aggregate
GU_Aggregate3D	aggregato 3D	GM_Aggregate
GU_MPoint2D	insieme di punti 2D	GM_MultiPoint
GU_MPoint3D	insieme di punti 3D	GM_MultiPoint
GU_MCurve2D	insieme di linee 2D	GM_MultiCurve
GU_MCurve3D	insieme di linee 3D	GM_MultiCurve
GU_MSurface2D	insieme di superfici 2D	GM_MultiSurface
GU_MRing2D	insieme di anelli 2D	GM_Aggregate
GU_MRing3D	insieme di anelli 3D	GM_Aggregate

Tabella 7.: classi geometriche GeoUML e derivazione dalle classi ISO Spatial Schema. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti.* p.60.

Inquadramento generale ed introduzione all'uso (1n1010_2)

In questo esempio possiamo vedere come si esplica la definizione di un vincolo topologico secondo il modello concettuale GeoUML definito dell'IntesaGIS. Essendo il modello topologico integrato nello schema spaziale geometrico la strutturazione delle relazioni topologiche deve necessariamente essere espressa tramite i meccanismi di estensione previsti dal linguaggio UML. In particolare in queste specifiche viene utilizzato il meccanismo dello *stereotype* che restringendo il dominio di applicazione di un determinato tipo di classe permette di esprimere dei vincoli alle classi. Viene definita una classe vincolante AreaCircolazione (AC) per vincolare la classe ElementoStradale utilizzando come vincolo topologico (vtopo) la classe VT_Elemento_Stradale.

Codifica in GeoUML:

«classe AreaStradale

attributi: estensione: GU_CPSurface2D

classe ElementoStradale

attributi: percorso: GU_CPCurve2D

vtopo ElementoStradale.percorso IN esiste AreaStradale.estensione» [2]

Nel diagramma seguente possiamo vedere come il vincolo vtopo rappresentato dalla classe VT_Elemento_Stradale presenta l'indicazione dello *stereotype* <<IN>> che qualifica il tipo di restrizione applicata alla classe che viene descritta nel compartimento degli attributi (tipo=Esiste).

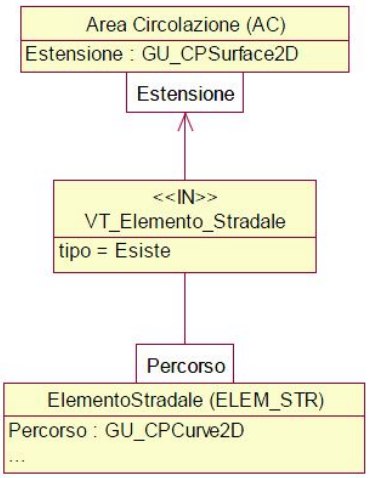


Figura 36.: esempio di strutturazione del contenuto topologico. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida ai documenti. 1n1012*, Capitolo 5.2, p. 93.

[2]Esempio di strutturazione del contenuto topologico:descrizione testuale. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida ai documenti. 1n1012*, Cap. 5.2 p. 93.

Implementazione del database spaziale

10. Gli elaborati metrici utilizzati

11. Il modello geometrico

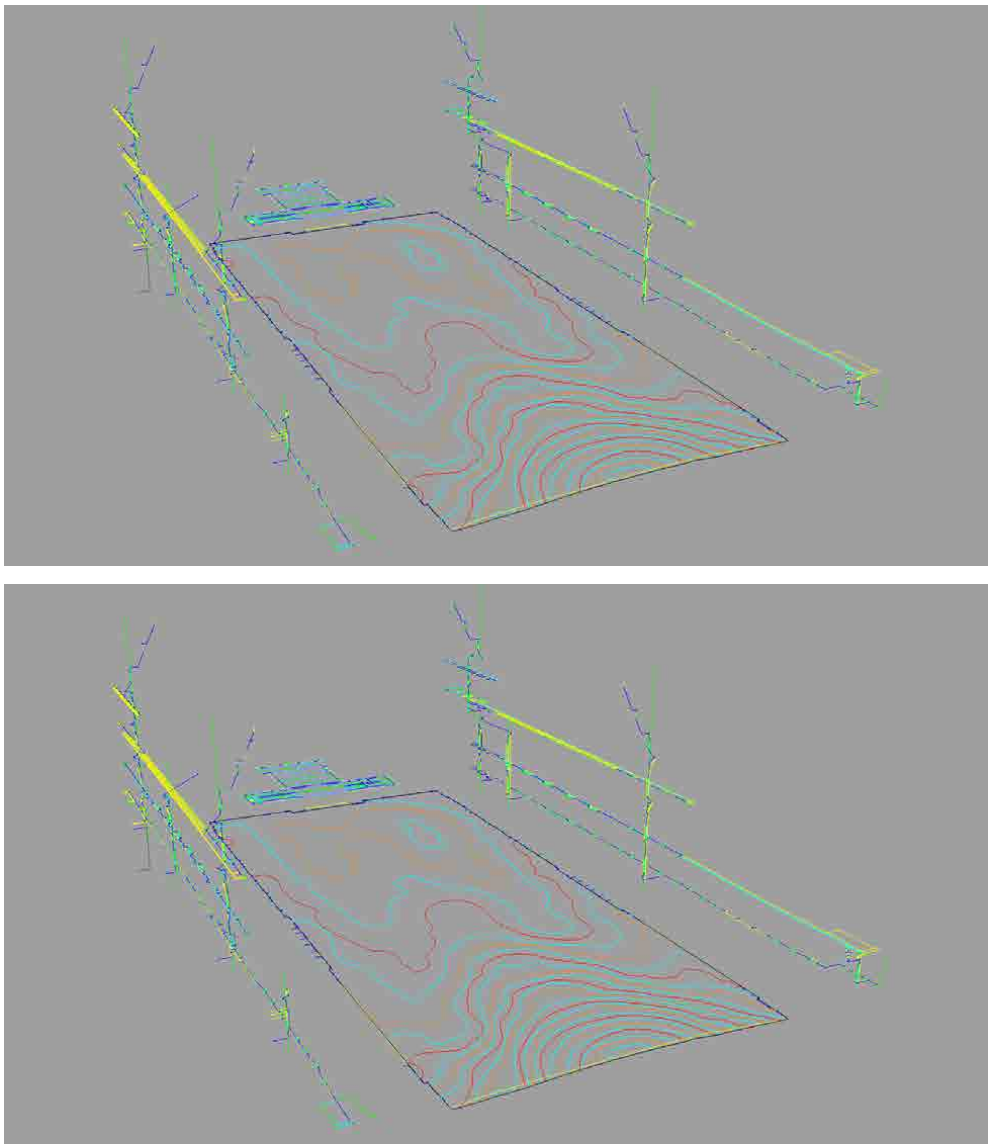


Figura 40.: integrazione degli elaborati CAD per la creazione del modello tridimensionale.

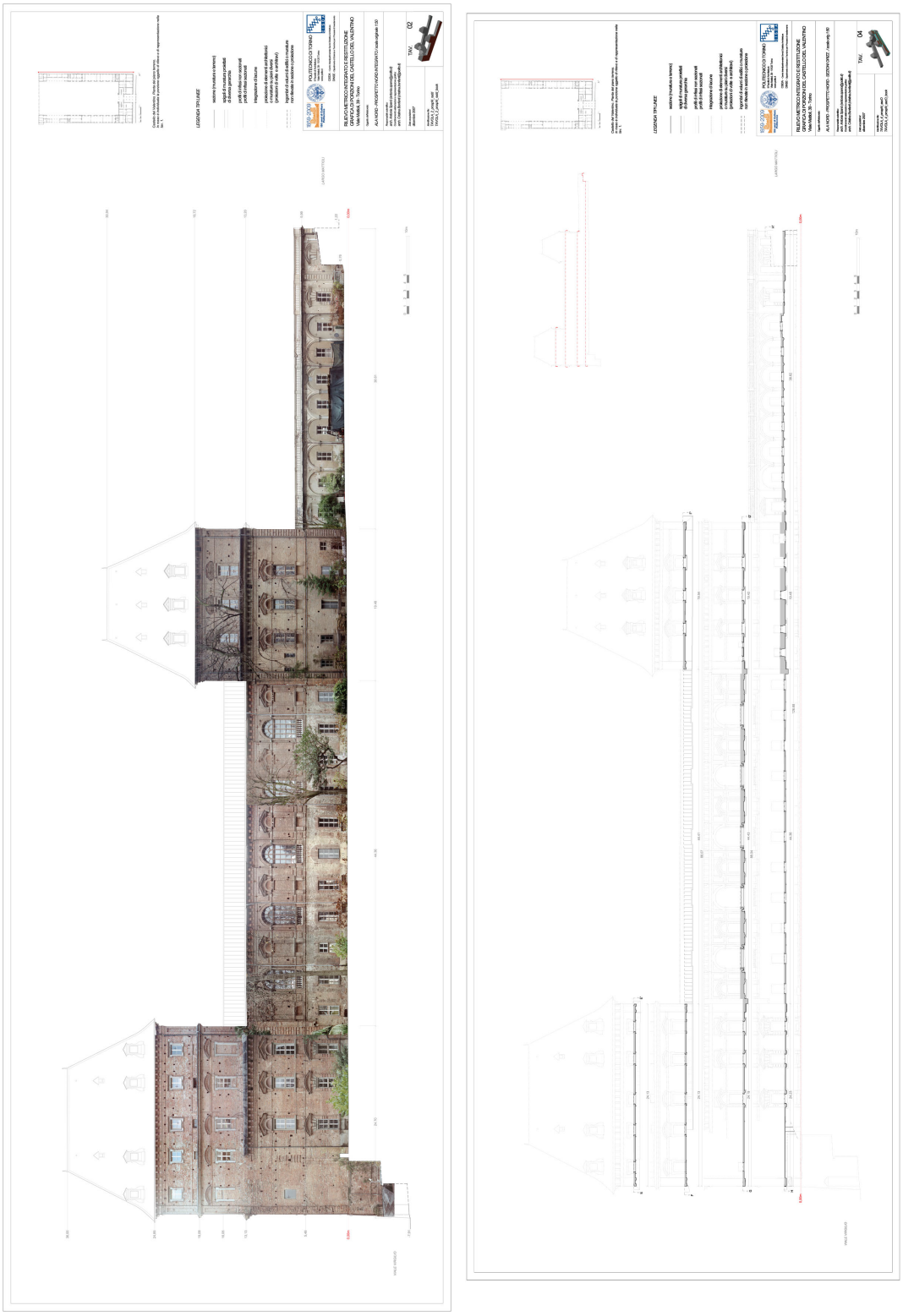


Figura 37.: prospetto della facciata nord integrato con i fotopiani e sovrapposizione con i profili di sezione orizzontali da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

