

Politecnico di Torino  
Dottorato in Innovazione tecnologica per l'ambiente costruito  
XXVI ciclo

# stra(w)isolami

Analisi tecnologica di edifici esistenti isolati con balle di paglia

candidato:  
Anna Rita Bertorello

tutor:  
prof. Gianfranco Cavaglià

co-tutor:  
prof.ssa Valentina Serra

Anna Rita Bertorello, marzo 2014  
Politecnico di Torino  
Dottorato in Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito (ITAC)  
Tesi di Dottorato, XXVI ciclo  
curricula: Tecnologia dell'Architettura  
Licenza CC BY NC SA

## Abstract

Il contenimento dei consumi energetici e l'adeguamento dal punto di vista termico delle abitazioni esistenti sono tematiche attuali finalizzate alla diminuzione delle emissioni in atmosfera e al raggiungimento degli obiettivi imposti dalla Comunità Europea entro il 2020. L'attenzione a questo argomento, dettata anche dalle norme energetiche europee e nazionali che si applicano in caso di ristrutturazione degli edifici esistenti, ha prodotto interventi di miglioramento e valorizzazione del patrimonio costruito esistente diminuendo l'energia impiegata durante la fase di esercizio e evitando un ulteriore consumo di suolo.

Nel presente lavoro di ricerca viene posta l'attenzione sull'isolamento termico applicato all'interno o all'esterno delle chiusure esistenti. All'interno di questo quadro, viene analizzata una soluzione non molto diffusa: l'isolamento con balle di paglia. Oltre all'analisi dello stato dell'arte su caratteristiche e impiego della paglia in edilizia, vengono analizzati 16 casi di edifici esistenti isolati con balle di paglia (14 dall'esterno e 2 dall'interno) per comprendere i limiti e gli elementi costruttivi utilizzati durante la messa in opera dell'isolamento attraverso un'analisi tecnologica. Dalla documentazione e informazioni reperite è emerso che la scelta di questa tipologia di isolamento è dettata prevalentemente da scelte ideologiche personali legate a un modo di costruire più sostenibile legato alla bioedilizia e dalla volontà di partecipare durante le fasi costruttive da parte degli utenti finali. La sua applicazione è limitata a edifici rurali o collocati in ambiti semiurbani e dato il grande spessore dello strato isolante (minimo 35 cm) limita l'ingresso della luce nei locali esistenti.

A partire dalle considerazioni sullo spessore di isolamento applicato a una chiusura esistente, è stato studiato il comportamento igrometrico dell'isolamento (calcolo della quantità di acqua presente nello strato isolante e nella chiusura isolata e calcolo del Moisture Buffer Value), confrontandolo con la calce-canapa, su due tipologie di chiusure (muratura portante e cassa vuota) attraverso simulazioni con il software WUFI. Da questo studio è emerso che seppur in alcuni casi lo spessore totale della chiusura isolata superava i 90 cm non venivano rilevati, a fine simulazione, fenomeni di condensa interstiziale. Questo è dovuto alla natura dei materiali in analisi e alla loro traspirabilità.

Per comprendere meglio l'effettiva influenza della paglia come isolante termico, è stata realizzata un'applicazione diretta all'esterno di una chiusura verticale di un'abitazione privata. Di questa sperimentazione sono stati effettuati un rilievo termografico e un monitoraggio per analizzare la trasmittanza, le variazioni di temperatura e i flussi di calore attraverso la parete di due stanze attigue con la stessa dimensione. Dall'elaborazione dei risultati ottenuti è emerso che l'isolamento in paglia ha aumentato la temperatura superficiale della chiusura isolata di circa  $1.60^{\circ}\text{C}$  rispetto alla chiusura non isolata e i flussi di calore sono diminuiti del 50% nella chiusura isolata.

The reduction of energy consumption and the thermal updating of existing buildings are strategies for decreasing atmospheric emissions and achieving the objectives set by the European Community to be met by 2020. The application of the European and national energy standards to the renovation of existing buildings, has produced improvements and added value to existing buildings by reducing their energy use.

In this study the focus is on the thermal insulation applied to the inside or outside of the existing walls. In this context, a relatively unusual solution is analyzed: insulation with straw bales.

In addition to the state of the art analysis of the characteristics of straw when used in construction, 16 cases of existing buildings insulated with straw bales are analyzed (14 outer insulation and 2 inner insulation). To understand the limits of this solutions and the elements used during the installation of the insulation it was used a technological analysis.

The research presented in this study shows that the choice of this type of insulation is based upon the values of the inhabitants and their willingness to take part during the construction phases. This insulation is limited to buildings located in rural or semi-urban areas because the large thickness of the insulating layer (minimum 35 cm) limits the entry of the light into the rooms.

From these considerations of the thickness of insulation applied to an existing wall, the hygrometric behavior of the insulation has been studied (calculation of the amount of water present in the insulating layer and in the total insulated wall and the calculation of Moisture Buffer Value), compared with hemp lime, on two types of enclosures (solid wall and cavity wall) through simulations with WUFI software. At the end of the simulation it was found that, although in some instances the total thickness of the insulated wall exceeded 90 cm, interstitial condensation didn't occur because the insulating materials used were breathable.

