POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali. Quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche.

Original
Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali. Quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche / Baglieri, O., Frisiani, S., Russo, F., Banchini, B., Barzagli, L., Berardi, R., Brillada, V., Capoccia, F., Carpani, C., Catinari, C., Cera, G., Ceribelli, W., Chiola, D., Cicciu, L., Cinquina, A., Cutolo, E., Di Sessa, M., Fantilli, A., Ferrini, M., Ferrotti, G., et al.. - ELETTRONICO. - (2026), pp. 1-118.

Availability:
This version is available at: 11583/3007329 since: 2026-02-04T09:15:20Z

Publisher:
PIARC Associazione Mondiale della Strada

Published
DOI:

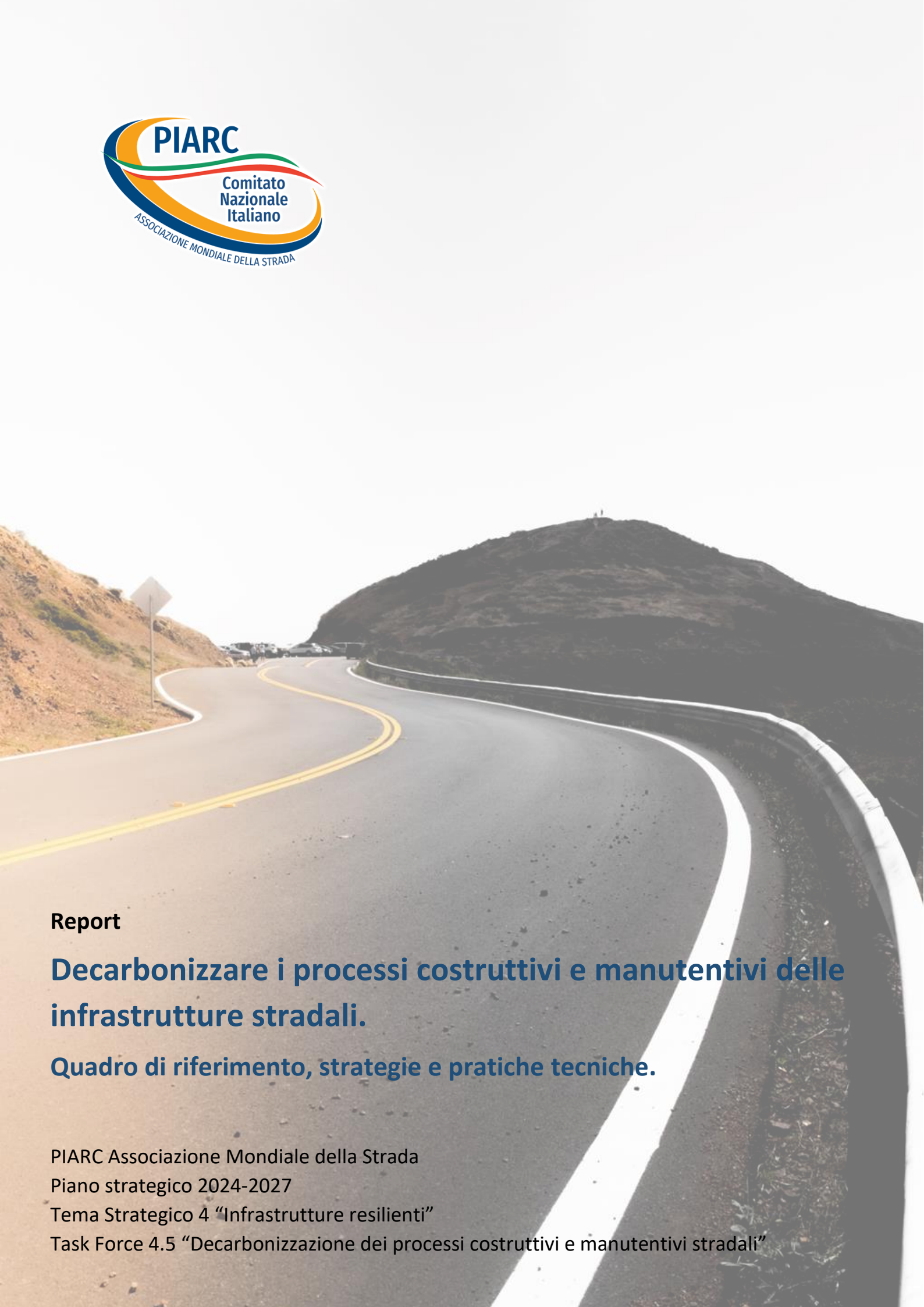
Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

27 November 2026



Report

Decarbonizzare i processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali.

Quadro di riferimento, strategie e pratiche tecniche.

PIARC Associazione Mondiale della Strada
Piano strategico 2024-2027
Tema Strategico 4 “Infrastrutture resilienti”
Task Force 4.5 “Decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali”

PIARC - ASSOCIAZIONE MONDIALE DELLA STRADA

Task Force 4.5

“DECARBONIZZAZIONE DEI PROCESSI COSTRUTTIVI E MANUTENTIVI STRADALI”

CONTRIBUTI AL RAPPORTO TECNICO

Il presente rapporto tecnico è stato redatto sotto gli auspici ed il coordinamento della Task Force 4.5 “Decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali”. La sua pubblicazione è stata possibile grazie al contributo dei seguenti membri ed esperti:

BAGLIERI Orazio (Presidente)	Politecnico di Torino
FRISIANI Sara (Vicepresidente)	Tecne SpA
RUSSO Francesca (Segretaria)	Università di Napoli - Federico II
BANCHINI Barbara	ANAS SpA
BARZAGLI Lorenzo	Autostrade per l'Italia SpA
BERARDI Roberto	Marini Fayat SpA
BRILLADA Vittorio	Brillada Srl
CAPOCCIA Federica	ANAS SpA
CARPANI Carlo	Iterchimica SpA
CATINARI Claudio	ANAS SpA
CERA Giulia	ANAS SpA
CERIBELLI Wainer	A35 Brebemi SpA
CHIOLA Davide	Movyon SpA
CICCIU Lorenzo	A35 Brebemi SpA
CINQUINA Andrea	Autostrade per l'Italia SpA
CUTOLO Emilio	ANAS SpA
DI SESSA Mattia	Politecnico di Torino
FANTILLI Alessandro	Politecnico di Torino
FERRINI Marzio	Amman SpA
FERROTTI Gilda	Università Politecnica delle Marche
GIUNTI Giuseppe	Buzzi Unicem SpA
INGRASSIA Lorenzo Paolo	Università Politecnica delle Marche
MAGNELLI Francesca	Tecne SpA
MASTROVITI Giuseppe	A35 Brebemi SpA
ORETO Cristina	Università di Napoli - Federico II
PADULOSI Sara	ANAS SpA
PAPALE Salvatore	ANAS SpA
PASETTO Marco	Università di Padova
PIERANI Matteo	Tecne SpA
RAMUNNO Massimiliano	AMPLIA SpA
RECINE Matteo Domenico	AMPLIA SpA
RICCI Riccardo	Movyon SpA
RIVIERA Pier Paolo	Politecnico di Torino
SCARAMUCCI Valentina	Università Politecnica delle Marche
SFREGOLA Vincenzo	ANAS SpA
SOGNO Enea	Sina SpA
SPAGNUOLO Simone	Università di Roma Tor Vergata
SPOGLIANTI Dorina	SINA SpA
TESTA Concetta	Autostrade per l'Italia SpA
TOZZO Cristina	Tecne SpA
TSANTILIS Lucia	Politecnico di Torino
VECCHI Francesca	ANAS SpA
VENTURINI Loretta	Iterchimica SpA
VEROPALUMBO Rosa	Università di Napoli - Federico II
VISCIONE Nunzio	Università di Napoli - Federico II

Sommario

PIARC - ASSOCIAZIONE MONDIALE DELLA STRADA 2
Sommario esecutivo 6
Task Force 4.5 Decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali 7
Messaggio del Presidente 8
Introduzione 10
1 Quadro normativo e regolatorio 12
1.1 Riferimenti internazionali 12
1.2 Riferimenti comunitari 15
1.3 Riferimenti nazionali 19
1.4 Policy e piani strategici degli enti gestori 26
2 Progettazione orientata alla sostenibilità e alla decarbonizzazione 29
2.1 Approcci progettuali 29
2.2 Fasi della progettazione 30
2.2.1 Fase di indirizzo 31
2.2.2 Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PTFE) 35
2.2.3 Progetto Esecutivo (PE) 35
2.3 Certificazioni ambientali 38
3 Gestione e controllo 39
3.1 Monitoraggio dell’impatto ambientale 39
3.1.1 Raccolta dei dati 39
3.1.2 Organizzazione dei dati e supporto della digitalizzazione 41
3.2 Monitoraggio delle prestazioni ai fini manutentivi e impatto sulla sostenibilità 42
4 Materiali tradizionali per le costruzioni stradali ed emissioni associate 46
4.1 Conglomerati bituminosi 46
4.1.1 Materiali costituenti 46
4.1.2 Produzione 48
4.1.3 Trasporto e posa in opera 51
4.2 Calcestruzzi 51
4.2.1 Materiali costituenti 51
4.2.2 Produzione e messa in opera 55
4.2.3 Calcestruzzo prefabbricato 57
4.3 Acciai 58
4.3.1 Composizione e impieghi 58
4.3.2 Produzione 59