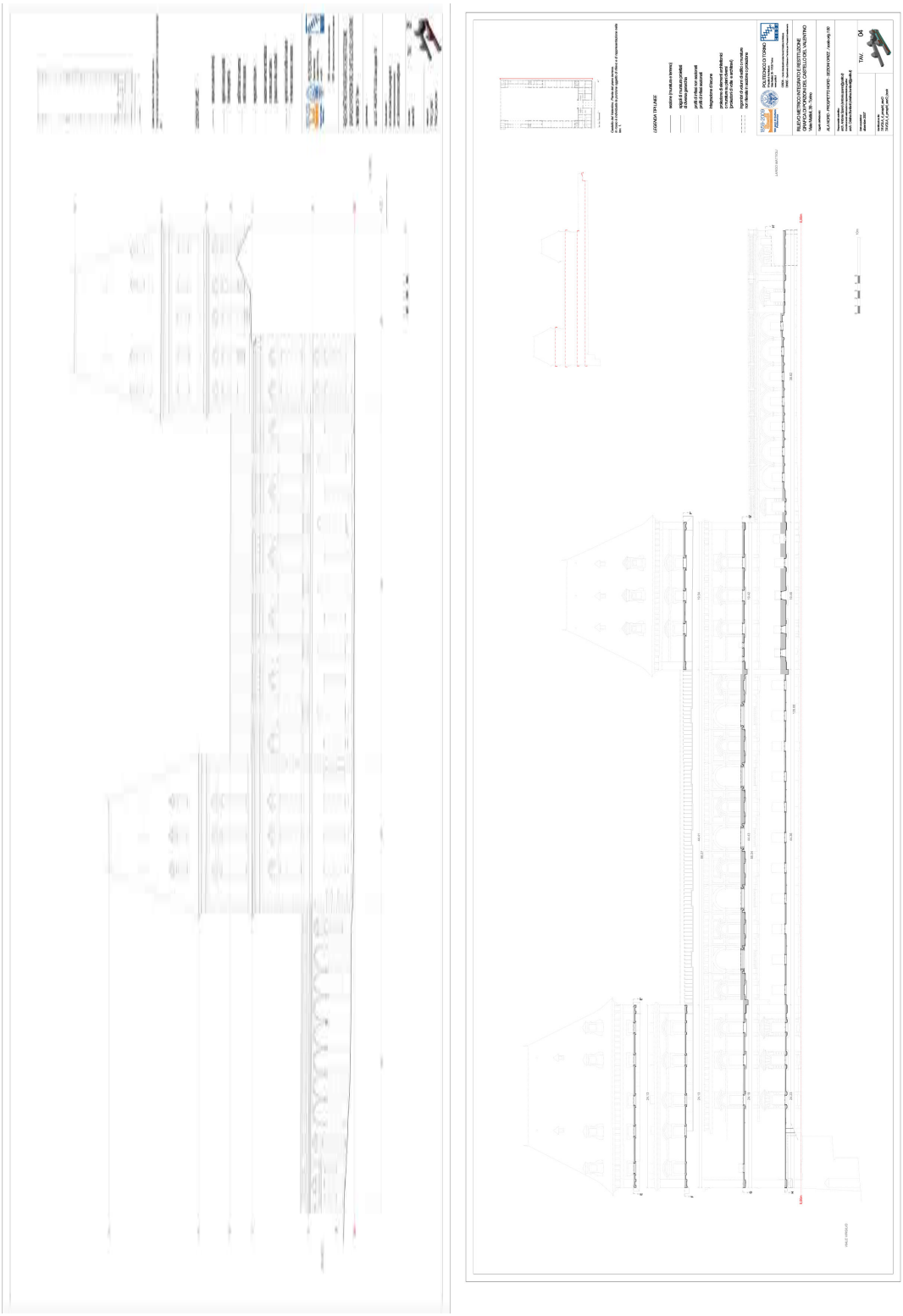


Figura 38.: prospetto della facciata nord e sovrapposizione con i profili di sezione orizzontali da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

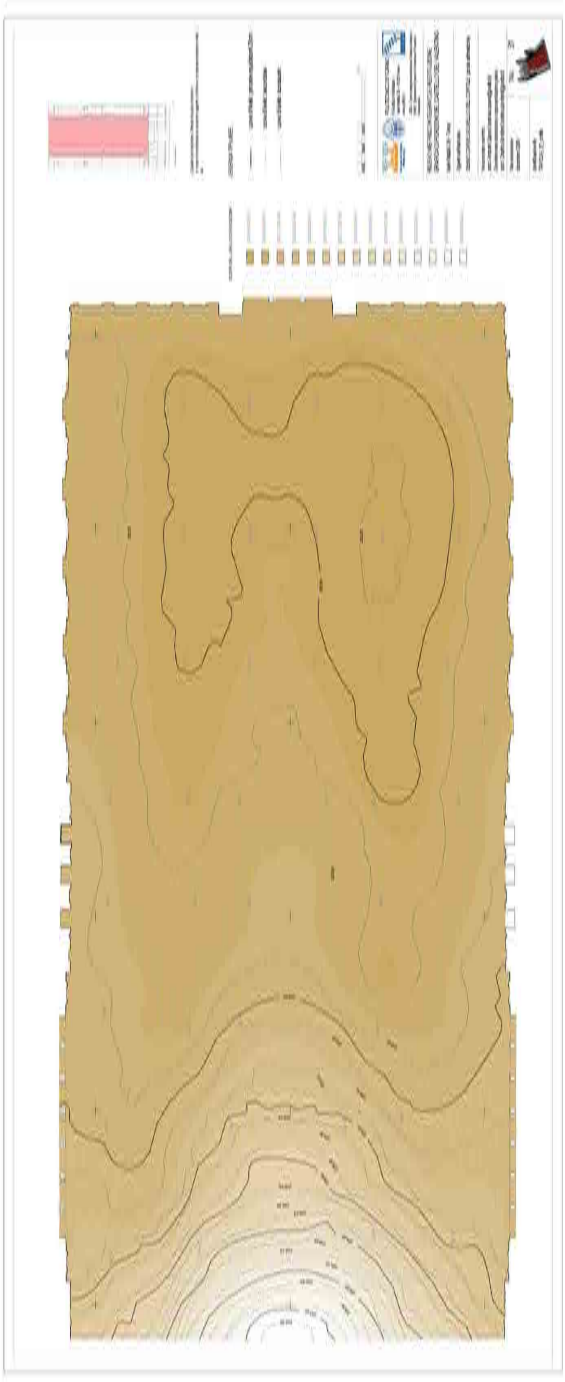


Figura 39.: pianta del cortile con la tematizzazione della TIN da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010.

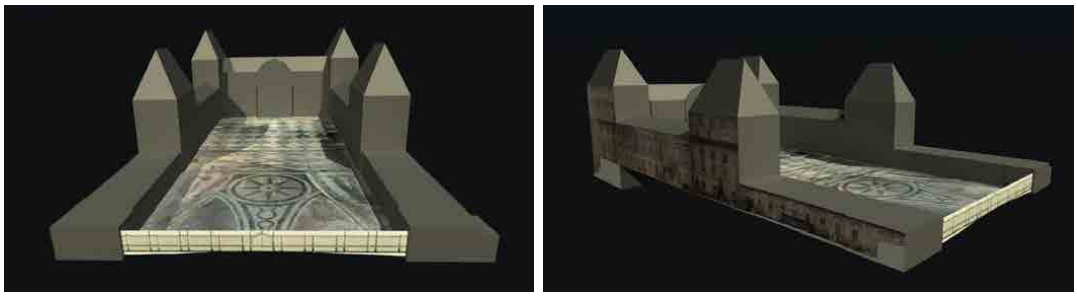


Figura 41.: viste prospettiche del modello LOD2.

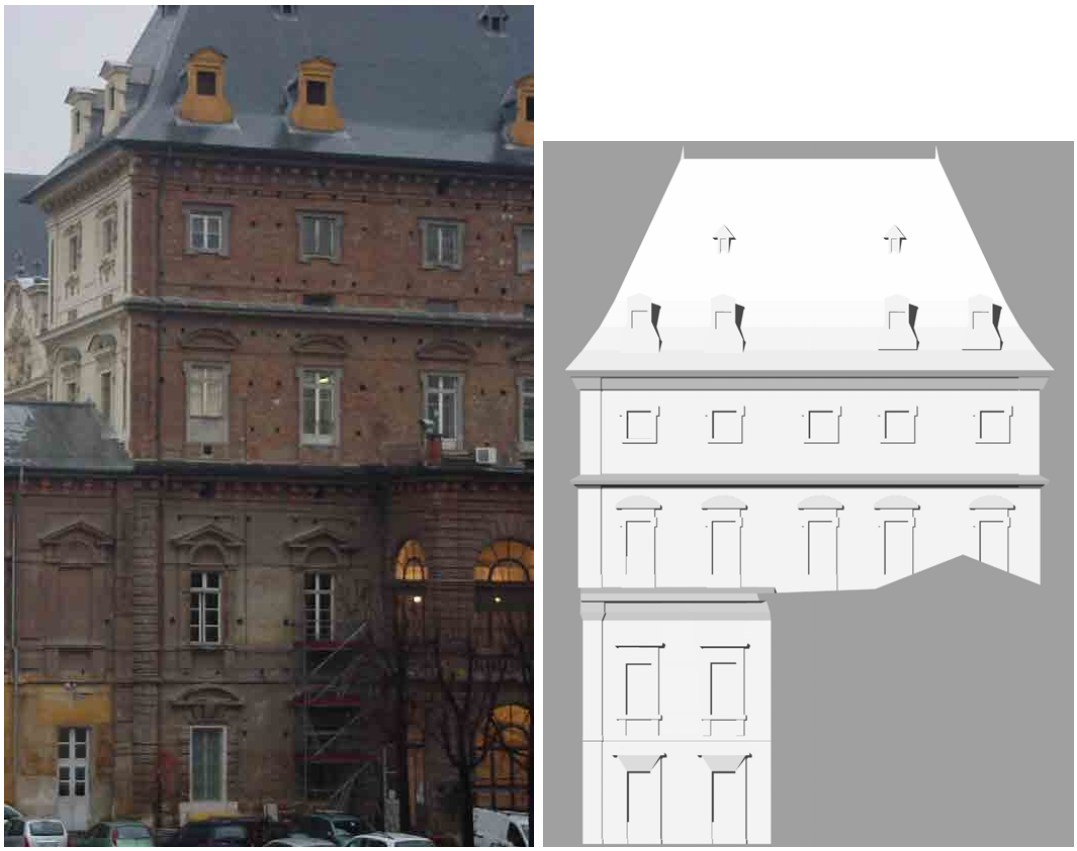


Figura 42.: foto della facciata scelta per l'approfondimento di scala e prospetto del modello (LOD3).

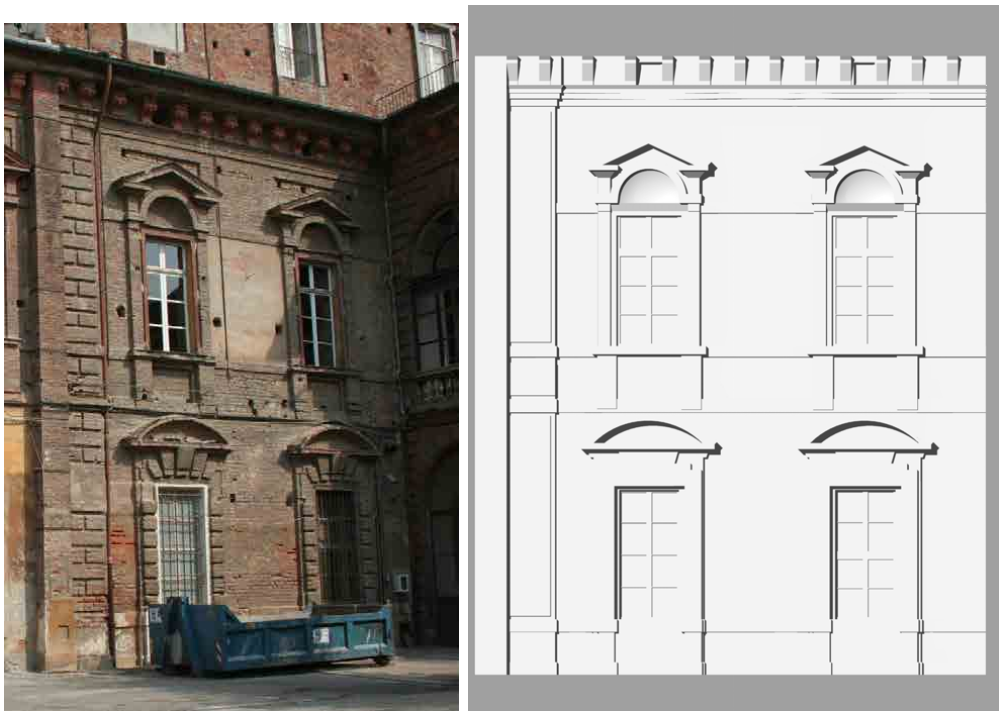


Figura 43.: foto del particolare di facciata e prospetto del modello.