To understand the influence of straw as a thermal insulation, it was built as an outside insulation on a vertical wall of a private home. In this experiment thermographic measurement and monitoring were undertaken to analyze the transmittance (U-value), the variations of temperature and the heat flows through the walls of two adjacent rooms of the same size. Analysis of the results showed that the straw insulation increased the surface temperature of the insulated wall by approximately 1.60° C compared with the non-insulated wall and the heat fluxes were reduced by 50 % in the insulated wall.

---

## Ringraziamenti

al prof. Gianfranco Cavaglià per la sua presenza in questi anni in cui mi ha supportato e "sopportato" nella ricerca e nella scrittura; per il continuo confronto e dialogo che si è venuto a creare con il tempo e per essere stato un Maestro

alla prof.ssa Valentina Serra per aver reso possibile la realizzazione del monitoraggio durante la sperimentazione

al prof. Peter Walker per avermi offerto l'opportunità di un periodo di permanenza presso l'University of Bath (UK) e al dott. Andy Shea, Mike Barclay e Neal Holcroft per la loro disponibilità nei miei confronti e interesse nella mia ricerca

ad Ann e Peter Barret per la loro ospitalità e amicizia e per avermi fatto sentire parte della loro famiglia durante la permanenza a Bath

al prof. Andrea Bocco che senza volerlo mi ha fatto scoprire nei suoi corsi quello che sarebbe diventato l'approfondimento sviluppato nella tesi e per avermi fatto conoscere personalmente l'arch. Werner Schmidt e l'arch. Margareta Schwarz

alle persone che hanno contribuito con documentazione, informazioni e dialoghi durante la ricerca e analisi dei casi studio, perché senza di loro non sarebbe stato possibile realizzare parte del lavoro: Jakub Wihan, Barbara Jones, Keven Le Doujet, Michel Post (ORIO Architekten), Herbert Gruber (ASBN - Austrian Straw Bale Network), Georg Bechter (GeorgBechter Architektur + Design), Cadmon Whitty (Paja Construction), Titus Igaz, Robin Howell (Burtle Village), Erwin Schwarzmuller, Boris Hoechel, Margareta Schwarz, Andrea e Erwin Jacomet, Werner Schmidt, Finlay White, John Butler

a Lorenza Bianco per la sua disponibilità e curiosità nel conoscere e monitorare una soluzione non tradizionale

a Irene Caltabiano, Marika Mangosio, Emiliano Michelena Varcancel, Roberto Pennacchio, Ignazio Caruso e Luca Toschino per la loro amicizia, presenza, consigli e supporto durante il lavoro

ai miei genitori che con grande pazienza mi hanno aiutato, sostenuto e, talvolta, subito in questi anni, ma sono sempre stati vicini e presenti anche durante le fasi di realizzazione e montaggio della sperimentazione

ad Alberto che è sempre stato al mio fianco e ha sempre creduto in me



*Nei momenti in cui il regno dell'umano mi sembra condannato alla pesantezza, penso che dovrei volare come Perseo in un altro spazio. Non sto parlando di fughe nel sogno o nell'irrazionale, devo guardare il mondo con un'altra ottica, un'altra logica, altri metodi di conoscenza e di verifica.*