4.3.3 Lavorazione e trasformazione ... 59
4.4 Terre e materiali granulari ... 60
4.4.1 Terre ... 60
4.4.2 Materiali granulari non legati ... 61
4.4.3 Miscele granulari stabilizzate ... 62
5 Tecnologie per la decarbonizzazione ... 63
5.1 Pavimentazioni ... 63
5.1.1 Bitumi modificati “convenzionali” e ad elevato tenore di polimeri ... 63
5.1.2 Bio-leganti ... 65
5.1.3 Plastiche riciclate nei conglomerati bituminosi ... 66
5.1.4 Conglomerati bituminosi di recupero (RAP) ... 69
5.1.5 Conglomerati tiepidi (WMA) ... 71
5.1.6 Conglomerati a freddo (CMA) ... 73
5.1.7 Conglomerati drenanti contenenti RAP ... 74
5.2 Rilevati ... 74
5.2.1 Stabilizzazione a calce ... 74
5.2.2 Stabilizzazione con materiali innovativi e bio-based ... 76
5.2.3 Materiali riciclati da attività di costruzione e demolizione (CDW) ... 78
5.3 Opere d’arte ... 80
5.3.1 Calcestruzzi a ridotta impronta carbonica ... 80
5.3.2 Materiali compositi in vetroresina per armature (GFRP) ... 83
5.3.3 Riduzione delle emissioni nella produzione dell’acciaio ... 85
6 Impianti e cantieri ... 87
6.1 Strategie per la riduzione delle emissioni in impianto ... 87
6.1.1 Conglomerati bituminosi ... 87
6.1.2 Conglomerati cementizi ... 89
6.2 Mobilità di cantiere ... 89
7 Casi Studio ... 92
7.1 Riqualificazione e messa in sicurezza della S.S. 337 della Val Vigezzo ... 92
7.1.1 Descrizione sintetica del progetto ... 92
7.1.2 Elementi di sostenibilità relativamente alla decarbonizzazione del progetto ... 92
7.1.3 Elementi chiave di sostenibilità relativamente alla decarbonizzazione in fase di gara ... 92
7.2 Studio LCA per la SS 16 “Adriatica” ... 94
7.2.1 Obiettivo dello studio ... 94
7.2.2 La metodologia di analisi e le scelte di base ... 95
7.2.3 Le modalità di calcolo ... 95

7.2.4 I risultati del calcolo 97
7.2.5 Possibili sviluppi futuri 97
7.3 La piattaforma Evolutive-Pavement Management System (E-PMS) e l’indice Environmental Asphalt Rating (EAR) 99
7.4 Innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica sull’autostrada A4 Torino-Milano 101
7.4.1 Contesto e obiettivi 101
7.4.2 Innovazioni Tecnologiche 102
7.4.3 Risultati principali 103
Conclusioni e sviluppi futuri 105
Considerazioni per i Decision Makers 106
Glossario 107
Riferimenti bibliografici 111
Articoli di rivista e atti di conferenza 111
Report tecnici e manuali 116
Standard internazionali 116
Sitografia 117

Sommario esecutivo

La transizione verso infrastrutture stradali a basse emissioni di carbonio rappresenta oggi una priorità strategica per enti gestori, stazioni appaltanti e operatori del settore. L’evoluzione del quadro normativo internazionale, europeo e nazionale, insieme alla crescente attenzione degli stakeholder verso le istanze relative alla mitigazione dei cambiamenti climatici, ha determinato l’integrazione sistematica dei criteri di sostenibilità nei processi decisionali che governano l’intero ciclo di vita delle opere viarie.

Il presente report evidenzia come la riduzione dell’impronta carbonica delle infrastrutture stradali richieda l’adozione di processi, tecnologie e materiali, orientati alla minimizzazione dei consumi energetici, all’ottimizzazione dell’uso delle risorse e all’innalzamento dell’efficienza ambientale. Le fasi di pianificazione e progettazione assumono un ruolo determinante in tale percorso: è in queste fasi preliminari che si concentra il massimo potenziale di riduzione delle emissioni totali nel ciclo di vita, grazie alla possibilità di compiere le scelte strategiche più efficaci inerenti alla configurazione funzionale dell’opera e alle soluzioni tecniche per realizzarla. Tuttavia, gli interventi attuabili nella fase costruttiva o di gestione, pur presentando un potenziale di riduzione inferiore in termini relativi, sono ugualmente in grado di generare benefici significativi in termini assoluti, soprattutto in presenza di lavori a grande scala quali quelli stradali.

Sulla base di tali principi, il report sviluppa un quadro conoscitivo finalizzato a supportare l’elaborazione di strategie di decarbonizzazione applicabili all’intero ciclo di vita dell’infrastruttura stradale.

Il documento copre tre ambiti principali:

- **Strategie per la decarbonizzazione, dal progetto alla gestione -** si analizza il complesso quadro normativo multilivello e si approfondiscono i principi e i metodi della progettazione sostenibile, illustrando le modalità con cui i criteri ambientali vengono integrati nelle diverse fasi progettuali e presentando le strategie di monitoraggio e gestione delle prestazioni ambientali in esercizio.
- **Materiali e tecnologie low carbon -** si presenta, dopo aver esaminato il contributo emissivo dei materiali tradizionali, una mappatura delle soluzioni a ridotta intensità di carbonio, includendo tecnologie consolidate e innovazioni in fase sperimentale, adottabili ai fini del contenimento dell’impronta carbonica dell’opera.
- **Impianti e cantieri -** si approfondiscono le possibili misure per la riduzione delle emissioni generate dagli impianti di produzione e dalle attività di cantiere, includendo strategie per l’ottimizzazione della logistica, dei consumi e dei processi costruttivi.

Il documento si conclude con una serie di casi studio che illustrano esempi concreti di pratiche, soluzioni tecniche e strategie operative già applicate nel settore.

Il report è destinato a un ampio spettro di stakeholder — enti proprietari di strade e amministrazioni pubbliche, concessionarie, progettisti, imprese di costruzione, produttori di materiali e macchine operatrici, gestori di impianti — e si avvale del contributo del mondo accademico, nella convinzione che una collaborazione strutturata tra ricerca e industria costituisca un elemento imprescindibile per il progresso, la qualità e la sostenibilità del patrimonio infrastrutturale del nostro Paese.

Task Force 4.5
Decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali

La Task Force 4.5 del Comitato Nazionale Italiano, in coerenza con le linee guida del Comitato Tecnico Internazionale TC 4.5 “*Decarbonization of Road Construction and Maintenance*”, si è posta l’obiettivo di affrontare alcuni temi strategici connessi al conseguimento della neutralità carbonica nel settore stradale, nel quadro degli obiettivi generali di *Carbon Neutrality* al 2050.

Un’attenzione particolare è stata dedicata all’individuazione dei fattori e dei processi relativi alla costruzione e alla manutenzione stradale che incidono in modo significativo sulle emissioni climalteranti, così da identificare le principali opportunità di mitigazione e formulare strategie di miglioramento che coinvolgano l’intera catena del valore. La decarbonizzazione richiede – infatti – un approccio olistico, capace di considerare le opere nella loro globalità e in ciascuna fase del ciclo di vita.

Gli stadi iniziali del processo, nei quali si determinano le scelte progettuali fondamentali, rappresentano notoriamente i momenti più incisivi in termini di potenziale riduzione delle emissioni complessive. Ciò non esclude, tuttavia, che anche le fasi successive di costruzione e manutenzione conservino margini rilevanti di intervento. In questo, entra prepotentemente in gioco il progresso tecnologico: costruire e manutenere in modo intelligente ed efficiente implica innovare, sperimentare nuovi materiali, sviluppare prodotti e tecniche realizzative più performanti, testare impianti e macchinari più efficienti.

Sulla base di tali premesse, nel primo ciclo di attività 2024–25, la Task Force ha concentrato la sua attenzione su tre principali ambiti di studio:

- progettazione stradale orientata alla decarbonizzazione;
- tecnologie costruttive e manutentive;
- impianti e macchine operatrici.

Il primo ambito riguarda la progettazione orientata alla sostenibilità, principio declinabile attraverso diversi approcci, anche combinati tra loro, che spaziano dall’estensione della vita utile delle opere, alla riduzione dei volumi e delle quantità di materia – anche grazie allo studio di nuove geometrie e forme strutturali – fino alla modularità e alla valorizzazione delle risorse locali.

Il secondo ambito concerne i materiali e le tecnologie a basso impatto, che promuovono la riduzione dei consumi energetici, la circolarità dei prodotti e, non da ultimo, il mantenimento delle prestazioni.

Infine, il terzo ambito si concentra sugli impianti e sul cantiere, componenti importanti nel bilancio emissivo complessivo.

Sebbene questi ambiti non abbiano la stessa rilevanza, ciascuno contribuisce in maniera significativa al raggiungimento degli obiettivi generali e dei target di riduzione, e merita quindi un’attenzione puntuale.