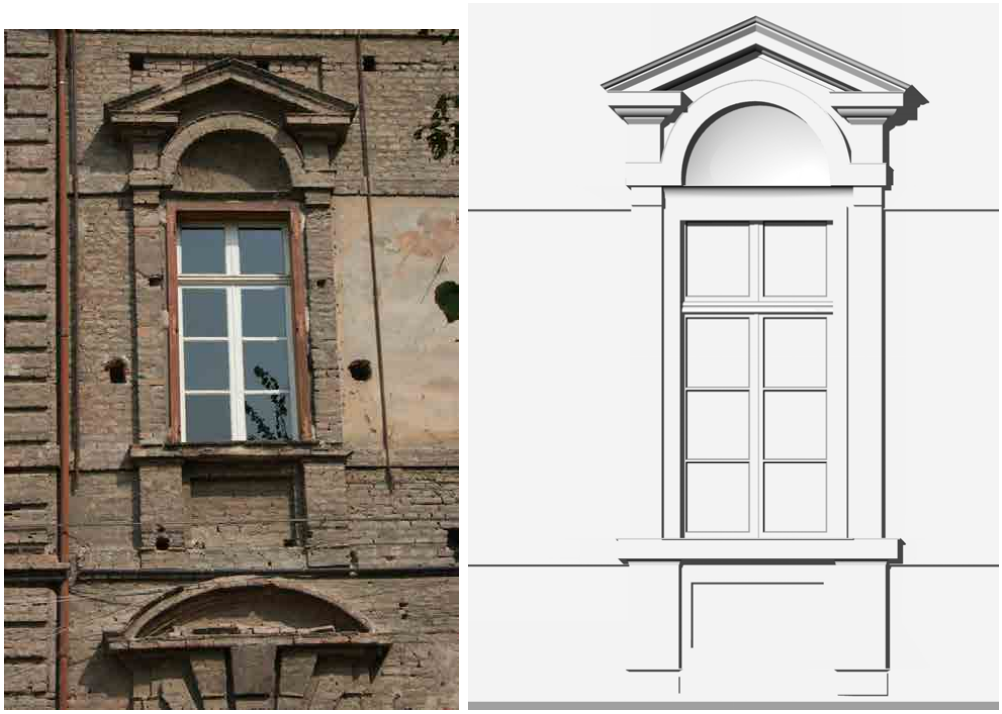


Figura 44.: foto e prospetto del modulo architettonico in scala 1:50.

12. Modello tematico

BuildingClassType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	habitation	1100	schools, education, research
1010	sanitation	1110	maintainence and waste management
1020	administration	1120	healthcare
1030	business, trade	1130	communicating
1040	catering	1140	security
1050	recreation	1150	storage
1060	sport	1160	industry
1070	culture	1170	traffic
1080	church institution	1180	function
1090	agriculture, forestry		

BuildingFunctionType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	residential building	1840	rubbish bunker
1010	tenement	1850	building for rubbish incineration
1020	hostel	1860	building for rubbish disposal
1030	residential- and administration building	1870	building for agrarian and forestry
1040	residential- and office building	1880	barn
1050	residential- and business building	1890	stall
1060	residential- and plant building	1900	equestrian hall
1070	agrarian- and forestry building	1910	alpine cabin
1080	residential- and commercial building	1920	hunting lodge
1090	forester's lodge	1930	arboretum
1100	holiday house	1940	glass house
1110	summer house	1950	moveable glass house
1120	office building	1960	public building
1130	credit institution	1970	administration building
1140	insurance	1980	parliament
1150	business building	1990	guildhall
1160	department store	2000	post office
1170	shopping centre	2010	customs office
1180	kiosk	2020	court
1190	pharmacy	2030	embassy or consulate
1200	pavilion	2040	district administration
1210	hotel	2050	district government
1220	youth hostel	2060	tax office
1230	campsite building	2070	building for education and research
1240	restaurant	2080	comprehensive school
1250	cantine	2090	vocational school
1260	recreational site	2100	college or university
1270	function room	2110	research establishment
1280	cinema	2120	building for cultural purposes
1290	bowling alley	2130	castle

Tabella 8.: tabella contenente i valori dell'attributo *class* e un estratto di quelli di *function* (identici a *usage*). In evidenza quelli implementati per le occorrenze della classe *Building*: in azzurro i valori di *class* e *function*, in giallo quelli di *usage*.

13. XML database

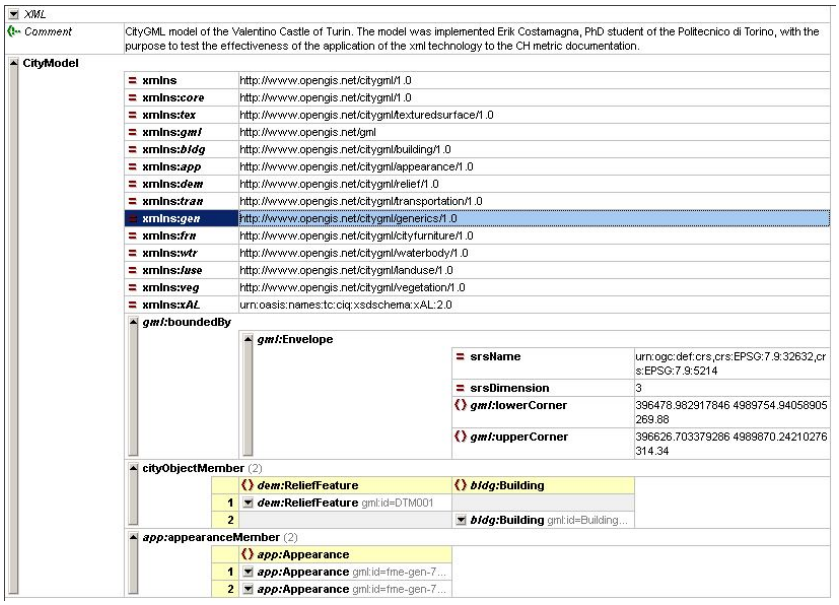


Figura 45.: la prima parte dell'intestazione specifica la versione XML utilizzata e la codifica dei testi, quindi vengono dichiarati i *namespace* degli schemi XML di riferimento; il primo elemento che compare dopo i *namespace* è la proprietà *gml:boundedBy* che viene utilizzata per specificare l'*envelope*, cioè l'inviluppo convesso degli oggetti utilizzato per l'indicizzazione; nell'*envelope* viene anche dichiarato il sistema di riferimento utilizzato nel modello secondo la codifica OGC.

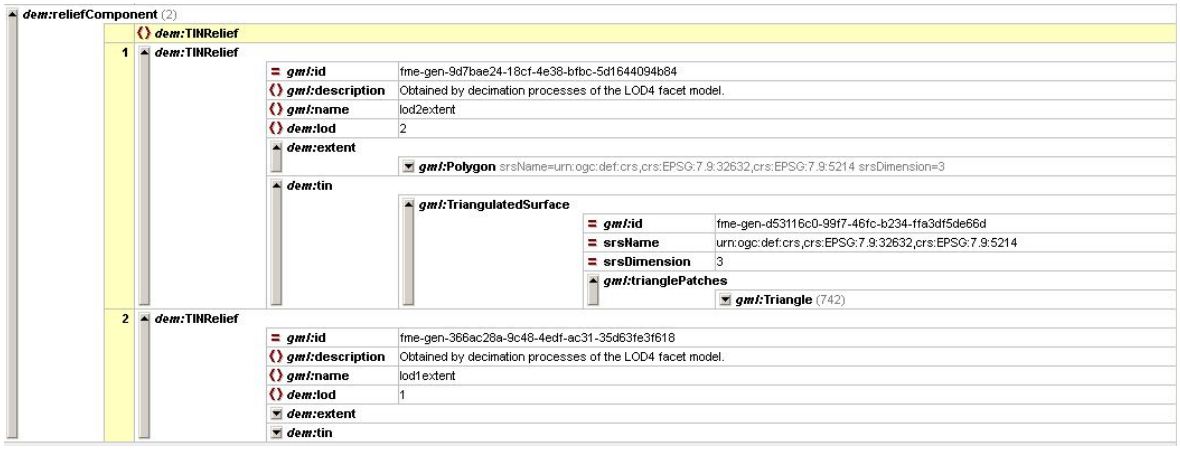


Figura 46.: componenti: il modello triangolato *TINRelief* (LOD2).

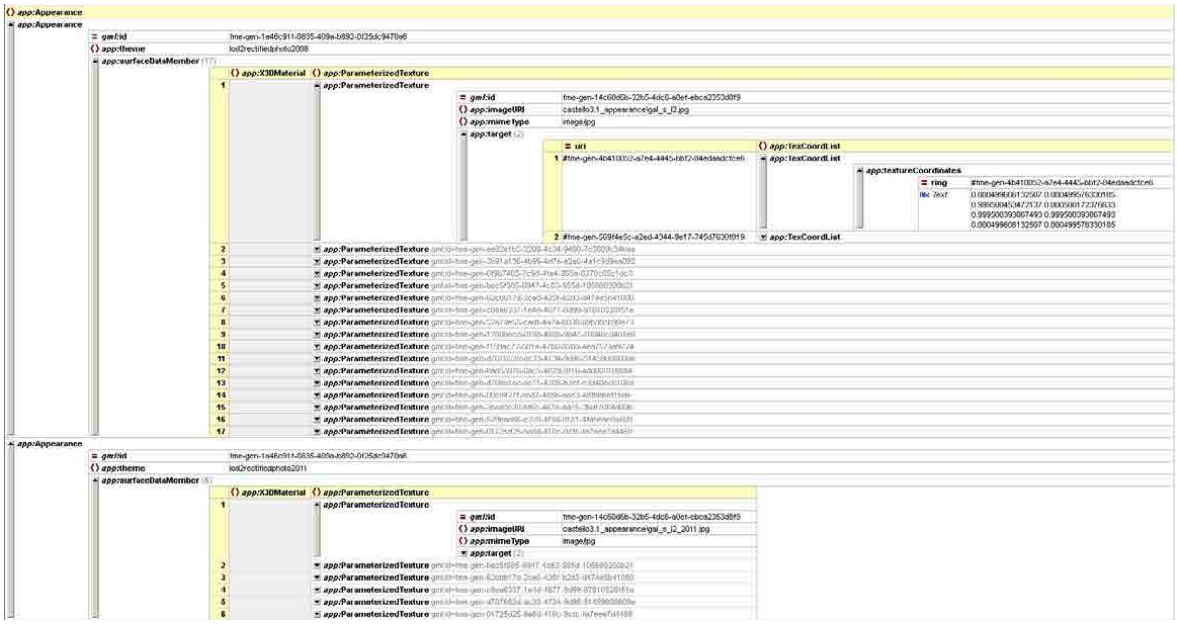


Figura 47.: vista della struttura del modulo *Appearance*: sono stati implementati i due temi corrispondenti alla situazione pre e post restauro.



Figura 48.: *BoundarySurface* LOD3: tema *lod2rectifiedphoto2008* (sinistra) e *lod2rectifiedphoto2011* (destra).



Figura 49.: *BoundarySurface* LOD4: tema *lod2rectifiedphoto2008* (sinistra) e *lod2rectifiedphoto2011* (destra).