*Italo Calvino, Lezioni americane, p.12*





# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduzione</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>0.1 Caratteristiche generali della ricerca</b>                       | <b>14</b> |
| 0.1.1 collocazione scientifica della ricerca .....                      | 14        |
| 0.1.2 obiettivi specifici .....   | 14        |
| 0.1.3 criteri di esposizione del lavoro .....                           | 14        |
| 0.1.4 legame con tematiche del dottorato .....                          | 15        |
| 0.1.5 aree scientifico-disciplinari interessate dalla ricerca .....     | 15        |
| <b>0.2 fasi della ricerca</b>   | <b>16</b> |
| <b>0.3 fonti</b>  | <b>19</b> |
| 0.3.1 letteratura scientifica .....                                     | 19        |
| 0.3.2 studi su ricerche .....   | 19        |
| 0.3.3 fonti normative .....   | 19        |
| 0.3.4 fonti dal web .....   | 19        |
| 0.3.5 fonti orali .....   | 20        |
| 0.3.6 documentazione fotografica e di progetto .....                    | 20        |
| <b>0.4 metodologia di ricerca</b>                                       | <b>20</b> |
| <b>1 Intervento sull'esistente</b> .....                                | <b>21</b> |
| <b>1.1 Riduzioni emissioni e consumi</b>                                | <b>21</b> |
| <b>1.2 Edifici esistenti: un patrimonio da valorizzare e riadattare</b> | <b>22</b> |
| <b>1.3 Intervenire sull'esistente per ridurre il consumo di energia</b> | <b>24</b> |
| 1.3.1 la normativa italiana in materia di risparmio energetico .....    | 26        |
| 1.3.2 la normativa europea .....  | 27        |
| 1.3.3 Recupero energetico degli edifici in Inghilterra .....            | 27        |
| <b>2 L'isolamento termico di edifici esistenti</b> .....                | <b>33</b> |
| <b>2.1 Gli isolanti nella storia</b>                                    | <b>34</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>2.2</b> | <b>Gli interventi sull'esistente</b>   | <b>35</b> |
| 2.2.1      | Alcuni esempi  | 36        |
| <b>2.3</b> | <b>Isolamento termico degli edifici: gli isolanti di origine vegetale</b>      | <b>38</b> |
| <b>3</b>   | <b>La paglia</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.1</b> | <b>La morfologia</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.2</b> | <b>La produzione e usi</b>   | <b>43</b> |
| <b>3.3</b> | <b>La decomposizione della paglia</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.4</b> | <b>La paglia nelle costruzioni</b>   | <b>45</b> |
| 3.4.1      | Pannelli compressi in paglia   | 47        |
| 3.4.2      | Edifici prefabbricati in paglia  | 48        |
| 3.4.3      | L'isolamento in paglia di edifici esistenti                                    | 50        |
| <b>3.5</b> | <b>Aspetti fisici degli edifici in paglia</b>                                  | <b>50</b> |
| 3.5.1      | L'umidità della paglia nelle costruzioni                                       | 50        |
| 3.5.2      | La conducibilità della paglia  | 51        |
| 3.5.3      | La resistenza al fuoco   | 52        |
| 3.5.4      | Acustica   | 53        |
| 3.5.5      | L'energia grigia   | 53        |
| <b>4</b>   | <b>Analisi tecnologica di edifici isolati con balle di paglia</b>              | <b>55</b> |
| <b>4.1</b> | <b>L'analisi e organizzazione dei casi studio</b>                              | <b>55</b> |
| <b>4.2</b> | <b>L'approccio sistemico</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.3</b> | <b>I casi studio</b>   | <b>57</b> |
| <b>4.4</b> | <b>L'organizzazione dei casi studio</b>  | <b>60</b> |
| 4.4.1      | fissaggio delle balle di paglia con corde o nastri alla chiusura esistente     | 61        |
| 4.4.1.1    | Burtle Village (Inghilterra)   | 62        |
| 4.4.1.2    | Casa a Bridport (Inghilterra)  | 72        |
| 4.4.1.3    | Casa ad Alburbesque (New Mexico)   | 83        |
| 4.4.1.4    | Casa a Brazec (Repubblica Ceca)  | 89        |
| 4.4.1.5    | Casa a Cinzano (Italia)  | 97        |
| 4.4.1.6    | Casa a Brestovec (Slovacchia)  | 101       |
| 4.4.2      | inserimento delle balle di paglia fra pannelli                                 | 116       |
| 4.4.2.1    | Casa a Sumvitg (Svizzera)  | 117       |
| 4.4.2.2    | Casa a Egg (Austria)   | 129       |
| 4.4.3      | inserimento delle balle di paglia in una struttura di legno                    | 140       |
| 4.4.3.1    | Casa a Laval (Francia)   | 141       |
| 4.4.3.2    | Casa in Baviera (Germania)   | 145       |
| 4.4.3.3    | Casa a Nyíregyháza (Ungheria)  | 149       |
| 4.4.3.4    | Casa a Neulengbach (Austria)   | 153       |
| 4.4.4      | inserimento delle balle di paglia in un telaio prefabbricato                   | 157       |
| 4.4.4.1    | Casa a San Martino in Passiria (Italia)  | 158       |
| 4.4.5      | supporto delle balle di paglia con struttura inserita nella chiusura esistente | 168       |
| 4.4.5.1    | Casa a Point Saint Esprit (Francia)  | 169       |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.4.6      | inserimento delle balle di paglia fra pannelli .....                            | 175        |
| 4.4.6.1    | Casa a Nieuweschans (Olanda) .....  | 176        |
| 4.4.6.2    | Casa a Bever (Svizzera) .....   | 181        |
| 4.4.7      | tabelle riassuntive .....   | 189        |
| <b>4.5</b> | <b>Considerazioni tecnologiche dell'isolamento in paglia</b>                    | <b>193</b> |
| 4.5.1      | La forma dell'edificio .....  | 193        |
| 4.5.2      | Lo spessore di isolamento .....   | 193        |
| 4.5.3      | I metodi di installazione .....   | 194        |
| 4.5.4      | fissaggio delle balle di paglia .....   | 196        |
| 4.5.5      | luce naturale .....   | 197        |
| 4.5.6      | infissi esistenti .....   | 198        |
| 4.5.7      | finitura esterna .....  | 199        |
| 4.5.8      | schermature solari .....  | 200        |
| <b>4.6</b> | <b>Osservazioni riscontrate nell'analisi dei casi studio</b>                    | <b>204</b> |
| <b>5</b>   | <b>L'umidità nell'isolamento in paglia .....</b>                                | <b>207</b> |
| <b>5.1</b> | <b>I casi studio</b>  | <b>207</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Caratteristiche fisiche delle murature di studio</b>                         | <b>211</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Modellazione con WUFI</b>  | <b>212</b> |
| 5.3.1      | La parete in muratura a cassa vuota isolata esternamente in paglia ..           | 212        |
| 5.3.2      | Altre tipologie di parete isolate con paglia e calce canapa .....               | 213        |
| <b>5.4</b> | <b>Calcolo del Moisture Buffer Value (MBV)</b>                                  | <b>214</b> |
| <b>5.5</b> | <b>Calcolo della trasmittanza termica transitoria con WUFI</b>                  | <b>215</b> |
| <b>6</b>   | <b>La sperimentazione: realizzazione di un cappotto esterno in paglia .....</b> | <b>219</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Il caso studio</b>   | <b>219</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Le fasi di progetto</b>  | <b>220</b> |
| 6.2.1      | Soluzione A .....   | 221        |
| 6.2.2      | Soluzione B .....   | 221        |
| 6.2.2.1    | variante soluzione B .....  | 222        |
| <b>6.3</b> | <b>Il reperimento dei materiali</b>   | <b>223</b> |
| <b>6.4</b> | <b>La prova di disposizione delle balle di paglia</b>                           | <b>226</b> |
| 6.4.1      | Posizionamento delle balle "in foglio" sfalsate .....                           | 226        |
| 6.4.2      | Posizionamento delle balle "in foglio" non sfalsate .....                       | 226        |
| 6.4.3      | Posizionamento delle balle in verticale .....                                   | 226        |
| 6.4.4      | Accostamento orizzontale .....  | 228        |
| <b>6.5</b> | <b>Prova di legatura delle balle</b>  | <b>228</b> |
| 6.5.1      | Apparecchiatura orizzontale non sfalsata .....                                  | 228        |
| 6.5.2      | Apparecchiatura orizzontale sfalsata .....                                      | 229        |
| 6.5.3      | Apparecchiatura verticale .....   | 230        |
| 6.5.4      | Considerazioni sulla legatura .....   | 230        |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| <b>6.6</b>  | <b>Prova di taglio di una balla di paglia</b>   | <b>231</b> |
| <b>6.7</b>  | <b>Verifica dei parametri termogrometrici in regime stazionario e dinamico della chiusura verticale</b> | <b>232</b> |
| <b>6.8</b>  | <b>Le fasi di costruzione del cappotto</b>  | <b>233</b> |
| <b>6.9</b>  | <b>Il progetto di monitoraggio</b>  | <b>235</b> |
| 6.9.1       | Monitoraggio parete senza isolamento in paglia (20 dicembre – 28 dicembre)                              | 236        |
| 6.9.2       | Monitoraggio con isolamento in paglia (28 dicembre – 13 gennaio) . . .                                  | 237        |
| <b>6.10</b> | <b>Il rilievo termografico</b>  | <b>238</b> |
| <b>6.11</b> | <b>Risultati raggiunti</b>  | <b>239</b> |
| <b>7</b>    | <b>Conclusioni</b> .....  | <b>247</b> |
|             | <b>Bibliografia</b> .....   | <b>251</b> |
| <b>A</b>    | <b>Taglio di una balla di paglia</b> .....  | <b>259</b> |
| <b>B</b>    | <b>Visita alla BaleHouse</b> .....  | <b>263</b> |
| <b>C</b>    | <b>Preparazione campione per attività di laboratorio</b> .....  | <b>269</b> |
| <b>D</b>    | <b>Visita casa isolata in paglia</b> .....  | <b>273</b> |
| <b>E</b>    | <b>Incontro con sign. Finlay White - ModCell</b> .....  | <b>281</b> |
| <b>F</b>    | <b>Disegni progettuali sperimentazione</b> .....  | <b>289</b> |