Per la natura dei temi trattati, la Task Force 4.5 presenta una marcata interdisciplinarità, caratterizzata da forti interazioni e sinergie con gli altri Comitati Tecnici afferenti al Tema Strategico 4. Tale impostazione è pienamente coerente con lo spirito PIARC, orientato alla condivisione e alla sistematizzazione dei risultati prodotti dall’intero Comitato Nazionale, a beneficio della collettività.

Il lavoro della Task Force 4.5 si rivolge agli enti proprietari e gestori delle strade, alle società concessionarie, ai progettisti, alle imprese di costruzione, ai produttori di materiali, ai gestori degli impianti di produzione e ai costruttori di macchine operatrici. La sua composizione riflette questa pluralità di stakeholders, ai quali si affianca una significativa rappresentanza del mondo accademico, nella convinzione che solo una collaborazione effettiva tra sistema universitario e sistema produttivo possa garantire un progresso tangibile del settore, a vantaggio della qualità, dell’efficienza e della sostenibilità del patrimonio infrastrutturale del nostro Paese.

Messaggio del Presidente

Gli obiettivi dell’Accordo di Parigi e i target di neutralità carbonica sanciti a livello internazionale, che mirano a contenere l’aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, sono ben noti a tutti. La domanda da cui occorre partire è come il nostro settore si stia posizionando rispetto a tali obiettivi e in che modo possa contribuire in modo concreto al loro conseguimento.

Studi recenti mostrano come le emissioni di CO_2 generate dal comparto delle costruzioni siano raddoppiate negli ultimi trent’anni, e le proiezioni indicano un ulteriore raddoppio entro il 2050. È significativo osservare che, anche nell’ipotesi in cui le emissioni degli altri settori industriali venissero completamente azzerate, nello scenario business-as-usual — ossia continuando a produrre e costruire secondo le prassi attuali — il nostro settore, da solo, sarebbe in grado di consumare una quota considerevole del carbon budget disponibile per rispettare i livelli di temperatura prefissati.

È dunque indispensabile intervenire con determinazione, tempestività ed efficacia.

La decarbonizzazione richiede un approccio olistico, secondo cui l’opera deve essere considerata nel suo complesso e nel suo intero ciclo di vita. Ne deriva la necessità di agire simultaneamente su più fronti, riconducibili a diversi ambiti di intervento, che vanno dall’adozione di soluzioni progettuali sostenibili all’impiego di materiali a basse emissioni, dalla riduzione dei consumi energetici dei processi produttivi all’ottimizzazione dei cantieri e delle tecniche costruttive.

Il tema della decarbonizzazione è stato posto al centro del Piano Strategico 2024-2027 del PIARC - Associazione Mondiale della Strada. In coerenza con gli obiettivi strategici internazionali, all’interno del Comitato Tecnico Nazionale è stata istituita la Task Force 4.5, dedicata alla decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali.

Trattandosi di un tema relativamente nuovo, per il quale non era possibile fare riferimento a esperienze pregresse e consolidate in ambito PIARC, si è ritenuto indispensabile avviare una disamina sistematica della materia, finalizzata a costruire un background solido da cui far discendere strategie e soluzioni operative. I risultati di questo lavoro sono raccolti nel presente report, che sintetizza gli esiti del primo ciclo di attività 2024-2025.

Desidero aggiungere, a quanto riportato nelle varie sezioni del report, alcune ulteriori considerazioni.

La prima mira a evidenziare come la decarbonizzazione, oltre a comportare degli oneri in termini di impegni e risorse, rappresenti anche e soprattutto un’opportunità. Un’opportunità, anzitutto, per innovare: costruire in modo più efficace ed efficiente stimola la ricerca, favorisce lo sviluppo tecnologico e promuove l’innovazione non solo per i prodotti e le tecnologie, ma anche per la gestione dei processi, generando risparmi misurabili pure sul piano emissivo. Gli strumenti digitali, quali ad esempio i modelli informativi parametrici, grazie alla possibilità di integrare informazioni sui materiali impiegati, incluse quelle relative alla loro impronta carbonica, consentono di supportare le analisi LCA e di simulare vari scenari progettuali al fine di ottimizzare le scelte a minor impatto ambientale. Le opportunità riguardano anche i costi: le componenti più emissive sono spesso quelle che incidono maggiormente sul bilancio economico dell’opera, soprattutto a causa dell’elevato fabbisogno energetico. Ridurre le emissioni può dunque tradursi anche in una riduzione dei costi di realizzazione delle nostre infrastrutture.

La seconda considerazione riguarda le sfide rilevanti che la decarbonizzazione si porta dietro, legate al contesto in cui le politiche e le strategie low-carbon devono essere applicate. Sotto questo profilo, il nostro Paese presenta caratteristiche peculiari, tali da rendere l’entità di tali sfide un unicum a livello globale. Il riferimento, ovviamente, va alla complessità del nostro territorio, sia in relazione alla sua morfologia che alla sua vulnerabilità, che si traduce nell’estrema complessità connessa ad ogni attività progettuale e realizzativa. A ciò si aggiunga che il Paese dispone di un patrimonio infrastrutturale in parte incompleto e in parte vetusto, che necessita di essere potenziato e rigenerato, tanto nella rete autostradale quanto nella viabilità ordinaria.

L’ultima considerazione concerne il fatto che, piaccia o meno, il trasporto su gomma continuerà a rappresentare per molti anni la modalità prevalente di movimentazione di persone e merci. Ciò implica la necessità di coniugare le esigenze ambientali con quelle di sviluppo infrastrutturale, consapevoli che il sistema delle infrastrutture è vitale per il funzionamento economico e produttivo del Paese.

Alla luce di quanto sopra, è dunque essenziale lavorare verso una “**decarbonizzazione sostenibile**” e concentrare, in tale direzione, gli sforzi di tutte le componenti del settore.

Concludo ringraziando tutti coloro che hanno contribuito alla redazione di questo documento e PIARC Italia per il prezioso supporto fornito.



Prof. Orazio BAGLIERI

Presidente TF 4.5

“Decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali”

Ordinario di Strade, Ferrovie e Aeroporti

Politecnico di Torino

Introduzione

I principi cardine della sostenibilità ambientale, unitamente agli obiettivi strategici di riduzione delle emissioni climalteranti, rappresentano oggi un asse portante delle politiche aziendali e dei programmi di investimento dei principali enti preposti alla gestione delle infrastrutture stradali. L’evoluzione del quadro normativo sovranazionale e nazionale, nonché la crescente attenzione dell’opinione pubblica e degli stakeholder istituzionali verso la mitigazione dei cambiamenti climatici, hanno infatti determinato una progressiva integrazione dei criteri ambientali nei processi decisionali che regolano l’intero ciclo di vita delle opere.

In tale contesto, le attività di costruzione, adeguamento e manutenzione delle infrastrutture viarie sono sempre più orientate verso l’adozione di tecnologie, metodologie e soluzioni a ridotto impatto emissivo, riconducibili alla più ampia categoria dei processi “low carbon”. Tali processi sono contraddistinti dalla volontà di minimizzare l’impronta carbonica complessiva — diretta e indiretta — associata alla realizzazione e alla gestione delle opere, attraverso interventi mirati a ridurre i consumi energetici, ottimizzare l’uso delle risorse e incrementare l’efficienza ambientale dei materiali impiegati.

Le decisioni maggiormente determinanti ai fini della riduzione delle emissioni sono da individuarsi, come ampiamente riconosciuto dalla letteratura scientifica e dalle best practice internazionali, nelle fasi preliminari del ciclo di vita, ovvero nella pianificazione e nella progettazione. Queste fasi, caratterizzate da un’elevata capacità di orientare gli sviluppi successivi, presentano il più ampio potenziale di mitigazione degli impatti climatici, poiché consentono l’adozione di scelte strutturali, localizzative e funzionali che possono incidere significativamente sulle dinamiche emissive complessive.

Per garantire la massima efficacia delle strategie di decarbonizzazione è utile far riferimento ai modelli di “gerarchia delle mitigazioni”, strumenti concettuali che guidano l’identificazione delle azioni più appropriate alla luce delle condizioni di contesto e del livello decisionale in cui si opera. L’assunto di fondo è che il potenziale di riduzione delle emissioni è strettamente correlato al momento in cui vengono assunte le scelte progettuali e gestionali: sebbene il contributo alla mitigazione debba essere distribuito lungo l’intero ciclo di vita, non tutte le fasi esercitano un’influenza equivalente. Ne consegue che l’impatto di una scelta assunta nelle prime fasi progettuali è, per natura, di ordine di grandezza superiore rispetto a quello di interventi puntuali applicati durante la costruzione o la gestione.