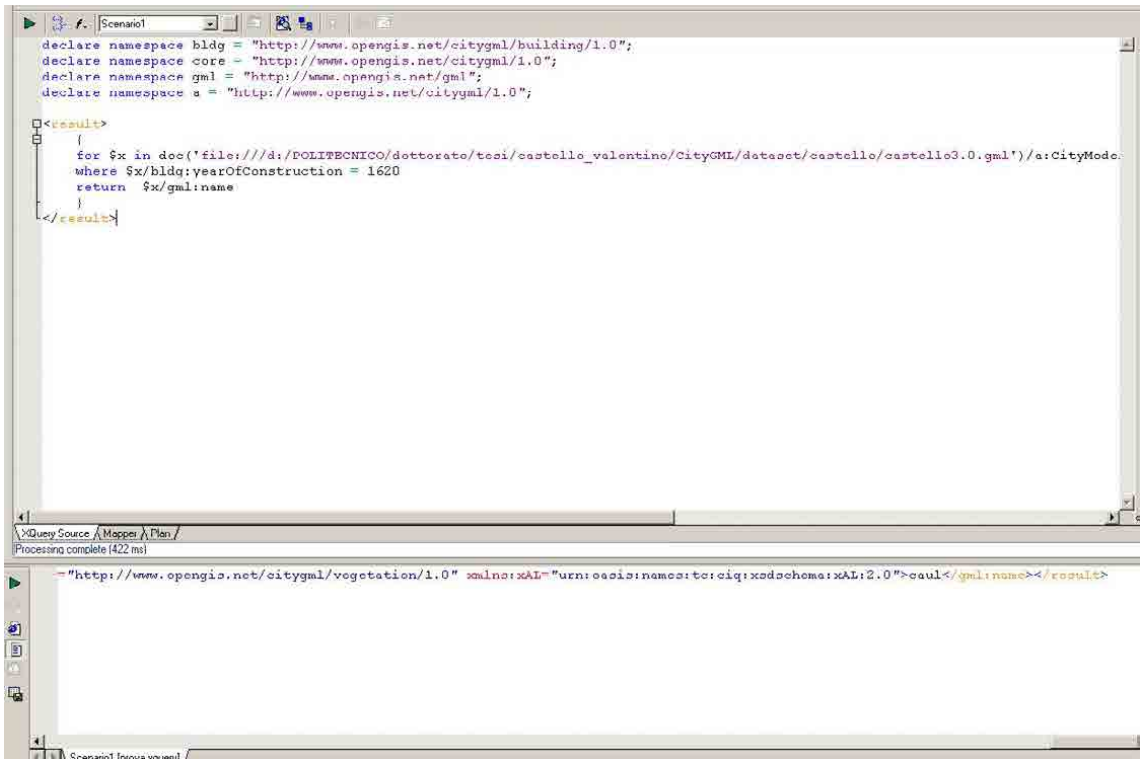


Figura 50.: esempio di *XQuery*: sono state cercate ricercate tutte le BuildingPart che avessero come valore dell'attributo yearOfConstruction=1620 ed è stato restituito il *gml:name* dell'istanza.

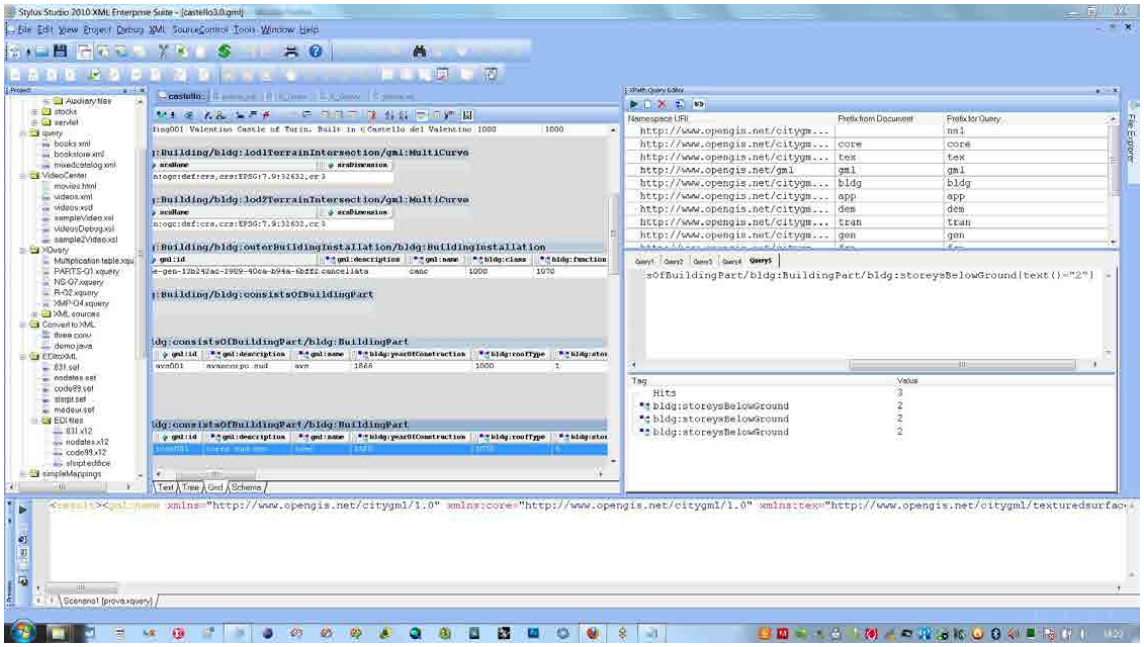


Figura 51.: esempio di *XQuery*: sono state cercate tutte le BuildingPart con un numero di piani sotto terra pari a 2.

14. Geodatabase

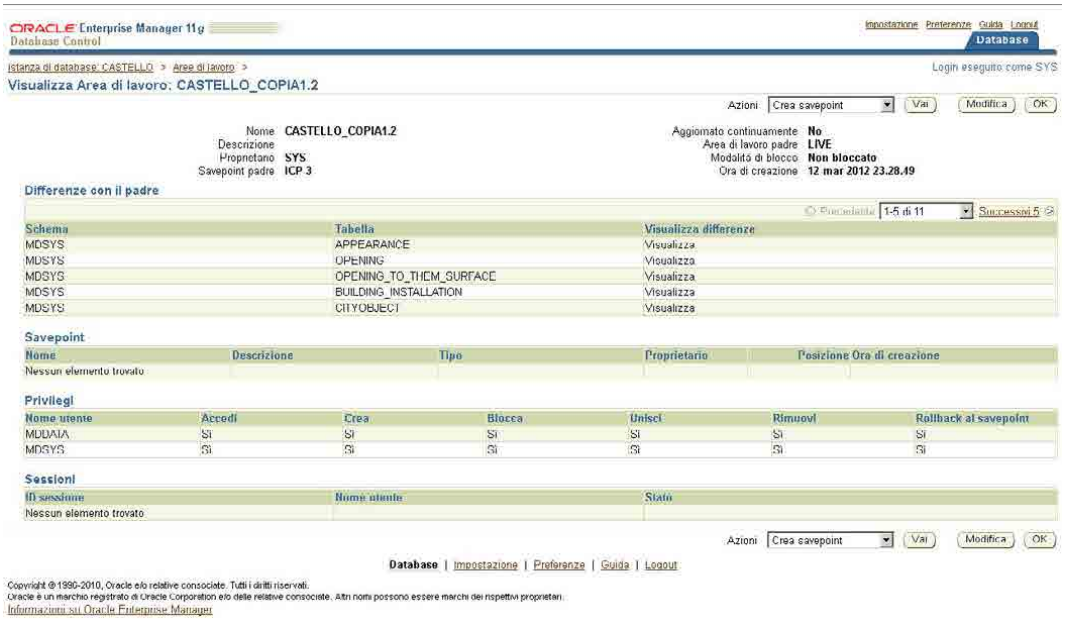


Figura 52.: Oracle Enterprise Manager: utilizzo del *versioning*.

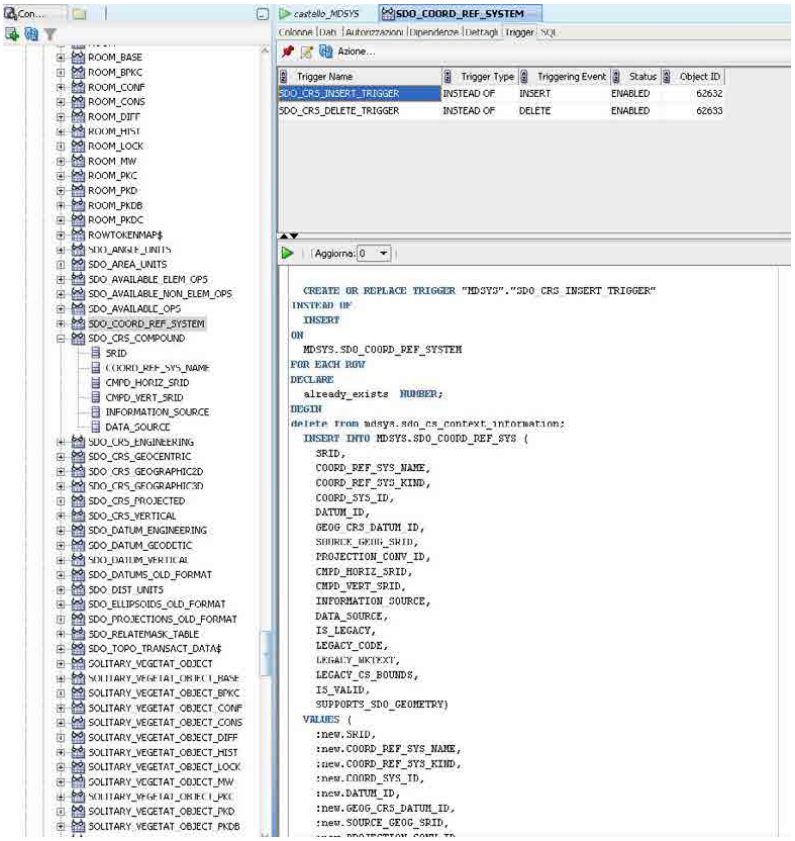


Figura 53.: SQL Developer: *triggers* presenti nella _SDO_COORD_REF_SYSTEM View.

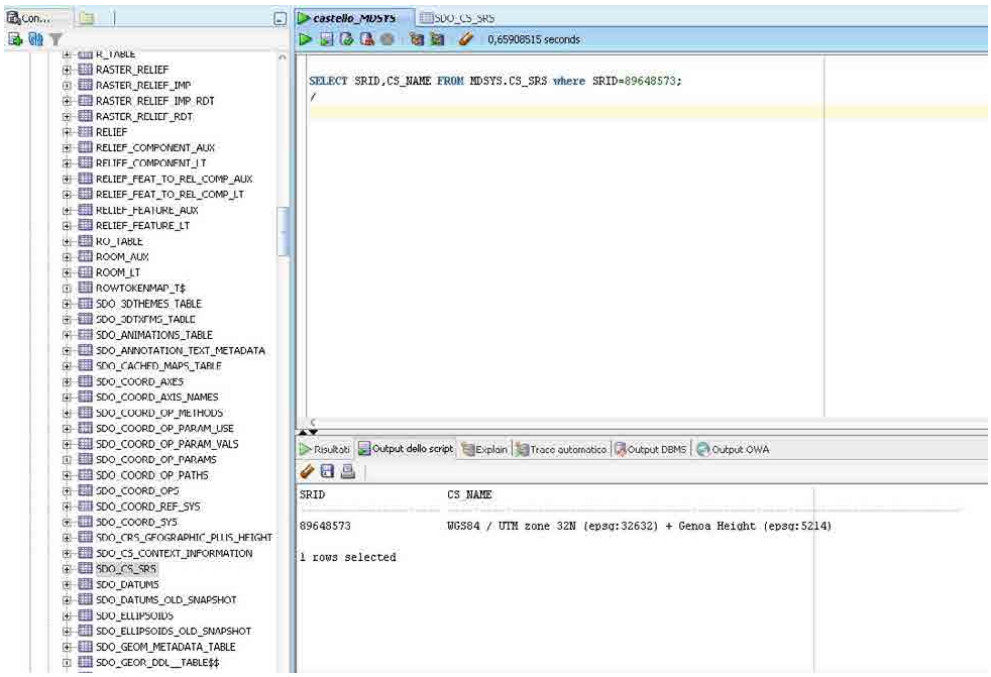


Figura 54.: *query* del nuovo sistema di riferimento composto creato.