## Introduzione

### **stra(w)isolami**

Il motto presente nel titolo è un gioco di parole tra il suffisso *stra-* utilizzato per indicare lo spessore di isolamento in paglia fuori dall'ordinario rispetto agli isolanti tradizionali usati in edilizia e la parola *straw*, che in inglese significa paglia. L'unione di queste parole vuole significare la caratteristica dell'isolamento in paglia legata alle dimensioni non contenute del sistema e al suo potere isolante.

L'attenzione per le tematiche affrontate in questa tesi di dottorato deriva principalmente da interessi personali e non da tematiche assegnate da ricerche finanziate. Non essendo coperta da borsa di dottorato, è stato possibile affrontare in libertà la scelta dell'argomento da sviluppare assecondando interessi e sensibilità sul lavoro sulle preesistenze, sul loro recupero e interessi personali legati alle piante e alla fotografia.

Il tema si è consolidato durante la frequenza di alcuni corsi di dottorato presenti nell'offerta formativa del Politecnico di Torino (Aspetti tecnologici e architettonici della costruzione sostenibile I, Innovazione tecnologica per l'involucro edilizio e Building techniques with natural materials<sup>1</sup>) in cui venivano trattati argomenti sulla sostenibilità degli edifici e presentate alcune tecniche costruttive non tradizionali. La frequenza del corso di eccellenza ha permesso il contatto con il prof. Peter Walker e la mia successiva permanenza di sei settimane presso l'University of Bath (UK) per continuare la ricerca di dottorato in un gruppo di ricerca universitario inglese.

Nel lavoro viene analizzata una soluzione di isolamento estrema, di limitata applicazione ma con alta partecipazione da parte degli utenti finali, rappresentata dalla paglia. La scelta di questa soluzione, interessante in alcune condizioni molto circostanziate, non viene molto utilizzata tanto per le dimensioni, non contenute del sistema, quanto per le possibili applicazioni in ambiti urbani.

<sup>1</sup> Corso di eccellenza in lingua inglese tenuto da relatori esterni: Gernot Minke (University of Kassel), Pat Borer (CAT – Centre for Alternative Technology) e Peter Walker (University of Bath) organizzato dal prof. Andrea Bocco.

In questo lavoro si cerca di analizzare criticamente e senza nessuna presa di posizione questo tipo di isolamento cercando di comprendere le motivazioni dell'utilizzo di tale isolante, le caratteristiche costruttive e i possibili feedback che si potrebbero avere sull'isolamento di edifici esistenti.