Il modello gerarchico “*Build Nothing – Build Less – Build Clever – Build Efficiently*”, rappresentato schematicamente in **Figura 1**, illustra con chiarezza tale principio. La cosiddetta “opzione zero”, ossia la scelta di non realizzare l’intervento, costituisce la soluzione massimamente efficace, comportando una riduzione delle emissioni pari al 100%. Subito dopo si collocano le strategie di riduzione della portata dell’intervento (“*Build Less*”) e quelle che implicano una revisione qualitativa delle soluzioni progettuali (“*Build Clever*”), mentre gli interventi attuabili nella fase realizzativa o di gestione (“*Build Efficiently*”), pur presentando un potenziale di riduzione inferiore, possono ugualmente generare benefici significativi in termini assoluti, soprattutto in presenza di opere di ampia scala.

Alla luce dei suddetti principi gerarchici, a cui si lega la curva della decarbonizzazione rappresentata nella medesima **Figura 1**, il presente report si propone di fornire un quadro conoscitivo organico e strutturato, volto a definire le basi metodologiche per l’impostazione di strategie di mitigazione applicabili alla progettazione, realizzazione e gestione delle infrastrutture stradali.

Il report è articolato in tre ambiti tematici.

Il primo ambito approfondisce il percorso strategico verso la decarbonizzazione dell’infrastruttura, analizzandone l’intero arco operativo: dalla fase di progetto fino a quella di esercizio e controllo. Dopo una disamina dei riferimenti normativi e tecnici — complessi e multilivello — che governano il settore e che evidenziano l’interazione tra il quadro internazionale, europeo e nazionale, il report esamina i principi della progettazione orientata alla sostenibilità e i diversi approcci metodologici disponibili. Seguono le modalità attraverso cui i criteri di sostenibilità vengono integrati nelle varie fasi dello sviluppo progettuale, in coerenza con la normativa italiana vigente, per poi concludere con le strategie di gestione e monitoraggio delle prestazioni ambientali e funzionali dell’infrastruttura.

Il secondo ambito affronta il tema dei materiali e delle tecnologie, componente primaria dell’impronta carbonica complessiva di un’opera stradale. Dopo la descrizione dei materiali tradizionali e delle rispettive emissioni, il report

analizza le soluzioni a minore intensità di carbonio attualmente disponibili, evidenziando il diverso grado di maturità tecnologica e illustrando anche alcune innovazioni oggi presenti prevalentemente in fase sperimentale.

Il terzo ambito è dedicato agli impianti e ai cantieri, con particolare attenzione sia alle misure per la riduzione delle emissioni generate dagli impianti di produzione dei materiali e di supporto alle attività di cantiere, sia alle strategie per l’ottimizzazione della mobilità interna e per l’efficientamento dei processi costruttivi.

Il report si conclude con una serie di casi studio, selezionati per illustrare esempi concreti di strategie, tecnologie e pratiche operative, che costituiscono un utile riferimento applicativo.

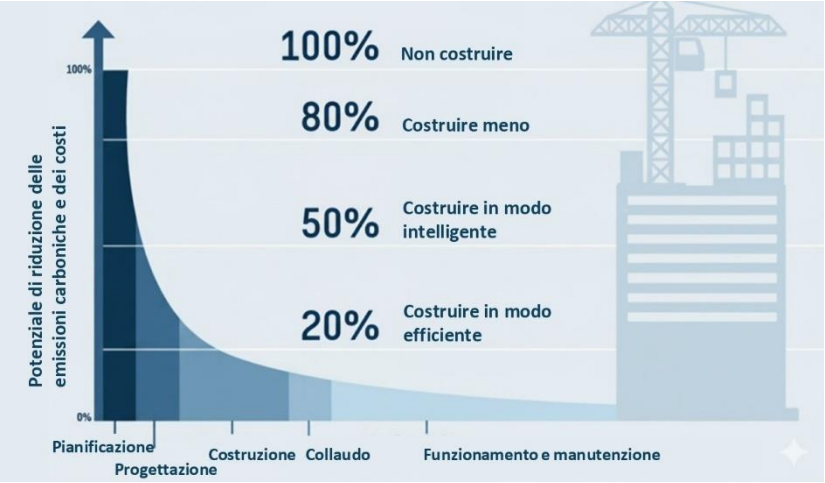


FIGURA 1. APPROCCIO GERARCHICO “BUILD NOTHING – BUILD LESS – BUILD CLEVER – BUILD EFFICIENTLY.

1 Quadro normativo e regolatorio

Ogni possibile soluzione concretamente attuabile per il conseguimento dei target ambientali e di neutralità carbonica va necessariamente valutata alla luce delle attuali disposizioni normative e regolatorie che disciplinano la materia.

Il quadro d'insieme si presenta molto complesso e articolato, composto da direttive, leggi, regolamenti, standard tecnici, linee guida e protocolli emessi a livello internazionale, comunitario e nazionale.

A questi si aggiungono le azioni intraprese da parte degli enti gestori e dei maggiori player che operano nell'ambito delle infrastrutture, le cui policy fungono spesso da riferimento e guida anche per le amministrazioni locali di medie e piccole dimensioni.

Nelle parti che seguono si fornisce una disamina dei principali riferimenti che compongono il quadro d'insieme.

1.1 Riferimenti internazionali

I riferimenti selezionati su scala internazionale comprendono l'Agenda 2030, il protocollo ENVISION, le norme ISO 14064-1 e 14067, le raccomandazioni TNFD (*Task Force on Nature-related Financial Disclosures*), il manuale SBT (*Science-Based Targets*).

La loro descrizione è schematicamente riportata nei punti sottostanti.

- **Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile** – Risoluzione dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite (*Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development – UN Doc. A/RES/70/1*)

  Anno di emissione: 2015

  Scopo: preservare il pianeta, sviluppare l'economia, combattere il cambiamento climatico, coinvolgendo tutti i Paesi del mondo in un impegno comune per la sostenibilità ambientale, economica e sociale.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: l'Agenda 2030 incoraggia politiche di decarbonizzazione attraverso l'uso di energie rinnovabili, innovazione tecnologica, mobilità sostenibile e riduzione delle emissioni in tutti i settori. Con riferimento al settore stradale, l'Agenda 2030 incoraggia lo sviluppo di infrastrutture sostenibili, riducendo l'impatto ambientale dei trasporti e migliorando la sicurezza e l'efficienza della mobilità urbana e interurbana. Le azioni specifiche per le infrastrutture stradali in relazione alla sostenibilità e alla decarbonizzazione sono riconducibili soprattutto ai seguenti Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs).
  - SDG 9: Industria, innovazione e infrastrutture:
    - promuovere infrastrutture resilienti e sostenibili, incoraggiando l'uso di materiali ecocompatibili e tecnologie a basse emissioni;
    - favorire la modernizzazione delle reti di trasporto per ridurre l'impatto ambientale.
  - SDG 11: Città e comunità sostenibili:
    - incentivare la mobilità sostenibile, con investimenti in trasporto pubblico, piste ciclabili e percorsi pedonali;
    - migliorare la sicurezza stradale e l'accessibilità ai trasporti per tutti.
  - SDG 13: Azione per il clima:
    - invitare i governi a ridurre le emissioni di CO_2 nel settore dei trasporti, promuovendo strade intelligenti, elettrificazione dei trasporti e infrastrutture per veicoli a basse emissioni.

- **Protocollo ENVISION**

  Anno di emissione: 2018

  Scopo: migliorare in modo significativo le prestazioni ambientali e la resilienza delle infrastrutture, fornendo una guida per la pianificazione, la progettazione e la realizzazione di infrastrutture sostenibili e resilienti. Agire come guida decisionale, fornendo metriche di sostenibilità per valutare il contributo di un progetto alla sostenibilità in termini sociali, economici e ambientali lungo tutto il suo ciclo di vita. Stabilire uno standard per le infrastrutture sostenibili, incentivando obiettivi di prestazione più elevati e riconoscendo i progetti che danno un contributo significativo alla sostenibilità.

Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il framework include 64 indicatori di sostenibilità e resilienza, chiamati "crediti", organizzati in cinque categorie: 1) Qualità della Vita, 2) Leadership, 3) Allocazione delle Risorse, 4) Mondo Naturale e 5) Clima e Resilienza.

Attraverso il sistema dei crediti e l'applicazione dei principi generali del framework, ENVISION fornisce una struttura per valutare e migliorare le prestazioni di decarbonizzazione nei progetti di infrastrutture stradali durante tutte le fasi che possono interessare le infrastrutture stesse. L'attribuzione dei punteggi e i diversi livelli di achievement sono organizzati in modo tale da incentivare il raggiungimento di prestazioni superiori rispetto allo standard attuale.

Fermo restando che il sistema dei crediti contribuisce alle finalità del protocollo nella sua interezza, si elencano di seguito quelli più rilevanti per gli aspetti specifici legati alla decarbonizzazione.