15. Modellazione di un fenomeno culturale

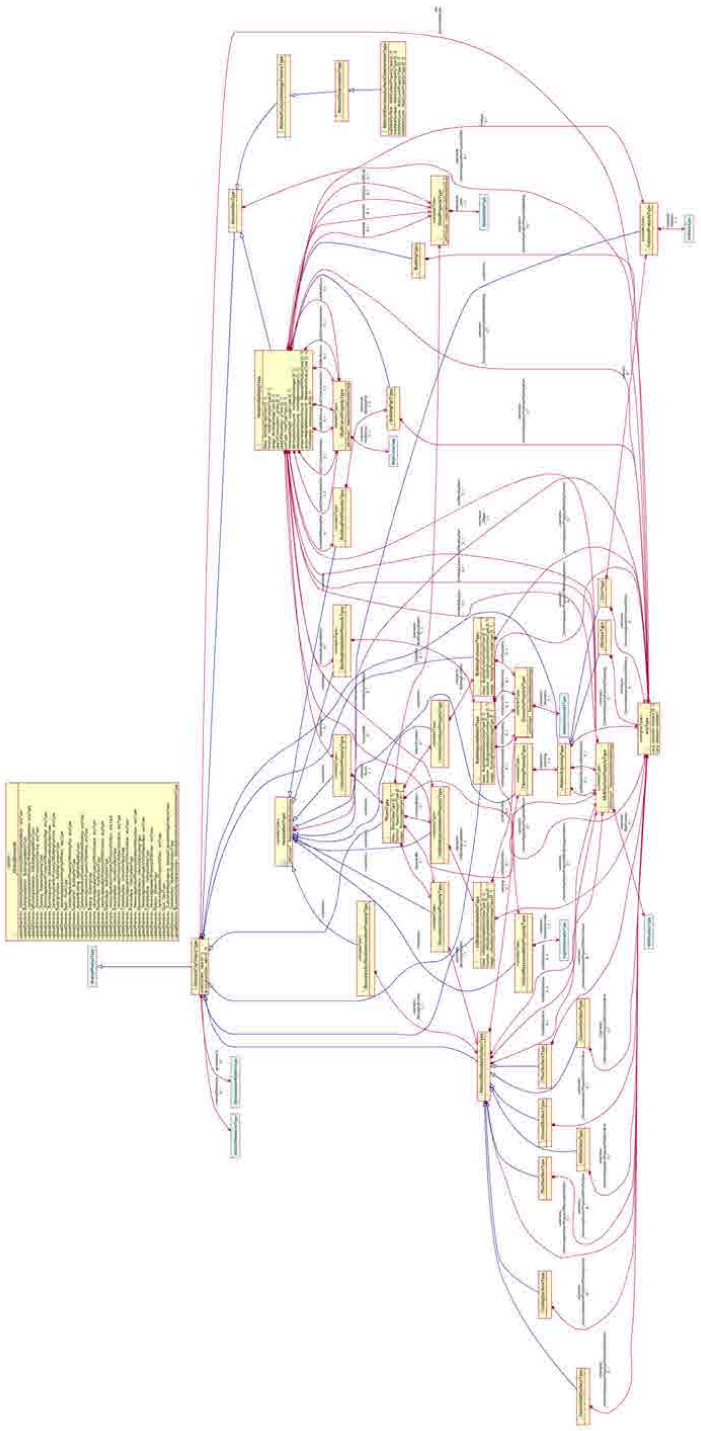


Figura 55.: *unmarshalling* dallo schema logico XML a quello concettuale UML: il diagramma UML può essere confrontato con lo schema di progetto. La relazione di aggregazione tra le classi *bldg:: _BoundarySurface* e *ch:_ BoundarySurfaceDeterioration* è esplicitata come *BoundarySurfaceDeteriorationPropertyType* e rappresentata come una classe che lega le altre due.

Elenco delle figure

4.1. struttura a 4 livelli di metamodelli. OMG - Object Management Group, *Unified Modeling Language Infrastructure v.2.4,* Capitolo 7.12, p.32. 41
4.2. esempio di classe astratta 43
4.3. diagramma da Berners-Lee, *Information Management: A Proposal*, CERN 1989 45
4.4. visualizzazione schematica del *ComplexType*. 50

5.1. approccio discreto. 57
5.2. approccio continuo. 58

6.1. il grafo dei ponti di Königsberg da Leonhard Euler *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*, 1741. Gli archi in azzurro identificano i percorsi o commini e i nodi in rosso le zone o facce collegate. 63

7.1. rappresentazione 2.5D: i rapporti tra la rappresentazione e $C = X, Y, Z$, dominio dei valori delle coordinate $< x, y, z >$, è rappresentato dal vincolo dei piani paralleli a XY che possono avere un unico valore di $< z >$ in corrispondenza dell'intersezione con la superficie. Per ogni punto del piano XY non ci saranno mai infatti due valori diversi della coordinata $< z >$ 70
7.2. rappresentazione schematica dell'implementazione di un semplice parallelepipedo in un database secondo lo schema descritto: il parallelepipedo, o meglio le sue superfici, sono definite dall'associazione di questa tabella con con l'altra tabella contenente i valori di $< x, y >$. 72
7.3. da sinistra a destra: rappresentazioni 2D, 2.5D, 3D. 73
7.9. esempio di strutturazione dei dati nell'*Octree* da Rahman e Pilouk, *Spatial Data Modelling for 3D GIS*, Springer-Verlag 2008, p. 34 78
7.4. esempio di modello di elevazione *grid* che descrive una porzione di una strada pavimentata romana di epoca tardo-imperiale, i dati provengono dalle acquisizioni effettuate sul sito archeologico di Aquileia (UD) grazie ad una collaborazione tra il Politecnico e l'Università degli Studi di Trieste [83]. . . 80
7.5. esempio di trasformazione di un modello a *grid* in una TIN: la griglia di punti (giallo) è sovrapposta alla superficie triangolata ottenuta per interpolazione (grigio). Il modello di superficie descrive una porzione di una strada pavimentata romana di epoca tardo-imperiale, i dati provengono dalle acquisizioni effettuate sul sito archeologico di Aquileia (UD) grazie ad una collaborazione tra il Politecnico e l'Università degli Studi di Trieste [83]. 81
7.6. esempio di modellazione per estrusione. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione. 81
7.7. esempio di modellazione di superfici tramite *patch*. 82

7.8. esempio di rappresentazione tramite B-Rep di una porzione un particolare architettonico: la superficie da rappresentare non ha una curvatura costante ed è stata pertanto modellata tramite le *spline* che ne definiscono i bordi e il profilo e quindi interpolata. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione. 82
7.10. utilizzo degli operatori booleani per la modellazione di oggetti definibili tramite l'intersezioni di altri oggetti ovvero i riempimenti o tamponamenti delle cornici. L'esempio è tratto delle elaborazioni preliminari all'implementazione dei dati geometrici del caso studio analizzato nella dissertazione. 83

8.1. 3DTIN da Rahman, Drummond, The Implementation of Object-Oriented TIN-Based Subsystems for GIS in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXII, 2000 87
8.2. *TEtrahedal Network* da Pilouk, *Integrated modelling for 3D GIS*, Tesi di Dottorato ITC - University of Twente 1996 88
8.3. suddivisione del cubo in tetraedri (sinistra) e la TEN in relazione al formalismo dei *cell graph* (destra). 88
8.4. 3D Formal Data Structure da Molenaar, *An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling for GIS*, Taylor and Francis 1998. 90
8.5. *Simplified Spatial Model* (SSM) da Zlatanova, *3D GIS for Urban Development*, Tesi di Dottorato Graz University of Technology, 2000. 92

9.1. rappresentazione dei diagrammi di Voronoi su una superficie triangolata. La superficie in oggetto si riferisce ad un modello TIN ottenuto per interpolazione di isocline. In verde i cerchi che soddisfano la triangolazione di Delaunay, in blu i corripondenti poligoni creati dal diagramma di Voronoi. In rosso sono invece rappresentati i triangoli che non soddisfano la triangolazione. L'esempio rappresenta il modello del cortile aulico del Castello del Valentino ed è stato realizzato sui dati estratti dal caso studio trattato nella Parte IV 10.2. . . . 95
9.2. indicizzazione per mezzo del MBR o MBV è uno dei meccanismi più diffusi in tutti i sistemi applicativi, GIS e CAD compresi, l'esempio mostra un applicazione in un sistema CAD. L'esempio mostra l'integrazione degli elaborati metrici del rilievo del caso studio trattato trattato nella Parte IV 10.2. . . . 96
9.3. esempio di indicizzazione delle relazione topologiche calcolate per mezzo di analisi spaziali, le relazioni sono calcolate nello spazio $\mathbb{R}^3$ e restituite in quello $\mathbb{R}^2$. L'esempio è stato condotto sugli elaborati metrici del rilievo del caso studio trattato trattato nella Parte IV 10.2. 99

10.1. diagramma della struttura geometrica. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards*, p. 31. 104
10.2. relazione tra gli standard ISO e GML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1*, Capitolo. 6.3 p. 18. 109
10.3. rappresentazione dei tre diversi livelli di formalizzazione del modello, da sinistra a destra: linguaggio naturale, diagramma UML e codice XML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*. 112

10.4. schema XSD: visualizzazione in forma di schema e di codice di un estratto dello schema XSD del modulo *Building* che descrive la classe *BoundarySurface* e le relative dipendenze. 115
10.5. diagramma UML di livello più alto della gerarchia CityGML. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.1, p.44. 117
10.6. diagramma UML del *Building model,* OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.3, p.57. 120
10.7. modulo *Relief* OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo10.2, p.51. 121
10.8. diagramma UML del modulo *Appearance*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 9, p.29. 123
10.9. meccanismo di scomposizione della rappresentazione 3D in rappresentazioni 2.5D. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti. 1n1007-1-2*, p. 230. 129

12.1. esempio di modellazione del rumore sulla base di dati CityGML - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 10.1, p.44. 142
12.2. Visualizzazione del modello tramite GoogleEarth. 143

13.1. il Castello del Valentino raffigurato in due tavole del *Theatrum Sabaudiae*, Amsterdam, Blaeu 1682. 155
13.2. schema della rete di inquadramento principale da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 156
13.3. stralci di sezioni verticali della facciata sud: torre sud-est e sud-ovest da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 158
13.4. prospetto della facciata sud integrato con fotopiani, pianta del cortile ortofoto e isocline da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 159

14.1. modulo utilizzato per la generalizzazione degli elmenti architettonici della facciata, da sinistra a destra: 1:50, 1:100 (LOD4), 1:200 (LOD3). 164
14.2. sovrapposizione dei modelli ai diversi livelli di dettaglio da sinistra a destra: LOD1-2, LOD2-3, LOD3-4. 164
14.3. processo di triangolazione: a sinistra il modello di superficie a destra la *mesh*. La triangolazione è stata ottenuta impostando un angolo massimo di 20° tra le normali e una distanza massima tra bordo e superficie di 2 cm. 165
14.4. processo di generalizzazione: dal basso verso l'alto scala 1:50, 1:100 (LOD4) e 1:200 (LOD3) 166
14.5. trasformazione di un modello di superficie B-Rep in un modello di elevazione *grid*; esso rappresenta la proiezione sul piano medio della facciata delle linee di contorno del modello di superficie del particolare decorativo (1:50). 167
14.6. modello della porzione di facciata implementata al LOD4. 168

14.7. modello della torre sud-est implementata al LOD3. 169
14.8. vista prospettica del modello LOD2 (sinistra) e LOD1 (destra). 169

15.1. planimetria del complesso e vista prospettica con l'evidenziazione delle diverse unità volumetriche componenti (LOD2). 173
15.2. classificazione degli elementi architettonici costituenti l'apparato decorativo al LOD3. 175
15.3. classificazione degli elementi architettonici al LOD4. 176
15.4. rappresentazione degli elementi architettonici del modulo di una finestra (LOD4). 177
15.5. diagramma UML ad oggetti dell'implementazione delle classi CityGML(LOD1-4). 179
15.6. decimazione del modello del terreno originale in scala 1:100: LOD2 742 triangoli (sinistra), LOD1 208 triangoli (destra). 180
15.7. procedure di proiezione delle *texture*: controllo delle normali (1), impostazione del sistema di riferimento oggetto (2), creazione del sistema di proiezione nello stesso sistema di riferimento oggetto (3), trasformazione delle coordinate immagine in quelle oggetto (4). 182