Nella seguente parte vengono riportate le caratteristiche, le fasi e la metodologia adottate durante il lavoro di ricerca<sup>2</sup>.

## **0.1 Caratteristiche generali della ricerca**

### **0.1.1 collocazione scientifica della ricerca**

La ricerca di dottorato si inserisce all'interno della tematica di adeguamento degli edifici esistenti dal punto di vista energetico. La riqualificazione di questo patrimonio rappresenta un campo di indagine che offre un'opportunità per il miglioramento prestazionale dell'esistente attraverso interventi sull'involucro e sugli impianti. La focalizzazione dell'attenzione al lavoro sulle preesistenze, che non soddisfano l'attuale normativa in materia di prestazione energetica, risulta di importanza fondamentale nella riduzione dei costi di riscaldamento e delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera. Anche le politiche comunitarie (direttive 2002/91/UE e 2010/31/UE) e le leggi nazionali individuano negli edifici esistenti un settore importante nella riduzione dei consumi energetici, definendo le disposizioni da rispettare durante gli interventi di ristrutturazione.

### **0.1.2 obiettivi specifici**

L'obiettivo specifico della tesi è l'analisi del costruito esistente tradizionale diffuso focalizzando l'attenzione sull'isolamento termico dell'involucro edilizio e in particolare sulla chiusura verticale. Analizzando vari tipi di isolamento l'interesse di questa ricerca si è inquadrato sui materiali di origine vegetale e in specifico sulla paglia. Vengono esaminate da un punto di vista tecnologico, attraverso l'analisi di casi studio costruiti e non, le caratteristiche e i limiti di questo particolare isolamento realizzato con uno scarto della produzione agricola e, attraverso un trasferimento tecnologico, applicato al settore edilizio.

### **0.1.3 criteri di esposizione del lavoro**

Il presente lavoro è stato strutturato in 6 capitoli preceduti da un'introduzione e seguiti dalle conclusioni, bibliografia e da una parte contenente gli allegati.

Nella primo capitolo è stato affrontato il tema dell'intervento sull'esistente in cui è stata effettuata una breve analisi, attraverso la letteratura scientifica, sulle cause delle emissioni di CO<sub>2</sub> e del consumo di energia. Successivamente, è stato affrontato l'argomento della valorizzazione e del riadattamento del patrimonio esistente durante interventi di ristrutturazione per renderlo conforme alle attuali normative in ambito energetico. Per quanto riguarda quest'ultimo punto, viene riportato oltre al caso italiano anche il caso inglese sull'intervento di retrofit di edifici esistenti.

Nel secondo capitolo, l'attenzione è stata posta quindi all'isolamento termico degli edifici esistenti. Oltre a una breve analisi sulle origini della produzio-

---

<sup>2</sup>Per la realizzazione delle caratteristiche generali, le fasi e la metodologia della ricerca si è seguito il procedimento esposto nel testo Giovanni Neri Seneri, *La formazione del ricercatore. Il contributo di un'esperienza*, Alinea 1997 (Seneri, 1997)

ne degli isolanti, vengono analizzati alcuni casi reperiti in letteratura sull'applicazione dell'isolamento sulle preesistenze. Successivamente, viene focalizzata l'attenzione sull'impiego di isolanti di origine vegetale.

Nel terzo capitolo, viene analizzata la paglia secondo le sue caratteristiche fisico morfologiche, la sua produzione ed usi e gli effetti della sua decomposizione. Successivamente, viene trattato l'argomento dell'uso della paglia nelle costruzioni (nuove costruzioni, edifici prefabbricati in paglia e isolamento di edifici esistenti). Vengono trattati aspetti fisici (umidità, conducibilità, resistenza al fuoco, acustica ed energia grigia).

Il quarto capitolo riguarda l'analisi tecnologica dei casi studio rappresentati da edifici esistenti isolati con balle di paglia. Viene riportata l'impostazione e l'organizzazione dei casi studio secondo un approccio sistemico e successivamente vengono presentati i 16 edifici di studio sotto forma di schede. Sono presenti due schede riassuntive riguardanti le caratteristiche climatiche e costruttive dei casi studio e seguono considerazioni tecnologiche scaturite dall'analisi delle schede.

Nel quinto capitolo viene riportato il lavoro effettuato sullo studio della presenza di umidità nelle costruzioni isolate con materiali vegetali realizzato durante la permanenza presso l'University of Bath (UK). Il lavoro è stato portato avanti attraverso la comparazione di due stratigrafie di pareti (una a cassa vuota e l'altra in muratura portante) a cui sono state applicate due differenti tipologie di isolamento di origine vegetale: la paglia e la calce canapa. Vengono riportati i risultati della simulazione con il software WUFI.

Nel sesto capitolo, viene presentato il lavoro di sperimentazione in una porzione di abitazione privata (progetto di intervento sull'esistente, prove realizzate con balle di paglia e documentazione fasi costruttive dell'isolamento in paglia) e i relativi risultati di monitoraggio.

#### **0.1.4 legame con tematiche del dottorato**

Il dottorato di ricerca in Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito (ITAC) è caratterizzato dalla presenza al suo interno di tre aree tematiche: l'Architettura Tecnica, la Fisica Tecnica e la Tecnologia dell'Architettura.