- *RA1.1 Support Sustainable Procurement Practices*: il credito incoraggia l'adozione di politiche di approvvigionamento che privilegiano fornitori e produttori che si avvalgono di pratiche sostenibili. L'applicazione di tale credito può certamente incentivare alla scelta di materiali ecosostenibili.
- *RA1.2 Use Recycled Materials*: il credito incoraggia l'impiego di materiali riciclati nella costruzione e manutenzione, riducendo la necessità di produrne di nuovi e abbassando così l'impronta di carbonio associata alle attività interessate dall'intervento sottoposto a ENVISION.
- *RA1.4 Reduce Construction Waste*: il credito promuove la riduzione e il riutilizzo dei rifiuti generati durante la costruzione, diminuendo la domanda di nuove risorse e di conseguenza l'energia necessaria per la loro produzione e successivo smaltimento.
- *RA1.5 Balance Earthwork On Site*: il credito premia quei progetti che puntano a minimizzare la movimentazione di terra al di fuori del sito riducendo le emissioni di gas serra legate al trasporto di materiali.
- *RA2.2 Reduce Construction Energy Consumption*: il credito riguarda la riduzione del consumo di energia durante la fase di costruzione dell'intervento. Ciò può essere ottenuto attraverso pratiche efficienti nell'uso dei macchinari, nella logistica negli approvvigionamenti dei materiali e nella scelta di tecnologie a basso consumo energetico.
- *RA2.3 Use Renewable Energy*: il credito promuove l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile per soddisfare le esigenze energetiche operative del progetto, come l'alimentazione dell'illuminazione mediante l'acquisto di energia verde.
- *CR1.1 Reduce Net Embodied Carbon*: il credito si concentra sulla riduzione del carbonio necessario alla produzione nei materiali utilizzati durante la costruzione e manutenzione dell'infrastruttura, considerando l'estrazione delle materie prime, la raffinazione, la produzione e il trasporto. Incoraggia l'uso di materiali locali, l'uso efficiente dei materiali e la scelta di materiali a basso impatto di carbonio.
- *CR1.3 Reduce Air Pollutant Emissions*: il credito mira alla riduzione delle emissioni di inquinanti atmosferici che si coniuga con la riduzione delle emissioni legate ai combustibili fossili utilizzati nei processi di costruzione e manutenzione.

- **UNI EN ISO 14067 –** Specifiche e guida per la quantificazione dei gas ad effetto serra

  Anno di emissione: 2018

  Scopo: specificare i principi, i requisiti e le linee guida per la quantificazione e la comunicazione dell'impronta carbonica di un prodotto (CFP). Fornire un metodo armonizzato per valutare le emissioni di gas serra associate al ciclo di vita di un prodotto, dalla fase di estrazione delle materie prime fino al suo fine vita.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: l'applicazione della norma è diventata fondamentale per quelle attività volte a favorire la decarbonizzazione. Gli aspetti rilevanti riguardano le seguenti attività:

  - valutazione dell'Impronta Carbonica dei Materiali: la norma permette di quantificare l'impronta carbonica di materiali da costruzione chiave come cemento, conglomerato bituminso, acciaio, aggregati, ecc. Questa valutazione, condotta lungo l'intero ciclo di vita (dall'estrazione delle materie prime, alla produzione, al trasporto), fornisce dati cruciali per identificare i materiali a maggiore impatto carbonico e per selezionare alternative a minore impatto ambientale;
  - analisi dei Processi Costruttivi e di Manutenzione: la norma può essere applicata per valutare l'impronta carbonica di diverse fasi dei processi costruttivi (movimentazione terra, posa in opera,

compattazione, ecc.) e delle attività di manutenzione (rifacimento pavimentazioni, riparazioni strutturali, ecc.). Questo permette di identificare le fasi più energivore e con maggiori emissioni di gas serra;
- confronto tra Scenari e Tecnologie: la norma fornisce un quadro metodologico per confrontare l'impronta carbonica di diversi scenari progettuali o l'adozione di nuove tecnologie a basso impatto di carbonio;
- definizione di Obiettivi di Decarbonizzazione e Monitoraggio dei Progressi: la quantificazione dell'impronta carbonica secondo la UNI fornisce una base di riferimento oggettiva per la definizione di obiettivi di riduzione delle emissioni nel settore delle infrastrutture stradali. La previsione di un monitoraggio periodico dell'impronta carbonica dei progetti e delle attività permette di valutare l'efficacia delle misure implementate e di tracciare i progressi verso gli obiettivi di decarbonizzazione.

- **UNI EN ISO 14064-1 –** Specifiche e guida per la rendicontazione dei gas ad effetto serra

  Anno di emissione: 2019

  Scopo: specificare i principi e i requisiti a livello di organizzazione per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas a effetto serra (GES) e delle rimozioni di GES. Stabilire i requisiti per la progettazione, lo sviluppo, la gestione, la rendicontazione e la verifica dell'inventario dei gas a effetto serra di un'organizzazione.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la norma riveste un ruolo cruciale per le organizzazioni che intendono rendicontare e gestire le proprie emissioni di GES in linea con gli obiettivi di neutralità carbonica, offrendo un quadro metodologico solido per misurare, gestire e comunicare le emissioni di gas a effetto serra, supportando attivamente le iniziative volte alla decarbonizzazione del settore. Nello specifico, attraverso l’applicazione della norma è possibile:
  - monitorare i progressi attraverso lo strumento della rendicontazione periodica e di valutare l'efficacia delle misure di mitigazione implementate (ad esempio, l'utilizzo di materiali a basso contenuto di carbonio, l'adozione di tecnologie costruttive più efficienti, la gestione sostenibile dei rifiuti di costruzione e demolizione, l'ottimizzazione della logistica dei trasporti);
  - quantificare l'impronta carbonica;
  - identificare le principali fonti di emissione;
  - stabilire obiettivi di riduzione delle emissioni;
  - comunicare in modo trasparente e credibile;
  - supportare decisioni strategiche;
  - promuovere l'innovazione.

- **Recommendations of the Task Force on Nature-related Financial Disclosures (TNFD)**

  Anno di emissione: 2023

  Scopo: fornire un quadro per l’identificazione, la valutazione e la gestione di questioni legate alla natura, al fine di integrare considerazioni sulla natura all’interno dei processi decisionali e di favorire e promuovere – coerentemente con i contenuti della Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) e di standard internazionali quali l'International Sustainability Standards Board (ISSB), Global Reporting Initiative (GRI), European Sustainalility Reporting (ESRS) – la rendicontazione integrata di indicatori che interessano il clima e la natura.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: le raccomandazioni della TNFD, pur essendo focalizzate sulla natura in senso ampio (includendo biodiversità, ecosistemi e servizi ecosistemici), presentano diverse osservazioni coerenti con le attività volte a favorire la decarbonizzazione dei processi costruttivi e di manutenzione per le infrastrutture stradali. Sebbene il documento non si concentri specificamente sulla decarbonizzazione, l'approccio generale all'identificazione, alla valutazione, alla gestione e alla divulgazione delle dipendenze, degli impatti, dei rischi e delle opportunità legate alla natura può essere applicato in modo sinergico per promuovere pratiche a basse emissioni di carbonio, in linea con gli obiettivi globali di protezione della natura e mitigazione del cambiamento climatico

- **Science-Based Target Setting Manual (SBTi)**

  Anno di emissione: 2020

Scopo: fornire una guida e delle raccomandazioni per la definizione di Science-Based Targets (SBT), ovvero obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) allineati con i percorsi di riduzione necessari per limitare il riscaldamento globale a 1,5°C o al di sotto dei 2°C rispetto alle temperature preindustriali. Coprire le fasi principali della definizione di un SBT, dalla comprensione dei vantaggi aziendali alla comunicazione dei progressi.

Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: sebbene il manuale si concentri sulla definizione di obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) per le aziende in generale, diverse osservazioni e principi in esso contenuti sono coerenti con le attività volte a favorire la decarbonizzazione dei processi costruttivi e di manutenzione delle infrastrutture stradali. I principi generali e le metodologie per la definizione degli SBT possono essere applicati per stabilire obiettivi ambiziosi e misurabili, considerare l'intera catena del valore e monitorare i progressi verso la riduzione delle emissioni di GHG in questo settore. Le aziende e le organizzazioni coinvolte nella costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali possono utilizzare questo manuale come framework di riferimento per sviluppare strategie di decarbonizzazione.

1.2 Riferimenti comunitari

I riferimenti selezionati a livello comunitario comprendono, tra gli altri, il Regolamento sulla Tassonomia UE (Regolamento 2020/852) e i relativi atti delegati, la *Nature Restoration Law* (Regolamento 2024/1991), il Regolamento Delegato (UE) 2023/2486, la *Technical Guidance on the Climateproofing of Infrastructures* (Comunicazione della Commissione 2021/C 373/01), i Principi Europei di Rendicontazione di Sostenibilità (ESRS, Direttiva 2022/2464), il Regolamento Delegato (UE) 2023/2772, il Regolamento (UE) 2021/241 e il Regolamento Europeo sugli Orientamenti dell'Unione per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti (Regolamento 2024/1679).

La loro descrizione è schematicamente riportata nei punti sottostanti.