16.1. ristrutturazione e traduzione dei dati CAD a GML per mezzo dell'interfaccia grafica FME WorkBench. Lo schema descrive in modo grafico le procedure di analisi e trasformazione dei dati da una fonte (sinistra), costituita dai diversi modelli del dataset, ad un output (destra) rappresentato dalle classi CityGML. Lo schema per comodità è stato diviso in due pagine. 187
16.2. parte destra dello schema nella figura precedente. 188

17.1. vista della struttura dell'istanza della classe *_Building,* sono definiti gli attributi *class*=1000 (abitazione), *function*=1000 (residenziale) e *usage*=2100 (università). Gli elementi che lo compongono sono: le intersezioni con il modello del terreno (*lod1-2TerrainIntersection*), gli elementi accessori (*outerBuildingInstallation*) e le unità volumetriche (*BuildingPart*). 191
17.2. vista della struttura di un unità volumetrica (*BuildingPart*): sono stati specificati gli attributi roofType=1070 (padiglione), l'anno di costruzione, l'altezza e il numero dei piani; di seguito compaiono le diverse superfici che compongono l'involucro (LOD2-4). 192
17.3. LOD2, tema *lod2rectifiedphoto2008* (fotopiani pre-restauro). 192
17.4. LOD2, tema *lod2rectifiedphoto2011* (fotopiani post-restauro). 193
17.5. analisi di due distanze nello spazio $\mathbb{R}^3$. 193
17.6. riepilogo delle statistiche relative alla geometria, le entità e le relazioni. . . . 194
17.7. validazione del contenuto del documento XML. 195
17.8. utilizzo dell'operatore FLWOR: in magenta la clausola *Where*, in verde in alto a sinistra *For*, sotto *Let* e a destra *Return*; le linee visualizzano i riferimenti al documento delle clausole. 196
17.9. Oracle 11g Enterprise Manager: prestazioni dell'istanza di database. 198
17.10 *query* spaziale: calcolo delle aree di tutte le superfici di un'unità volumetrica e creazione di una nuova tabella con i risultati. 199

18.1. schema UML della modello dei dati del Cultural Heritage ADE (*Application Domain Extension*). Lo schema descrive la derivazione delle classi a partire dalla superclasse *gml::_AbstractFeature*. 205
18.2. schema UML dell'applicazione dell'estensione al modulo *Building*. Nello schema sono evidenziate le specializzazioni della classe *ch_BoundarySurfaceDetrioration* e delle sue relazioni con le classi *_BoundarySyrface* e *gml::MultiCurve*. Sono inoltre rappresentati gli attributi aggiunti alla classe *_AbstractBuilding*. . . . 207
18.3. rappresentazione logica dello schema. Lo schema XSD delle specifiche OGC - CityGML è stato esteso per comprende re le classi, le relazioni e gli attributi definiti al livello concettuale tramite lo schema UML. In ordine dall'alto verso il basso i tipi complessi: *_CulturalHeritageFeature, _AbstractDeterioration* e *_BoundarySurfaceDeterioration*. 208

4. Requisiti di precisione riferiti alla tolleranza della scala di rappresentazione (sinistra) e requisiti di accuratezza espressi tramite la densità dei punti misurati (destra). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 2.1.2. 213
5. Esemplificazione dell'utilizzo dei simbolismi grafici (scala di restituzione 1:20). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 4 213
6. Esemplificazione dei simbolismi grafici per pianta e sezione-prospetto (*sectional elevation*). English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 5 214
7. Estrazione delle curve di livello a partire dal DTM e dalle *breakline*. English Heritage, "*Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*", Sec. 6 214
8. rappresentazione del contenuto della classe. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Appendice B, p. 521. 215
9. rappresentazione grafica delle informazioni relative ad associazioni tra classi (sinistra) e generalizzazione (destra). Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Appendice, B p. 521,522. 215
10. estensibilità del linguaggio: *constraints* (sinistra) e *stereotypes* (destra). Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley Professional 1998. Parte 2, p. 102. 216
11. diagramma UML del Domain Reference Model. ISO/TC211 *Geographic Information/Geomatics Standards Guide,* p.19. 216
12. superfici. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 217
13. superfici poligonali e triangolate. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 217
14. primitive geometriche e contorni. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 218
15. diagramma delle classi che definiscono le curve. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 218
16. aggregati. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 219
17. composti. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* 220

18. complessi. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards.* . . . 220
19. diagramma della struttura topologica. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards Guide*, p.32 221
20. diagramma UML della struttura degli oggetti temporali: classi, specializzazioni e relazioni. ISO/TC211, *Geographic Information/Geomatics Standards Guide,* p.36,37. 221
21. *Abstract Specification Topic Dependencies.* OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 0. Abstract Specification Overview*, Capitolo 2.4, p. 4. 222
22. meccanismo di astrazione (sinistra) e modello concettuale (destra). OGC - Open Geospatial Consortium, *The OGC Abstract Specification Topic 5. Features*, Capitoli. 2.11, 2.12, p. 23,24. 222
23. *Features* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD. 223
24. *Coverages* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD. 224
25. *geometry basic* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD. 226
26. *GML topology* - OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1. Unmarshalling* dallo schema XSD. 227
27. diagramma UML del modulo geometrico: Primitives and Composites. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 8.1, p.23. 228
28. diagramma UML del modulo geometrico: complessi e aggregati. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 8.1, p.23. 228
29. aggregazione ricorsiva di oggetti e geometrie. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*, p.25. 229
30. diagramma UML del *Core Module*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0),* p.44. 235
31. diagramma UML della classe *GenericCityObjects* con le relative dipendenze. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.98. 236
32. *unmarshalling* dello schema XSD *bldg::Building*. Il diagramma UML può essere confrontato con quello fornito nelle specifiche dell'OGC. A differenza dello schema UML puro, come quello dell'OGC, in questo schema le relazioni sono rappresentate come classi, con lo stesso nome della classe da cui la relazione è uscente cui si aggiunge il suffisso *PropertyType*. 237
33. Land Use OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.94. 238

34. Noise ADE: schema dell'estensione del modulo *Transportation*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.44. 239
35. Noise ADE: schema dell'estensione del modulo *Building*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)*, p.44. 240
36. esempio di strutturazione del contenuto topologico. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Inquadramento generale e guida ai documenti. 1n1012*, Capitolo 5.2, p. 93. 242

40. integrazione degli elaborati CAD per la creazione del modello tridimensionale. 243
37. prospetto della facciata nord integrato con i fotopiani e sovrapposizione con i profili di sezione orizzontali da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 244
38. prospetto della facciata nord e sovrapposizione con i profili di sezione orizzontali da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 245
39. pianta del cortile con la tematizzazione della TIN da: Spanò, *Report del rilievo metrico integrato di parti del Castello del Valentino*, Politecnico di Torino rapporto interno, 2010. 246
41. viste prospettiche del modello LOD2. 247
42. foto della facciata scelta per l'approfondimento di scala e prospetto del modello (LOD3). 247
43. foto del particolare di facciata e prospetto del modello. 248
44. foto e prospetto del modulo architettonico in scala 1:50. 248
45. la prima parte dell'intestazione specifica la versione XML utilizzata e la codifica dei testi, quindi vengono dichiarati i *namespace* degli schemi XML di riferimento; il primo elemento che compare dopo i *namespace* è la proprietà *gml:boundedBy* che viene utilizzata per specificare l'*envelope*, cioè l'inviluppo convesso degli oggetti utilizzato per l'indicizzazione; nell'*envelope* viene anche dichiarato il sistema di riferimento utilizzato nel modello secondo la codifica OGC. 249
46. componenti: il modello triangolato *TINRelief* (LOD2). 250
47. vista della struttura del modulo *Appearance*: sono stati implementati i due temi corrispondenti alla situazione pre e post restauro. 250
48. *BoundarySurface* LOD3: tema *lod2rectifiedphoto2008* (sinistra) e *lod2rectifiedphoto2011* (destra). 251
49. *BoundarySurface* LOD4: tema *lod2rectifiedphoto2008* (sinistra) e *lod2rectifiedphoto2011* (destra). 251
50. esempio di *XQuery*: sono state cercate ricercate tutte le BuildingPart che avessero come valore dell'attributo yearOfConstruction=1620 ed è stato restituito il *gml:name* dell'istanza. 252
51. esempio di *XQuery*: sono state cercate tutte le BuildingPart con un numero di piani sotto terra pari a 2. 252
52. Oracle Enterprise Manager: utilizzo del *versioning*. 253
53. SQL Developer: *triggers* presenti nella _SDO_COORD_REF_SYSTEM View. 253
54. *query* del nuovo sistema di riferimento composto creato. 254

55. *unmarshalling* dallo schema logico XML a quello concettuale UML: il diagramma UML può essere confrontato con lo schema di progetto. La relazione di aggregazione tra le classi *bldg:: _BoundarySurface* e *ch:_BoundarySurfaceDeterioration* è esplicitata come *BoundarySurfaceDeteriorationPropertyType* e rappresentata come una classe che lega le altre due. 255

Elenco delle tabelle

4.1. classificatori e notazione della classe. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual,* Parte2 p.43. 42
4.2. tipologie di relazioni. Booch, Rumbaugh, Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual,* Parte 2 p.46. 44

10.1. requisiti di accuratezza dei LODs. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard (v1.0.0)* Capitolo 6.2, p.9. 113

1. differenze tra i modelli spaziali GML e ISO 10107. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1* , Annex D, p. 275. 225
2. corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, *Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard* Annex E, p.179. 231
3. corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179. 232
4. corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179. 233
5. corrispondenza tra LODs e *feature*. OGC - Open Geospatial Consortium, Open GIS CityGeography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Annex E, p.179. 234
6. *codelist* dei valori dell'attributo *class* e un estratto di quelli di *function* (identici a *usage*). In evidenza quelli implementati per le occorrenze della classe *Building*: in azzurro i valori di *class* e *function*, in giallo quelli di *usage*. . . 235
7. classi geometriche GeoUML e derivazione dalle classi ISO Spatial Schema. IntesaGIS, *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale. Il catalogo degli oggetti.* p.60. 241

8. tabella contenente i valori dell'attributo *class* e un estratto di quelli di *function* (identici a *usage*). In evidenza quelli implementati per le occorrenze della classe *Building*: in azzurro i valori di *class* e *function*, in giallo quelli di *usage*. 249

Indice analitico

3d array, 77
9-intersection model, 96

aggregazione (UML), 43
aperto, 64
approccio continuo, 56
approccio discreto, 56
architectural heritage, 7
associazione, 30
attributo, 30

B-Rep, 76
beni culturali, 3
beni culturali: documentazione, 4
BIM, 135

CAD, 135
cardinalità, 32
Castello del Valentino, 153
cell graph, 85
chiusura, 64
CityGML, 110
classe, 30
classi, 35
COLLADA, 101
compattezza, 64
complessi simpliciali, 85
complex type, 48
composizioni (UML), 43
connessione, 64
constraint, 43
coverage, 107

data binding (XML), 52
database, 29
DBMS, 29
Delaunay triangolazione, 93
dimensione, 66

E/R, 31
element (XML), 48
entità, 30
ereditarietà, 35
estensibilità, 36
Eulero (caratteristica), 62

features, 107
field approach (GIS), 56
frontiera, 64

generalizzazione, 32
genere, 66
geometria solida costruttiva, 79
GIS, 55, 138
GML, 108
grafo planare, 62
grid, 74
gruppi di sostituzione (XML), 51
gruppo fondamentale, 66

IFC, 102
incapsulamento, 35
Indicizzazione spaziale, 97
Interrogazione, linguaggi, 37
IntesaGIS, 125
inviluppo convesso, 65
ISO TC/211, 102
istanza, 30

KML, 108

manifold, 66
marshalling, 52
MBR (*Minimim Bounding Rectangle*), 94
MBV (*Minimum Bounding Volume*), 94
meccanismi di estensione (UML), 43
modelli a facce, 74
modelli di forma, 74
modello relazionale, 33

nodo, 86

object-structured approach, 56
occorrenza, 30
octree, 77
OGC, 105
omeomorfismo, 64
OODBMS, 34
operatori booleani, 67

*parameterized primitive*instancing, 79
parte interna, 64
polimorfismo, 36

rappresentazioni 2.5D, 69
rappresentazioni spaziali, 69
RDBMS, 31
relazione, 30
relazioni metriche, 93
relazioni topologiche, 96
rivestimento, 65

schema XML, 48
separazione, 64
serializzazione, 52
shareholders, 5
simple type, 48
simplessi, 85
solidi, 69
spatial partitioning systems, 77
spazio di Hausdorff, 64
spazio metrico, 61
spazio topologico, 61, 65
spigolo, 86
stakeholders, 5
standard (documentazione), 15
STEP, 101
stereotype, 44
superfici, 69
superfici parametriche, 75
sweeping, 78

tabella, 30
tagged values, 44
tipi, 35
tipo di dato, 30
topologia, 61
triangolo, 86
tupla, 30

UML, 39
unmarshalling, 52

valore, 30
varietà, 66
vertice, 86
Voronoi diagrammi, 93

winged-edge, 97

X3D, 101
XLink, 51
XML, 44
XPath, 51
XQuery, 51

Bibliografia

[1] *Theatrum Statuum Regiae Celsitudinisi Sabaudiae Ducis, Pedemontii Principis, Cipri Regis*. Blaeu, Amsterdam, 1682.