L'argomento sviluppato si inserisce all'interno delle tematiche di ricerca del gruppo di Tecnologia dell'Architettura relativo all'analisi del patrimonio edilizio diffuso, tradizionale e "ordinario" finalizzata all'intervento di adeguamento per il contenimento dei suoi consumi energetici.

#### **0.1.5 aree scientifico-disciplinari interessate dalla ricerca**

La ricerca di dottorato è inserita nel settore disciplinare della Tecnologia dell'Architettura e si avvale del contributo di Fisica Tecnica per l'analisi di alcune tematiche affrontate durante il lavoro. Per quanto riguarda la Tecnologia dell'Architettura si è utilizzato l'approccio metodologico e sistemico di analisi dei processi costruttivi; si è utilizzata l'impostazione di scomposizione in parti di elementi edilizi; si è verificata l'applicazione di un sistema di isolamento non convenzionale su interventi presenti in contesti rurali e a scala di paese o villaggio; si è analizzato in dettaglio l'intervento edilizio attraverso la lettura di disegni progettuali, quando disponibili, alle diverse scale e dei sistemi che lo compongono e l'interesse per i particolari costruttivi ha permesso di comprendere come i vari elementi si relazionano in una costruzione.

Durante la sperimentazione, si è organizzato un progetto di realizzazione di un cappotto esterno in paglia per verificare e comprendere le fasi di posa in opera e l'efficienza del sistema di isolamento in esame.

Ci si è avvalsi del contributo di Fisica tecnica per misurare le caratteristiche fisiche della chiusura verticale del caso studio oggetto di sperimentazione (pre e post intervento) e il comfort termico interno attraverso un monitoraggio in situ. È stato possibile attraverso l'uso di software valutare l'incidenza del sistema di isolamento in paglia in relazione all'ingresso di luce all'interno dei locali e indagare la presenza di umidità all'interno della chiusura verticale isolata in paglia.

## 0.2 fasi della ricerca

La ricerca di dottorato è stata strutturata e suddivisa in 3 fasi (fase di conoscenza, fase di analisi e fase di sperimentazione) e un momento per trarre le conclusioni finali del lavoro.



- fase di conoscenza

La fase di conoscenza ha permesso di inquadrare il contesto della ricerca in ambito generale e focalizzare l'attenzione su un ambito di lavoro più ristretto. Partendo dalla lettura di fonti inerenti l'intervento sugli edifici esistenti dal punto di vista dell'isolamento termico, si è proceduto a focalizzare il tema sull'isolamento con materiali di origine vegetale e in particolare sulla paglia. Prima di passare alla fase di analisi degli edifici esistenti isolati in paglia, sono state analizzate le caratteristiche e gli impieghi del materiale vegetale.

Questa fase è stata caratterizzata dalla presenza di 5 sottofasi: definizione del tema, verifica del tema, stesura del programma, verifica del programma e costruzione base bibliografica.

- fase di analisi

Nella fase di analisi si è entrato nel merito dell'isolamento di edifici esistenti con balle di paglia. Sono stati reperiti 16 casi studio e le informazioni sono state organizzate in schede seguendo l'approccio sistemico attraverso una scomposizione in parti del sistema di isolamento. Questo metodo di analisi è stato utile per comprendere le varie componenti utilizzate nella messa in opera dei

|                    | SOTTOFASE                        | OBIETTIVI  | OPERAZIONI  | INTERLOCUTORI                            | RISULTATI                                       |
|--------------------|----------------------------------|--|---|--|---|
| fase di conoscenza | 1_definizione del tema           | individuazione del problema scientifico  | indagini bibliografica preliminare  | -  | bozza di programma                              |
|                    | 2_verifica del tema              | verifica del tema al di fuori dell'area scientifica                              | verifica con esperti di settore   | tutor e operatori esperti del settore    | programma generale                              |
|                    | 3_stesura del programma          | individuazione degli obiettivi, metodologia e risultati che si vogliono ottenere | bibliografia ragionata organizzata per argomento da sviluppare e bozza indice tesi                                      | tutor e ricercatori del settore          | bozza del piano di lavoro e bozza indice tesi   |
|                    | 4_verifica del programma         | conferma del programma   | confronto con ricerche simili inerenti l'argomento di indagine e approvazione da parte del tutor                        | tutor e operatori di settore             | piano di lavoro                                 |
|                    | 5_costruzione base bibliografica | stato dell'arte della ricerca  | individuazione chiavi di ricerca e fonti; creazione archivio di catalogazione della bibliografia; ricerca bibliografica | tutor, docenti universitari, ricercatori | archivio bibliografico e bibliografia ragionata |

vari elementi del sistema di isolamento. La lettura comparativa dei casi studio è stata finalizzata all'interpretazione e comprensione delle modalità costruttive più ricorrenti nelle varie tipologie di posa in opera. Successivamente, è stata realizzata un'analisi tecnologica in cui sono state effettuate delle considerazioni sull'isolamento in paglia (es. forma edificio, metodi di installazione, fissaggio, ...) scaturite dopo l'esame dei casi studio.