- **Regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020** - Istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088 (GUUE 22.6.2020)

  Anno di emissione: 2020

  Scopo: informare gli investitori in merito all'ecosostenibilità di un'attività economica, definendo criteri comuni a livello di Unione europea. Contribuire al raggiungimento dei seguenti tre obiettivi del Piano d'azione della CE per finanziare la crescita sostenibile. Riorientare i flussi di capitali verso investimenti sostenibili al fine di realizzare una crescita sostenibile e inclusiva. Gestire i rischi finanziari derivati dai cambiamenti climatici, l'esaurimento delle risorse, il degrado ambientale e le questioni sociali. Promuovere la trasparenza e la visione a lungo termine nelle attività economico-finanziarie.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il regolamento stabilisce i seguenti criteri che devono essere applicati dall'Unione e dagli Stati membri per valutare se un'attività economica possa essere ritenuta ecosostenibile:
  - contribuisce in modo sostanziale a uno o più degli obiettivi ambientali stabiliti nel regolamento;
  - evita di nuocere significativamente a qualsiasi obiettivo ambientale contenuto nel regolamento;
  - viene svolta nel rispetto delle garanzie minime di salvaguardia definite nel regolamento;
  - è conforme ai criteri di vaglio tecnico stabiliti dalla Commissione europea in conformità con il regolamento.

- **Regolamento Delegato UE 2021/2139** che integra il Regolamento UE 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio fissando i criteri di vaglio tecnico che consentono di determinare a quali condizioni si possa considerare che un'attività economica contribuisce in modo sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici o all'adattamento ai cambiamenti climatici e se non arreca un danno significativo a nessun altro obiettivo ambientale

  Anno di emissione: 2021

  Scopo: integra il Regolamento (UE) 2020/852 stabilendo criteri di vaglio tecnico per determinare quando un'attività economica contribuisce in modo sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici, per valutare se tale attività contribuisce all'adattamento ai cambiamenti climatici e per verificare che l'attività non arrechi un danno significativo agli altri obiettivi ambientali previsti dall'articolo 9 del Regolamento 2020/852. Definisce

quali attività economiche possono essere considerate ecosostenibili, facilitando così gli investimenti sostenibili e promuovendo la trasparenza nel mercato finanziario europeo.

Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: come dichiarato dalla Commissione Europea, la Tassonomia UE include i settori che maggiormente possono giocare un ruolo attivo nel raccogliere le sfide poste dai cambiamenti climatici per guidare la transizione ecologica dell'UE, con l'obiettivo finale di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Tra questi settori, il Climate Delegated Act prevede specifiche attività economiche dedicate alla costruzione, ammodernamento, manutenzione e gestione di infrastrutture per il trasporto su strada, ferroviario, navale e aeroportuale (nell'ambito del settore "6. Trasporti") nonché alla costruzione e ristrutturazione di edifici (nell'ambito del settore "7. Edilizia e attività immobiliari"), riconoscendo l'importanza di tali settori per il raggiungimento degli obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici e adattamento ai cambiamenti climatici.

- **Regolamento Delegato (UE) 2023/2486** che integra il regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio, introducendo le definizioni delle attività che contribuiscono agli obiettivi di uso sostenibile e protezione delle acque e delle risorse marine, transizione verso un'economia circolare, prevenzione e riduzione dell'inquinamento, protezione e ripristino della biodiversità e degli ecosistemi e i relativi criteri di vaglio tecnico, e che modifica il regolamento delegato (UE) 2021/2178. – Criteri di vaglio tecnico per determinare le caratteristiche sostenibilità di una attività economica.

  Anno di emissione: 2023

  Scopo: stabilire i criteri di vaglio tecnico per definire a quali condizioni un'attività economica contribuisce in modo sostanziale a specifici obiettivi ambientali: l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine, la transizione verso un'economia circolare, la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento, o la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi. Definisce inoltre i criteri per determinare se un'attività economica non arreca un danno significativo a nessuno degli altri obiettivi ambientali.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il regolamento presenta diverse osservazioni coerenti con le attività volte a favorire la decarbonizzazione dei processi costruttivi e di manutenzione per le infrastrutture stradali e le opere di ingegneria civile che fanno uso di calcestruzzo, in particolare attraverso la promozione della transizione verso un'economia circolare e la prevenzione e riduzione dell'inquinamento. Sebbene non si focalizzi direttamente sulla definizione di obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra, le azioni promosse dal regolamento, come l'uso di materiali riciclati, la gestione efficiente dei rifiuti e la riduzione dell'inquinamento, sono coerenti con la necessità di decarbonizzare il settore delle infrastrutture stradali riducendo l'impronta di carbonio dei materiali, dei processi costruttivi e della manutenzione. L'attenzione alla circolarità dei materiali si allinea con la necessità di considerare le emissioni Scope 3 legate alla produzione e al fine vita dei materiali. Inoltre, il contributo alla decarbonizzazione è trattato nei criteri di DNSH (Do Not Significant Harm) riferiti alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

- **Regolamento (UE) 2024/1991 del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 giugno 2024** – Regolamento sul ripristino della natura – *Nature Restoration Law*

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: stabilire norme destinate a contribuire al recupero a lungo termine e duraturo della biodiversità e della resilienza degli ecosistemi in tutte le zone terrestri e marine degli Stati membri attraverso il ripristino degli ecosistemi degradati, al conseguimento degli obiettivi generali dell'Unione in materia di mitigazione dei cambiamenti climatici, adattamento ai medesimi e neutralità in termini di degrado del suolo. Il regolamento istituisce un quadro nel cui ambito gli Stati membri attuano misure di ripristino efficaci basate sulla superficie allo scopo di coprire congiuntamente, nell'insieme delle zone e degli ecosistemi che rientrano nell'ambito di applicazione del regolamento, almeno il 20 % delle zone terrestri e almeno il 20 % delle zone marine entro il 2030, e tutti gli ecosistemi che necessitano di ripristino entro il 2050.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: sebbene il regolamento si concentri principalmente sul ripristino della natura e della biodiversità, riconosce il legame intrinseco con la mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso la protezione e il miglioramento degli ecosistemi che costituiscono delle naturali fonti di assorbimento di carbonio e la promozione di soluzioni per combattere la crisi climatica basate sulla natura. Gli aspetti relativi alla gestione del suolo, al ripristino delle zone umide e al rapporto con lo sviluppo delle energie

rinnovabili possono essere indirettamente rilevanti per considerare la decarbonizzazione nei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, soprattutto in termini di compensazione delle emissioni.

- **Technical Guidance on the Climateproofing of Infrastructures** – Comunicazione della Commissione n. 2021/C 373/01 “Orientamenti tecnici per infrastrutture a prova di clima nel periodo 2021-2027”

  Anno di emissione: 2021

  Scopo: fornire specifici orientamenti tecnici per gli investimenti in infrastrutture, così come richiesto dal regolamento (UE) 2021/523, includendo indicazioni circa le informazioni da fornire per lo studio dell’impatto ambientale, climatico e sociale delle operazioni di finanziamento e investimento. In sintesi, il documento ha l’obiettivo di fornire un quadro tecnico per garantire che gli investimenti in infrastrutture siano resilienti agli impatti dei cambiamenti climatici e contribuiscano agli obiettivi di mitigazione oltre che a supportare le decisioni di investimento che sono allineate con gli obiettivi climatici dell’UE.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il documento contribuisce alla decarbonizzazione non solo richiedendo la valutazione delle emissioni legate a costruzione e manutenzione (attraverso l'impronta di carbonio), ma anche fornendo un quadro per integrare decisioni strategiche (come la scelta di materiali e tecnologie a basse emissioni o l'efficienza energetica) e operative (come il monitoraggio e le strategie di manutenzione) lungo l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura, in vista degli obiettivi di neutralità climatica a lungo termine dell'UE.

- **Direttiva (UE) 2022/2464** del Parlamento Europeo e del Consiglio del 14 dicembre 2022 che modifica il regolamento (UE) n. 537/2014, la direttiva 2004/109/CE, la direttiva 2006/43/CE e la direttiva 2013/34/UE per quanto riguarda la rendicontazione societaria di sostenibilità

  Anno di emissione: 2022

  Scopo: specificare le informazioni sulla sostenibilità che determinate imprese devono comunicare conformemente alla direttiva 2013/34/UE (ESRS - European Sustainability Reporting Standards). Fornire informazioni necessarie alla comprensione dell'impatto dell'impresa sulle questioni di sostenibilità, nonché del modo in cui tali questioni influiscono sull'andamento, i risultati e la situazione dell'impresa. Definire l'architettura, le convenzioni redazionali, i concetti e gli obblighi generali per la preparazione e la presentazione di tali informazioni.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la direttiva presenta i seguenti elementi rilevanti, che impongono alle imprese di rendicontare su aspetti cruciali per la decarbonizzazione:

  - obblighi generali di informativa sulla sostenibilità: le imprese devono includere informazioni relative a governance (GOV), strategia (SBM) e gestione degli impatti, dei rischi e delle opportunità in relazione a questioni di sostenibilità rilevanti. Ciò include la descrizione di come la strategia e il modello aziendale interagiscono con gli impatti, i rischi e le opportunità rilevanti, comprese le modalità di gestione di tali aspetti;
  - rilevanza e catena del valore: la rendicontazione deve basarsi su una valutazione della rilevanza degli impatti, dei rischi e delle opportunità. Le informazioni devono coprire la catena del valore dell'impresa, sia a monte che a valle. Le imprese devono descrivere fino a che punto la loro valutazione della rilevanza, le politiche, le azioni e gli obiettivi coprono la catena del valore;
  - politiche e piani d’azione: la rendicontazione richiede la comunicazione delle politiche e delle azioni intraprese per affrontare le questioni di sostenibilità rilevanti, inclusa la decarbonizzazione;
  - metriche e obiettivi: la rendicontazione richiede la definizione e la comunicazione di metriche misurabili e obiettivi specifici per monitorare l'efficacia delle politiche e delle azioni intraprese per affrontare le questioni di sostenibilità rilevanti, inclusa la decarbonizzazione;
  - orizzonti temporali: nella definizione di obiettivi, politiche e azioni, le imprese devono considerare orizzonti temporali di breve, medio e lungo periodo.