[2] *The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments*, 1931.

[3] Omer Akin. Current trends and future directions in cad. In *CAD and GIS Integration*, capitolo 1 - Current Trends and Future Directions in CAD, pp. 1–21. Taylor&Francis, 2010.

[4] Malcom Atkinson, François Bancilhon, David De Witt, Klaus Dittrich, David Maier, e Stanley Zdonik. The object-oriented database system manifesto In *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. A cura di H. V. Jagadish e Hector Garcia-Molina. ACM - SIGMOD, ACM Press, 1990.

[5] Paolo Atzeni, Stefano Ceri, Stefano Paraboschi, e Riccardo Torlone. *Basi di dati: modelli e linguaggi di interrogazione*. McGraw-Hill Italia, 2009.

[6] C. Baracchini, F. Fabiani, P. Ponticelli, e A. Vecchi. Verso un sistema unico di riferimento per la documentazione di restauro: storia e sviluppi di sicar w/b. In *Atti del Convegno eARCOM*, 2007.

[7] C. Baracchini, P. Lanari, P. Ponticelli, R. Parenti, e A. Vecchi. Sicar: un sistema per la documentazione georeferenziata in rete. In *Sulle pitture murali: riflessioni, conoscenze, interventi: Atti del Convegno di Studi Scienza e Beni Culturali Bressanone 2005*, Marghera (VE) IT, 2005. Arcadia Ricerche.

[8] Tim Berners-Lee. Information management: A proposal. Relazione tecnica, CERN, 1989.

[9] Jay David Bolter e Richard Grusin. *Remediation*. Guerini Studio, 2002.

[10] Cristina Bonfanti. *Misura, documentazione, rappresentazione: studi per l'organizzazione di un sistema informativo referenziato. L'Insula 194 nella Regio VII dell'antica città di Hierapolis di Frigia (Turchia)*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Politecnico di Torino, IT, 2007.

[11] Grady Booch, James Rumbaugh, e Ivar Jacobson. *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison-Wesley Professional, 1998.

[12] Grady Booch, James Rumbaugh, e Ivar Jacobson. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley Professional, 1999.

[13] Omar Boucelma e François-Marie Colonna. Gquery: A query language for gml. In *24th Urban Data Management Symposium, UDMS 2004*, pp. 23–32, 2004.

[14] Paul Box. *GIS and Cultural Resource Management. A Manual for Heritage Managers*. UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Principal Regional Office for Asia and the Pacific, 1999.

[15] Paul Bryan, Bill Blake, e Bedford Jon. *Metric Survey Specifcations for Cultural Heritage*. English Heritage, 2009.

[16] Peter A. Burrough. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, 1986.

[17] G. Capponi, P. Lanar, S. Lodola, C. Magnatti, U. Parrini, A. Vecchi, S. Vedovello, e F. Veniale. Il software akira gis server - un'applicazione nella mappatura dei materiali costitutivi e dello stato di degrado della torre di pisa. *Bollettino del Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali*, 5:115–126, 2000.

[18] Peter Pin-Shan Chen. The entity-relationship model: Toward a unified view of data. *ACM Transaction on Database Systems*, I(1), 1976.

[19] CIPA - International Committee for Documentation of Cultural Heritage. *CIPA Statutes*, 2004.

[20] CIPA - International Committee for Documentation of Cultural Heritage. *RecorDIM (for Heritage Recording, Documentation and Information Management) - Task Group 16 Draft report*, 2007.

[21] CISIS - Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici, statistici. *Intesa Stato-Regione ed Enti Locali per la Realizzazione dei Sistemi Informativi Geografici di Interesse Generale - Sistema Cartografico di Riferimento*, 2006.

[22] Eliseo Clementini, Paolino Di Felice, e Peter van Oosterom. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction In *Advances in Spatial Databases*. A cura di David Abel e Beng Chin Ooi, volume 692 di *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 277–295. Springer Berlin / Heidelberg, 1993.

[23] Edgar Frank Codd. A relational model of data for large shared data banks. *Communication of the ACM*, XIII(6):377–387, 1970.

[24] Dublin Core Metadata Initiative. *Dublin Core Metadata Element Set, Version 1.1*, 2009.

[25] Max J. Egenhofer e Andrew U. Franck. Object oriented modeling for gis. *URISA Journal*, IV(2):3–19, 1992.

[26] Max J. Egenhofer e Robert Franzosa. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2):161–174, 1991.

[27] Max J. Egenhofer e John R. Herring. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In *Proceedings of the IV International Symposium on Spatial Data Handling*. SDH, 1990.

[28] Claire Ellul e Heaklay Mordechai Muki. Using a b-rep structure to query 9-intersection topological relationships in 3d gis - reviewing the approache and improving performances In *3D Geoinformation Sciences*. A cura di Jiyeong Lee e Sisi Zlatanova. Springer - Verlag, 2009.

[29] EPOCH - Europeand Network for Excellence in Open Cultural Heritage, London. *The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage*, 2009.

[30] Leonhard Euler. Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. In *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, volume 8, pp. 128–140. 1741.

[31] Carlotta Fierro. *Tutela e salvaguardia dei Beni Culturali Vincolati attraverso la gestione di una banca dati georeferenziata su più basi cartografiche (DB topografico e DB catastale)*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Politecnico di Torino, 2007.

[32] Andrew U. Frank e Werner Kuhn. Cell graphs: a provable correct method for the storage of geometry. In *Proceedings of the II International Symposium on Spatial Data Handling*. SDH, 1986.

[33] M. C. Galli e D. Londei. Multidisciplinarietà oggi. In *Presentazione del Convegno: Il meticciato culturale. Luogo di creazione di nuove identità o di conflitto?*, Bologna IT, Centro di Ricerche sull'Europa dell'Università di Bologna 2003.

[34] Michael F. Goodchild. Geographical information science. In *Proceedings of the Second European Conference on Geographical Informations Systems (EGIS)*, 1991.

[35] Michael F. Goodchild. Field-based spatial modeling. In *Encyclopedia of Database Systems*. Springer - Verlag, 2009.

[36] Michael F. Goodchild. Geographic information system In *Encyclopedia of Database Systems*. A cura di LING LIU e M. TAMER ÖZSU, pp. 1231–1236. Springer - Verlag, 2009.

[37] IAI - International Alliance for Interoperability. *IFC2x2 Final Online Documentation*, 2003.

[38] ICOM - International Council of Museums, Paris. *Handbook of Standards. Documenting African Collections*, 1996.

[39] ICOMOS - International Council on Monuments and Sites, Venezia. *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*, 1964.

[40] ICOMOS - International Council on Monuments and Sites. *Icomos Statutes*, 1978.

[41] ICOMOS - International Council on Monuments and Sites, Sofia BG. *Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*, 1996.

[42] ICOMOS - International Council on Monuments and Sites. *The Burra Charter*, 1999.

[43] ICOMOS - International Council on Monuments and Sites. *Charter for the Interpretation and Presentation of Cultural Heritage Sites - Ename Charter*, 2008.

[44] Intesa GIS WG 01. *Specifiche per la realizzazione dei database topografici di interesse generale*, 2006.

[45] ISO - International Organization for Standardization. *ISO/TC211 Geographic Information/Geomatics Standards Guide.*

[46] Finith Jernigan. *BIG BIM little bim.* 4Site Press, Salisbury US-MD, 2007.

[47] Guan Jihong. Gql: Extending xquery to query gml documents. *Geo-Spatial Information Science*, 9:118–126, 2006. 10.1007/BF02826937.

[48] T. H. Kolbe, Gerhard König, Claus Nagel, e Alexandra Stadler. *3D-Geo-Database for CityGML. Version 2.0.1.* Institute for Geodesy and Geoinformation Science - TU Berlin, 2009.

[49] Robert Letellier. *Recording, Documentation and Information Management for the Conservation of Heritage Places.* The Getty Conservation Institute, Los Angeles US-CA, 2007.

[50] Xiaomeng Liu, Wenzhong Shi, Lixin Wu, e Yangbing Wang. On 3d gis spatial modeling. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVI. ISPRS, 2007.

[51] Domenico Longhi. *Le Attività Geografiche delle Regioni d'Italia.* CISIS - Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici, statistici, 2007.

[52] Marco Manetti. *Topologia.* Springer - Verlag, Milano IT, 2008.

[53] Martien Molenaar. Multi-scale approaches for geodata. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXI. ISPRS, 1996.

[54] Martien Molenaar. *An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling for GIS.* Taylor and Francis, London UK, 1998.

[55] Piergiorgio Odifreddi. *Una via di fuga.* Arnoldo Mondadori Editore, 2011.

[56] OGC - Open Geospatial Consortium. *The OGC Abstract Specification Topic 0. Abstract Specification Overview. 04-084*, 2005.

[57] OGC - Open Geospatial Consortium. *The OpenGIS Abstract Specification Topic 6. Schema for coverage geometry and functions. 07-011*, 2006.

[58] OGC - Open Geospatial Consortium. *Open GIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard v.3.2.1 07-036*, 2007.

[59] OGC - Open Geospatial Consortium. *OGC KML*, 2008.

[60] OGC - Open Geospatial Consortium. *OGC Reference Model. 08-062r4*, 2008.

[61] OGC - Open Geospatial Consortium. *Open GIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard v.1.0.0 08-007r1*, 2008.

[62] OGC - Open Geospatial Consortium. *The OGC Abstract Specification Topic 5. Features*, 2009.

[63] OMG - Object Management Group. *Meta Object facility (MOF) Core Specification v.2.4*, 2010.

[64] OMG - Object Management Group. *Unified Modeling Language version 1.4.2 - ISO/IEC 19501*, 2011.

[65] Joan Peckham e Fred Maryanski. Semantic data models. *ACM Comput. Surv.*, 20:153–189, 1988.

[66] Friso Penninga. Oracle 10g topology. Relazione tecnica, OTB Research Institute for Housing, Urban and Mobility Studies TU Delft, 2004.

[67] Friso Penninga. *3D Topography*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Delft University of Technology, Ne, 2008.

[68] Morakot Pilouk. *Integrated modelling for 3D GIS*. Tesi di Dottorato di Ricerca, ITC - University of Twente, NE, 1996.

[69] Alias Abdul Rahman e Jane E. Drummond. The implementation of object-oriented tin-based subsystems for gis. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXII. ISPRS, 2000.