Questa fase è stata suddivisa in 5 sottofasi: costruzione rete interlocutori, costruzione elenco casi studio, organizzazione dei casi studio, analisi dei casi studio e valutazione dei casi studio.

|                 | SOTTOFASE                        | OBIETTIVI   | OPERAZIONI   | INTERLOCUTORI  | RISULTATI   |
|-----------------|----------------------------------|---|--|--|---|
| FASE DI ANALISI | 6_costruzione rete interlocutori | creazione di un elenco di persone per la verifica dell'argomento di ricerca; creazione di conoscenza nel settore di ricerca | ricerca online di professionisti, costruttori che hanno realizzato un isolamento con paglia; ricerca possibili casi studio   | studi di progettazione ed ingegneria, associazioni di categoria, proprietari di case, costruttori        | indirizzario degli interlocutori e creazione lista possibili casi studio                  |
|                 | 7_costruzione elenco casi studio | reperimento informazioni sui casi studio  | contatto diretto con interlocutori per ricevere informazioni, fotografie e disegni inerenti l'intervento di isolamento in paglia   | studi di progettazione ed ingegneria, associazioni di categoria, proprietari di case, costruttori        | documentazione casi studio  |
|                 | 8_organizzazione casi studio     | definizione di un criterio di lettura e organizzazione delle informazioni   | analisi documentazione   | tutor  | organizzazione scheda caso studio   |
|                 | 9_analisi casi studio            | realizzazione quadro di analisi del sistema di isolamento in paglia   | individuazione caratteristiche, difetti e critiche dell'isolamento; schedatura e analisi casi studio   | tutor, studi di progettazione ed ingegneria, associazioni di categoria, proprietari di case, costruttori | repertorio schede casi studio   |
|                 | 10_valutazione casi studio       | esame delle caratteristiche dell'isolamento in paglia   | individuazione delle caratteristiche tecnologiche e fisico termiche da analizzare; utilizzo software per modellazione e valutazione; definizione tavola riassuntiva per comparazione casi studio | tutor, co-tutor, supervisor inglese, ricercatori di settore  | documento sulle caratteristiche dell'isolamento in paglia; tavola riassuntiva casi studio |

- fase di sperimentazione

Nella fase di sperimentazione si è potuto verificare in prima persona la costruzione di un cappotto esterno in paglia su una porzione di edificio esistente e il suo monitoraggio in situ. Il caso studio è stato oggetto di un rilievo architettonico e tecnologico e sono state ipotizzate due soluzioni per la sua realizzazione. Prima della messa in opera sono state effettuate delle prove sull'assemblaggio con legatura delle balle di paglia, sulla loro messa in opera e sulla riduzione dimensionale attraverso il taglio. Questa fase ha permesso di comprendere le possibili difficoltà di realizzazione con un materiale non nato per l'edilizia e verificare in opera il reale comportamento del sistema di isolamento. Attraverso il monitoraggio e la realizzazione di termografie è stato possibile ottenere i risultati dei flussi di calore che attraversavano le pareti (isolata e non) e localizzare i ponti termici creati durante la posa dell'isolamento.

Questa fase è caratterizzata al suo interno da 5 sottofasi: definizione attività di sperimentazione, sviluppo progetto di isolamento esterno in paglia, sviluppo progetto di monitoraggio, costruzione isolamento in paglia, valutazione dei risultati.

|                         | SOTTOFASE  | OBIETTIVI  | OPERAZIONI   | INTERLOCUTORI                        | RISULTATI  |
|-------------------------|--|--|--|--------------------------------------|--|
| FASE DI SPERIMENTAZIONE | 11_definizione attività di sperimentazione           | individuazione caso studio                               | valutazione possibili edifici per la sperimentazione   | tutor, proprietari di casa           | caso studio per sperimentazione  |
|                         | 12_sviluppo progetto di isolamento esterno in paglia | stesura del progetto costruttivo                         | rilievo architettonico e tecnologico del caso studio; redazione di due soluzioni progettuali per l'isolamento; analisi caratteristiche di costruzione dell'isolamento; realizzazione prove con balle di paglia | tutor, impresario edile              | due soluzioni progettuali per l'isolamento in paglia; elenco materiale necessario per la sperimentazione; prove pre costruzione cappotto in paglia |
|                         | 13_sviluppo progetto di monitoraggio                 | stesura del progetto di monitoraggio                     | conteggio sonde necessarie per il monitoraggio; collocazione delle sonde nel progetto di monitoraggio; reperimento sonde   | tutor, co-tutor, esperti del settore | progetto di monitoraggio   |
|                         | 14_costruzione isolamento in paglia                  | realizzazione progetto di sperimentazione e monitoraggio | messa in opera dell'isolamento esterno in paglia; realizzazione finitura superficiale cappotto in paglia; collocazione sonde in opera  | -                                    |  |
|                         | 15_valutazione dei risultati                         | fornire bilancio dei risultati del monitoraggio          | analisi dei dati registrati durante il monitoraggio  | tutor, co-tutor                      | documento sui risultati raggiunti  |

- conclusioni

Nelle conclusioni si è cercato di fornire il bilancio dei risultati raggiunti attraverso la sintesi di percorsi di ricerca e la ricerca applicata. È stata prodotta una raccolta di casi studio realizzati e non di edifici esistenti isolati con la paglia, attualmente non disponibile in alcuna pubblicazione, a cui è stato dato un taglio di lettura prevalentemente costruttivo secondo la scomposizione in parti degli elementi che lo compongono. A partire dai casi studio sono state sintetizzate le caratteristiche e i limiti di questo tipo di isolamento.