  In sintesi, gli ESRS forniscono un quadro normativo che obbliga le imprese a rendicontare in modo strutturato e comparabile sul loro approccio e sulle loro performance in materia di sostenibilità, con un focus specifico sugli impatti ambientali, inclusi i cambiamenti climatici, l'inquinamento e l'uso delle risorse, tutti elementi

centrali per la decarbonizzazione nei settori delle infrastrutture stradali. Le imprese attive in questo settore dovranno quindi comunicare le loro politiche, azioni, obiettivi e metriche volti alla riduzione delle emissioni e alla promozione di pratiche sostenibili lungo tutta la loro catena del valore.

- **Regolamento Delegato (UE) 2023/2772** – European Sustainability Reporting Standards (ESRS)

  Anno di emissione: 2023

  Scopo: stabilire i principi di rendicontazione di sostenibilità che le imprese devono utilizzare per effettuare la loro rendicontazione di sostenibilità in conformità degli articoli 19 bis e 29 bis della direttiva 2013/34/UE. Gli ESRS specificano le informazioni sulla sostenibilità che un'impresa deve comunicare.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il regolamento non contiene riferimenti espliciti e dettagliati alla decarbonizzazione delle attività di costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali; tuttavia, i principi e gli obblighi di informativa definiti negli ESRS forniscono un quadro di riferimento per le imprese del settore che desiderano rendicontare e gestire il proprio impatto climatico. L'applicazione di questi standard richiede un'analisi specifica delle attività del settore e l'identificazione delle leve di decarbonizzazione pertinenti lungo la catena del valore, azione chiave per poter pianificare, progettare e operare in ottica di decarbonizzazione dei processi.

- **Regolamento DNSH (UE) 2021/241** – Istituzione Dispositivo per la Ripresa e la Resilienza (RRF - Recovery and Resilience Facility) (GUUE 18.02.2021)

  Anno di emissione: 2021

  Scopo: conciliare crescita economica e tutela dell'ecosistema e garantire che gli investimenti non pregiudichino le risorse ambientali.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il Regolamento fornisce indicazioni finalizzate alla decarbonizzazione nell'ambito del Dispositivo per la Ripresa e la Resilienza. In particolare, stabilisce che almeno il 37% delle risorse assegnate a ciascun Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) debba essere destinato a misure per la transizione ecologica, tra cui:
  - riduzione delle emissioni di gas serra;
  - mobilità sostenibile;
  - economia circolare.

  Inoltre, il Regolamento impone il principio "Do No Significant Harm" (DNSH), che vieta il finanziamento di progetti dannosi per l'ambiente, incentivando così la decarbonizzazione e la transizione verso un'economia più sostenibile.

  Il Regolamento include indicazioni per le infrastrutture stradali e in particolare promuove:
  - mobilità sostenibile: investimenti in trasporti a basse emissioni, come strade connesse a reti di trasporto pubblico e infrastrutture per la mobilità elettrica;
  - rete di ricarica per veicoli elettrici: sviluppo di colonnine lungo le autostrade e nelle aree urbane;
  - efficienza e riduzione delle emissioni: progetti per migliorare la qualità delle strade riducendo impatti ambientali (asfalti innovativi, illuminazione efficiente, riduzione del traffico inquinante);
  - sicurezza stradale: ammodernamento delle infrastrutture per ridurre incidenti e migliorare l'accessibilità.

  Queste misure devono rispettare il principio DNSH, evitando investimenti che aumentino le emissioni di CO_2.

- **Regolamento sugli orientamenti per lo sviluppo di una rete transeuropea dei trasporti (TEN-T)**

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: stabilire gli orientamenti per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti (TEN-T), che include una rete globale, una rete centrale e una rete centrale estesa. Definire corridoi di trasporto europei di importanza strategica e specifica i requisiti per lo sviluppo e l'attuazione dell'infrastruttura TEN-T. L'obiettivo generale è realizzare una rete multimodale e interoperabile di elevata qualità in tutta Europa, nel rispetto degli obiettivi dell'Unione in materia di neutralità climatica e ambiente.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il regolamento promuove la pianificazione, lo sviluppo e la gestione della rete che devono rispettare i requisiti ambientali applicabili e il principio "non arrecare un danno

significativo" (DNSH). I progetti devono essere oggetto di valutazioni ambientali per evitare, mitigare o compensare gli effetti negativi sull'ambiente, come la frammentazione del paesaggio, l'impermeabilizzazione del suolo, l'inquinamento atmosferico, idrico e acustico, e per proteggere la biodiversità. L'infrastruttura stradale, ferroviaria e delle vie navigabili interne deve includere soluzioni per mitigare l'impatto ambientale, inclusa la riduzione del rumore. Quanto sopra deve essere supportato da tecnologie innovative e digitalizzazione a supporto della decarbonizzazione per migliorare l'efficienza energetica, e ridurre le esternalità negative come la congestione, i danni alla salute e ogni tipo di inquinamento.

1.3 Riferimenti nazionali

I riferimenti nazionali comprendono i Criteri Ambientali Minimi (Strade, Illuminazione e Verde Pubblico), Il Nuovo Codice degli Appalti, specifiche Linee Guida, Regolamenti e Position Paper.

La loro descrizione è schematicamente riportata nei punti sottostanti.

- **CAM Strade** (Decreto Ministeriale 5 agosto 2024 e ss.mm.ii.) **–** Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali

  Anno di emissione: 2024 + 2025 (correttivo)

  Scopo: fornire indicazioni per le stazioni appaltanti e stabilire i criteri ambientali minimi per l'affidamento dei servizi di progettazione ed esecuzione dei lavori per la costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali e delle relative opere di pertinenza con l'obiettivo di ridurre gli impatti ambientali generati dai lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali e delle opere di pertinenza stradale per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità in un'ottica di economia circolare.

  Il documento è diviso in due parti distinte, ovvero una prima parte che individua i criteri minimi per l'affidamento del servizio di progettazione delle infrastrutture stradali e una seconda parte che individua i criteri minimi per l'affidamento dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali. All'interno delle due parti, sono specificati sia gli adempimenti obbligatori (clausole contrattuali, specifiche tecniche), sia i criteri premianti, volti a selezionare prodotti/servizi con prestazioni ambientali migliori di quelle richieste dalle specifiche tecniche, ai quali attribuire un punteggio tecnico ai fini dell'aggiudicazione secondo l'offerta al miglior rapporto costi-benefici. I criteri premianti non sono obbligatori ma l'articolo 57 comma 2 del Codice dei contratti (Decreto Legislativo n. 36/2023) prevede che se ne debba tener conto, anche per la definizione dei "criteri di aggiudicazione dell'appalto".

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: il documento impone l'obbligo del raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità attraverso specifiche indicazioni, quali:

  - Individuazione, ove possibile,delle alternative di progetto secondo un approccio LCA (*Life Cycle Assessment*) e LCC (*Life Cycle Cost*);
  - progettazione ed eventuali premialità durante la fase di gara mediante la previsione di un approccio LCA;
  - nell'ambito dello studio LCA dovranno essere considerati almeno i consumi di energia, materia e CO_2 (quest'ultimi elementi necessari al fine di pianificare una più efficiente decarbonizzazione dei processi);
  - la relazione LCA in fase di PFTE (*Progetto di Fattibilità Tecnico Economica*) dovrà includere l'esplicitazione di almeno tre indicatori a scelta tra gli indicatori primari di impatto ambientale, di cui almeno uno deve essere il potenziale di riscaldamento globale (GWP-Total, *Global Warming Potential Total*). Il GWP è una misura dell'impatto sul cambiamento climatico, direttamente collegato alle emissioni di gas serra;
  - nell'ambito delle attività di cantiere dovranno essere adottate delle misure di mitigazione per minimizzare le emissioni di inquinanti e gas climalteranti, con particolare riferimento all'uso di tecnologie a basso impatto ambientale;
  - nell'ambito degli approvvigionamenti, si dovrà fare riferimento allo strumento dell'EPD (*Environmental Product Declaration*) come comprova delle caratteristiche ambientali del materiale, mentre dovranno essere previste delle premialità per quei prodotti da costruzione che rientrano in un

sistema di scambio delle emissioni per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra prevenienti da paesi che adottano sistemi ETS (*Emission Trading System*) o equivalenti.