[70] Alias Abdul Rahman e Morakot Pilouk. *Spatial Data Modelling for 3D GIS*. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg DE, 2008.

[71] Siva Ravada, M. Kazar, e Kothuri Ravi. Query processing in 3d spatial databases: Experiences with oracle spatial 11g In *3D Geoinformation Sciences*. A cura di Sisi Zlatanova e Lee Jiyeong, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, capitolo 10, pp. 153–173. Springer - Verlag, 2009.

[72] Repubblica Italiana. *Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137*, 2004.

[73] C. Roggero Bardelli, F. Barrera, V. Defabiani, M. Grosso, A. Magnaghi, L. Re, A. Sistri, e M.G. Vinardi. *Il Valentino: sintesi storica e metodologia per il progetto*. CELID, 1986.

[74] C. Roggero Bardelli e A. Scotti. *Il Castello del Valentino*. Politecnico di Torino, 1994.

[75] P. Salonia. Tecnologie informatiche per la gestione delle conoscenze nella conservazione del costruito storico. *Archeologia e Calcolatori*, XI:219–240, 2000.

[76] P. Salonia e A. Negri. Arkis-net: un web-gis per il progetto di conservazione assistito. *Archeologia e Calcolatori*, XVI:167–176, 2005.

[77] A. Scianna, A. Ammoscato, e R. Corsale. A step toward interoperability managing 3d urban data with gml structures. In *Proocedings of the 25th Urban Data Management Symposium*, 2006.

[78] SCRA. *Step Application Handbook - ISO10303 - Version 3*, 2006.

[79] National Park Service. *Secretary of the Interior's Standards and Guidelines for Architectural and Engineering Documentation: HABS-HAER Standards.* US National Park Service - Secretary of the Interior's, 1990.

[80] Antonia Spanò. *Progetto e realizzazione di un sistema informativo interdisciplinare per l'analisi di un contesto storico-territoriale.* Tesi di Dottorato di Ricerca, Politecnico di Milano, IT, 2002.

[81] Antonia Spanò. Report del rilievo metrico integrato di parti del castello del valentino. Relazione tecnica, Politecnico di Torino, 2010.

[82] Antonia Spanò e Erik Costamagna. Geomatic training experiences for a high vulnerability cultural heritage item. In *Proceedings of the Remote Sensing And Geo-Information For Environmental Emergencies Conference*, 2010.

[83] Antonia Spanò e Erik Costamagna. Very close nadiral images: a proposal for quick digging survey. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVIII, pp. 155–160. ISPRS, 2010.

[84] Antonia Spanò e Nadia Guardini. A sustainable approach in 3d documentation for historical building restoration. valentino castle buildingyard. In *Proceedings of the Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin Conference*, 2011.

[85] Andreas Steiner, Adrian Kobler, e Moira C. Norrie. Oms java: Model extensibility of oodbms for advanced application domains. In *Proc. 10th Conf. on Advanced Information Systems Engineering.* CAiSE, 1998.

[86] Ivan Sutherland. Technical report no. 296: Sketchpad: A man machine graphical communication system. Relazione tecnica, MIT - Massachusetts Institute of Tecnology, 1963.

[87] Robin Thornes e John Bold. *Documenting the Cultural Heritage.* Getty Conservation Institute, 1998.

[88] UE - Council of Europe, Parigi (FR). *European Cultural Convention*, 1954.

[89] UE - Council of Europe, Granada (E). *Convention for the Protection of the Architectural Heritage of Europe*, 1985.

[90] UE - Council of Europe. *Recommendation on the co-ordination of documentation methods and systems related to historic buildings and monuments of the architectural heritage, Committee Of Ministers Recommendation No. R (95) 3*, 1995.

[91] UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Parigi. *Convention concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage*, 1972.

[92] UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Parigi. *Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention*, 2005.

[93] Peter van Oosterom, Erik Jansen, e Jantien Stoter. Bridging the worlds of cad and gis In *Large-scale 3D Data Integration: Challenges and Opportunities*. A cura di Sisi Zlatanova e David Prosperi, capitolo 9, pp. 9–36. Taylor&Francis - CRC Press, Boca Raton US-FL, 2005.

[94] Peter van Oosterom, Sisi Zlatanova, Jantien Stoter, , e Wilko Quak. The balance between geometry and topology In *Advances in Spatial Data Handling*. A cura di Dianne Richardson e Peter van Oosterom, volume XII, pp. 209–224. SDH, Springer - Verlag, 2002.

[95] W3C - World Wide Web Consortium. *XML Schema Part 1: Structures Second Edition*, ii edizione, 2004.

[96] W3C - World Wide Web Consortium. *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*, 2008.

[97] W3C - World Wide Web Consortium. *XML Linking Language (XLink) Version 1.1*, 2010.

[98] W3C - World Wide Web Consortium. *XML Path Language (XPath) 2.0 (Second Edition)*, ii edizione, 2010.

[99] W3C - World Wide Web Consortium. *XQuery 1.0 and XPath 2.0 Formal Semantics (Second Edition)*, 2010.

[100] W3C- World Wide Web Consortium. *XQuery 1.0: An XML Query Language (Second Edition)*, ii edizione, 2010.

[101] Web3D Consortium. *Extensible 3D (X3D) ISO/IEC 19775-1:2008*, 2008.

[102] Fubao Zhu, Jihong Guan, Jiaogen Zhou, e Shuigeng Zhou. Storing and querying gml in object-relational databases. In *Proceedings of the 14th annual ACM Snternational Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, GIS '06, pp. 107–114, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[103] Sisi Zlatanova. *3D GIS for Urban Development*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Graz University of Technology, Graz A, 2000.

[104] Sisi Zlatanova e Umit Isikdag. Towards defining a framework for automatic generation of buildings in citygml using bim In *3D Geoinformation Sciences*. A cura di Sisi Zlatanova e Lee Jiyeong, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, capitolo 6, pp. 79–96. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg DE, 2009.

[105] Sisi Zlatanova, Umit Isikdag, Manfred Ehlers, e Ihab Hijazi. Ifc to citygml tranformation framework for geoanalysis: A water utility netowork case. In *Proceedings of the 4th International Workshop on 3D Geo-Information*, pp. 123–127. Ghent University, 2009.

[106] Sisi Zlatanova, Alias Abdul Rahman, e Morakot Pilouk. Trends in 3d gis software development. *Journal of Geospatial Engineering*, 4(2), 2002.

[107] Sisi Zlatanova, Alias Abdul Rahman, e Wenzhong Shi. Topology for 3d spatial objects. In *Proceedings of the International Symposium and Exhibition on Geoinformation*, 2002.

[108] Sisi Zlatanova e Jantien Stoter. Visualisation and editing of 3d objects organised in a dbms. In *Proceedings of the EuroSDR Com V. Workshop on Visualisation and Rendering*. Euro SDR, 2003.

[109] Sisi Zlatanova e Edward Verbree. Gist report no.29: 3d-modeling with respect to boundary representations within geo-dbms. Relazione tecnica, OTB - Delt University of Technology, 2004.

Note

Le operazioni di *unmarshalling* sugli schemi XML sono state realizzate tramite HyperModel Designer, software *open-source* della Eclipse Foundation. Le elaborazioni sul codice XML del modello CityGML implementato e le operazioni di validazione tramite gli schemi invece state effettuate tramite versioni dimostrative di XMLSpy di Altova GmbH, XML Studio di Liquid Technologies e Stylus Studio di Progress Software. I diagrammi UML sono stati realizzati con ArgoUML, progetto *open-source* fondato da Jason Robbins. Le elaborazioni spaziali e le tematizzazioni sul modello del terreno relativo al cortile aulico sono state effettuate tramite ArcGIS Desktopo 9.3 della ESRI (*Environmental Sytems Research Institute*). Le operazioni di decimazione e conversione della superficie triangolata invece sono state effettuate su una versione di prova di Geomagic Studio 12, software per il trattamento di modelli di superficie strutturati e non. La creazione del modello tridimensionale è stata effettuata tramite software di modellazione CAD proprietari che, ad eccezione di alcuni strumenti *open-source* di modellazione 3D, al momento sono gli unici a essere dotati degli strumenti più completi e sofisticati per la gestione della geometria vettoriale. È stata effettuata una selezione tra i software più diffusi in base alle caratteristiche delle diverse fasi della costruzione del modello 3D, dalla modellazione alla definizione dei parametri relativi all'aspetto superficiale per la resa fotorealistica. Sono state utilizzate versioni educative per le elaborazioni CAD effettuate con Autodesk AUTOCAD 2011 e 3D Studio MAX e per quelle raster realizzate tramite Adobe Photoshop. È stata inoltre utilizzata una versione dimostrativa di Rhinoceros3D per la modellazione delle superfici NURBS poi convertite in mesh triangolari. La modellazione tridimensionale per mezzo di superfici parametriche come le NURBS rispetto a quella della Geometria Solida Costruttiva (utilizzata prevalentemente da 3D Studio MAX) permette una maggiore libertà nella definizione di superfici complesse e la minore onerosità computazionale nella gestione dei dati. La base di dati geometrici proveniente dal rilievo metrico è eterogenea e non completamente strutturata. Alcuni software proprietari in ambito CAD come Allplan-BIM, ArchiCAD di Graphisoft e Autodesk Architecture permettono una modellazione del contenuto semantico dei dati secondo lo standard IFC. L'integrazione tra il modello IFC e quello CityGML non è ancora risolta pienamente per quanto riguarda la corrispondenza delle classi semantiche e geometriche e non è inoltre supportata dai maggiori software che utilizzano il modello IFC. La mappatura dei dati dalle diversi fonti del dataset CAD e raster e la scrittura del formato CityGML è stata quindi realizzata per mezzo di una versione di prova di FME Workbench della Safe Softwares. Questo strumento offre potenti funzionalità di traduzione e ristrutturazione del contenuto geometrico e semantico dei dati. Per quanto concerne la definzione di quest'ultimo è possibile filtrare, aggregare o qualificare gli attributi tramite schemi grafici di mappatura. La scelta di questo strumento è stata dettata proprio dalle possibilità di organizzare una serie di dati semi-strutturati secondo uno schema complesso come quello GML. Per la visualizzazione e l'interrogazione invece sono stati utilizzati i *freeware* FZKViewer (v3.2.1) del Karlsruhe Institute of Technology e LandXplorer Viewer 2009 di Autodesk. L'implementazione del database è stata effettuata su una versione dimostrativa di ORACLE Database 11g.

Tutti i disegni e gli schemi, salvo quanto diversamente specificato sono opera del sottoscritto.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare Filiberto Chiabrando e Cristina Bonfanti per avermi aiutato a scoprire il mondo della Geomatica e delle sue applicazioni allo studio dell'Architettura e in particolare a quelle relative al patrimonio architettonico e ambientale. Ringrazio Nannina che mi ha accompagnato e sostenuto in questo percorso di ricerca mi ha permesso di scoprire, attraverso lo studio e la ricerca nel campo dei GIS, una dimensione molto più ampia e nello stesso tempo integrata con i metodi e le applicazioni della Geomatica. Una dimensione che non immaginavo prima di intraprendere questa ricerca. La scoperta di queste possibilità mi ha fatto uscire dagli stretti confini di una visione strettamente applicativa della disciplina, permettendomi di impostare la ricerca nel campo della modellazione dei dati spaziali in modo rigoroso e analitico con la consapevolezza però dei limiti che l'approccio di una singola disciplina inevitabilmente ha nell'affrontare la complessità dell'argomento della documentazione dei beni culturali. Gliene sono molto grato.

Un ringraziamento speciale va a mio fratello Valerio che oltre ad essermi stato vicino in questi tre anni di intenso lavoro, mi ha aiutato a formalizzare in modo logico-matematico le relazioni tra le componenti della rappresentazione geometrica e mi ha dato un supporto fondamentale nell'utilizzo dei linguaggi informatici per l'implementazione, gestione e analisi dei dati. Il suo contributo è stato importante per il raggiungimento di questi risultati applicativi.