I risultati della sperimentazione applicata invece hanno evidenziato che la conduttanza dopo l'intervento di isolamento è diminuita del 60%, il flusso termi-

co attraverso la chiusura si è ridotto del 50% e la temperatura superficiale della chiusura isolata è aumentata di 1.60 ° C.

### 0.3 fonti

Per la particolarità del tema specifico analizzato inerente l'isolamento in paglia non è stato possibile ottenere informazioni su pubblicazioni, ma le indicazioni e la documentazione acquisita derivano principalmente dal contatto diretto con fonti orali. Di seguito vengono riportate le varie fonti utilizzate durante il lavoro di ricerca.

#### 0.3.1 letteratura scientifica

L'analisi della letteratura scientifica consultata è stata prevalentemente caratterizzata da articoli presenti in riviste scientifiche internazionali e atti di convegno. È stata impiegata per comprendere il quadro generale inerente le emissioni in atmosfera di CO<sub>2</sub>, le relative cause e per capire i tipi di interventi di retrofit realizzati. La produzione scientifica, molto vasta su quest'ultimo argomento, è stata ristretta al campo dell'isolamento di edifici esistenti in ambito residenziale esaminando, oltre al caso italiano, il caso inglese. Particolare attenzione è stata rivolta ai dati riportati nella letteratura scientifica derivati da analisi in situ ed eventuali monitoraggi pre e post intervento.

#### 0.3.2 studi su ricerche

L'analisi delle fonti presenti in questa categoria è rappresentata da tesi di dottorato, ricerche nazionali e internazionali inerenti l'impiego di energia nel settore delle costruzioni, il miglioramento dell'efficienza energetica e interventi di isolamento di edifici esistenti. La lettura e analisi delle fonti in modo più approfondito rispetto ad un articolo di rivista ha permesso di comprendere meglio il filo logico delle ricerche e valutare meglio i dati presenti.

#### 0.3.3 fonti normative

Questo tipo di fonti rappresenta una base di partenza per intervenire su un edificio in ambito professionale perché detta i limiti da rispettare in fase di progettazione. Oltre alla normativa europea, italiana ed inglese in ambito energetico sono state analizzate anche norme UNI e ISO per la scomposizione in parti degli edifici e l'organizzazione delle informazioni.

#### 0.3.4 fonti dal web

La consultazione di pagine web di associazioni di categoria di costruttori in paglia è stata di rilevante importanza per ottenere informazioni sull'esistenza e realizzazione di interventi di isolamento di edifici esistenti realizzati con paglia. Le informazioni reperite su internet per quanto riguarda i casi studio sono sempre state verificate attraverso il contatto diretto con le persone attraverso indirizzi mail presenti nei siti o forniti dalle persone interpellate.

### 0.3.5 fonti orali

In questa ricerca l'impiego di fonti orali è stato molto importante per raccogliere informazioni sui casi studio. Attraverso il contatto diretto con costruttori, progettisti e proprietari (spesso anche esecutori) che hanno realizzato un intervento di isolamento in paglia è stato possibile raccogliere le informazioni necessarie per la realizzazione delle schede. Sono state effettuate delle domande per comprendere le fasi di intervento ed è stato richiesto materiale fotografico scattato durante le fasi costruttive in cantiere e eventuali disegni costruttivi.

Altre fonti orali utilizzate sono state la partecipazione a convegni internazionali riguardanti l'impiego di materiali non convenzionali (es. NOCMAT), l'impiego della paglia nelle costruzioni e convegni nazionali sul recupero di edifici esistenti. Anche il colloquio con docenti universitari e professionisti del settore ha permesso di acquisire informazioni relative ad alcuni campi di indagine.

### 0.3.6 documentazione fotografica e di progetto

La consultazione del materiale reperito dal contatto diretto con progettisti, costruttori e proprietari di casa ha permesso di comprendere l'iter costruttivo di questo tipo di isolamento attraverso l'analisi dei disegni costruttivi realizzati e l'osservazione della documentazione fotografica. Non sempre è stato possibile ottenere disegni progettuali (non per difficoltà di concessione ma per mancanza dei medesimi) e in questi casi l'analisi si è basata sulle informazioni fornite e sull'analisi e comprensione delle fasi costruttive presenti nella documentazione fotografica.

## 0.4 metodologia di ricerca

La metodologia di ricerca adottata in questo lavoro si basa sulla interpretazione e valutazione dell'isolamento (esterno ed interno) realizzato con balle di paglia attraverso l'analisi dei casi studio identificati e organizzati secondo una scomposizione in parti degli elementi che lo compongono. I dati ottenuti durante la raccolta delle informazioni sono stati presi come tali e in alcuni casi hanno suscitato delle perplessità date dalle incoerenze di alcune informazioni fornite.

Dopo aver analizzato i casi studio si è visto che dopo l'intervento non è mai stato effettuato un monitoraggio dei consumi e delle temperature post isolamento. Le indicazioni fornite riguardavano sempre il riscontro di un minore consumo di energia, di un maggior comfort interno e in generale di una soddisfazione per l'intervento realizzato seppur non supportato da dati monitorati. Così, si è scelto di realizzare un progetto di isolamento in paglia per comprendere e valutare il comportamento pre e post installazione.