- **CAM Illuminazione Pubblica** (Decreto Ministeriale 27 settembre 2017 e ss.mm.ii.) **–** Criteri Ambientali Minimi per l'acquisizione di sorgenti luminose per illuminazione pubblica, l'acquisizione di apparecchi per illuminazione pubblica, l'affidamento del servizio di progettazione di impianti per illuminazione pubblica

  Anno di emissione: 2017

  Scopo: definire i criteri ambientali minimi che le Amministrazioni pubbliche sono tenute ad utilizzare per l'acquisizione di sorgenti luminose per illuminazione pubblica, per l'acquisizione di apparecchi per l'illuminazione pubblica e per l'affidamento del servizio di progettazione di impianti per illuminazione pubblica. Integrare le esigenze di sostenibilità ambientale nelle procedure d'acquisto di beni e servizi in questo specifico settore, al fine di ridurre gli impatti ambientali lungo il ciclo di vita dei prodotti e dei servizi. I CAM riguardano sia le specifiche tecniche che le clausole contrattuali da inserire nella documentazione progettuale e di gara, e prevedono anche criteri premianti per la valutazione e l'aggiudicazione delle offerte che presentano soluzioni più sostenibili. Il documento è parte integrante del Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica Amministrazione (PAN GPP) e tiene conto della normativa nazionale ed europea in materia di appalti pubblici e progettazione ecocompatibile.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: l'adozione di questi CAM mira a minimizzare l'impatto ambientale legato alla realizzazione e alla gestione degli impianti di illuminazione pubblica, promuovendo l'efficienza energetica, la riduzione dell'inquinamento luminoso, l'uso di materiali sostenibili e la considerazione degli aspetti ambientali e di biodiversità nelle fasi di progettazione e acquisto.

  In particolare, indica:

  - l'obbligatorietà dell'utilizzo di specifiche tecniche che mirano all'efficienza luminosa di sorgenti e apparecchi. Vengono definiti requisiti minimi di efficienza per diverse tipologie di lampade, incentivando l'uso di tecnologie meno energivore;
  - l'introduzione di criteri premianti che riconoscono e valorizzano offerte con efficienze luminose superiori ai requisiti di base;
  - la definizione di requisiti di prestazione energetica per gli impianti attraverso l'indice IPEI (Indice di Prestazione Energetica dell'Impianto);
  - la promozione dell'adozione di sistemi di regolazione del flusso luminoso e di telecontrollo o telegestione degli impianti;
  - la richiesta di analisi del fabbisogno energetico preliminari e l'indicazione di strumenti come l'analisi TCO (*Total Cost of Ownership*) e LCC;
  - la considerazione dell'inquinamento luminoso come fattore da contenere, con il conseguente effetto indiretto di ridurre il consumo di energia destinata a illuminazioni superflue.

- **CAM Verde Pubblico** (Decreto Ministeriale 10 marzo 2020 e ss.mm.ii.) **–** Criteri Ambientali Minimi per il servizio di gestione del verde pubblico e la fornitura di prodotti per la cura del verde.

  Anno di emissione: 2020

  Scopo: definire i criteri ambientali minimi (CAM) per il servizio di progettazione di nuova area verde o riqualificazione dell'area già esistente. Questo include la selezione di specie vegetali adeguate, soluzioni per ridurre il consumo di risorse e le emissioni di CO_2, arredo urbano sostenibile e migliori pratiche ambientali per la gestione del cantiere e la manutenzione post-realizzazione. Definire i criteri ambientali minimi per il servizio di gestione e manutenzione del verde pubblico. Questo comprende le attività necessarie per la cura e la valorizzazione delle aree verdi esistenti. Definire i criteri ambientali minimi per la fornitura di prodotti per la gestione del verde. Ciò include materiale florovivaistico, prodotti fertilizzanti e impianti di irrigazione che rispettino specifici criteri ambientali.

  L'obiettivo di questi CAM è di contribuire al conseguimento degli obiettivi ambientali previsti dal «Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione», integrando le esigenze di sostenibilità ambientale nelle procedure d'acquisto delle amministrazioni pubbliche. Il decreto mira a incrementare e valorizzare il patrimonio del verde pubblico, riconoscendone i benefici per la salute

umana e l'ambiente, attraverso un approccio sistematico, integrato e innovativo alla gestione del verde. Questa revisione dei CAM tiene conto dell'evoluzione normativa sulla protezione del capitale naturale e sul valore dei servizi ecosistemici, adottando una visione strategica del ruolo del verde pubblico per l'ambiente urbano e la collettività.

Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: alcuni principi e criteri ambientali minimi contenuti all'interno dei CAM Verde Pubblico possono essere estesi e applicati per favorire la decarbonizzazione dei processi di costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali, in particolare per le componenti relative al verde e alle aree adiacenti. I CAM contribuiscono a questo obiettivo attraverso:

- la selezione di specie vegetali autoctone e rustiche, adatte alle condizioni locali e resilienti ai cambiamenti climatici, riducendo la necessità di interventi di manutenzione intensivi e l'uso di risorse idriche e chimiche;
- l'adozione di tecniche di difesa fitosanitaria a basso impatto ambientale, privilegiando la lotta biologica e integrata e limitando l'uso di prodotti chimici solo in casi strettamente necessari;
- l'impiego di prodotti fertilizzanti naturali e ammendanti compostati conformi alla normativa, escludendo l'uso di torbe non rinnovabili;
- la promozione del reimpiego di materiali organici residuali come sfalci e potature attraverso il compostaggio in loco o il cippato "in situ";
- la previsione di piani di gestione e manutenzione basati sul censimento del verde, adottando una "gestione differenziata" in base alle caratteristiche delle aree;
- la considerazione della conservazione e tutela della fauna selvatica nella progettazione e gestione delle aree verdi;
- l'attenzione alla fase di cantiere per preservare la salute delle piante e la fertilità del suolo, promuovendo l'uso di oli lubrificanti biodegradabili;
- la valorizzazione del censimento del verde come importante strumento per la pianificazione e la gestione sostenibile.

- **Linee Guida Operative per la Valutazione delle Opere Pubbliche** (pubblicate dal Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili MIMS nel 2022 in applicazione al Decreto Legislativo n. 228/2011) – Settore Stradale

  Anno di emissione: 2022

  Scopo: fornire precisazioni metodologiche per la valutazione degli investimenti in opere pubbliche nei settori di competenza del MIMS (le "Linee Guida" definite in applicazione del Decreto Legislativo n. 228/2011) e definire gli indicatori relativi ai criteri di selezione delle opere ai fini della pianificazione e della programmazione degli investimenti nel settore dei trasporti e della logistica.

  Il documento è dedicato al settore stradale e descrive puntualmente la metodologia di valutazione da applicare alle potenziali opere oggetto di finanziamento da parte del MIMS, attraverso le principali dimensioni che caratterizzano la sostenibilità di un progetto – economica, ambientale, sociale e di governance – oltre che gli aspetti di natura trasportistica strettamente connessi al settore di riferimento.

  Il documento è strutturato in capitoli volti a fornire indicazioni di metodo per la valutazione e la giustificazione di ciascun progetto in merito ai fabbisogni infrastrutturali e di servizi, alla convenienza economica e alla priorità rispetto ad altre opere pubbliche.

  Per quanto riguarda l'analisi degli investimenti sul piano della sostenibilità ambientale, il documento prende a riferimento il Regolamento UE 2020/852 (c.d. "Regolamento sulla Tassonomia") e il Rapporto Finale del Gruppo Tecnico di Esperti fondamento del Regolamento Delegato sugli obiettivi climatici che è stato adottato dalla CE nel giugno 2021 (in vigore a partire dal 2022). Al tempo stesso, il documento si ispira al regolamento sul Dispositivo europeo di Ripresa e Resilienza (RRF), nonché alla Comunicazione della Commissione europea 1054/2021, che dettaglia la metodologia di applicazione del principio del *Do Not Significant Harm* (DNSH) all'interno del RRF. Infine, le Linee Guida Operative identificano una serie di criteri e dimensioni rilevanti per la definizione del contributo in termini di sostenibilità sociale e di governance dell'opera, in linea con gli standard europei e internazionali.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: per lo screening degli investimenti in opere pubbliche, le linee guida propongono dei criteri di valutazione ambientale, definendo i criteri di premialità ed esclusione sulla base di

una rivisitazione dei criteri di vaglio tecnico per il contributo sostanziale delle attività economiche agli obiettivi ambientali e per l’applicazione del principio DNSH.

- **Revisione del Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC)**

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: Revisionare il PNIEC, tenendo conto degli aggiornati obiettivi europei di decarbonizzazione e della necessità di mantenere la sicurezza e l’adeguatezza del sistema energetico nazionale e delineare strategie e misure per conseguire gli obiettivi di sostenibilità ambientale, sicurezza e accessibilità dei costi dell’energia, promuovendo una transizione giusta.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: Sebbene il documento non tratti in dettaglio la decarbonizzazione specifica delle infrastrutture stradali, i principi generali di riduzione delle emissioni, l'attenzione alla mobilità sostenibile e all'efficienza, e la promozione di appalti verdi sono concetti che possono essere estesi anche a questo settore.

- **Guida operativa per il rispetto del principio del DNSH** – Ragioneria Generale dello Stato (Circolare RGS n. 22/2024)

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: assistere le Amministrazioni preposte alla gestione degli investimenti e delle riforme nel processo di indirizzo, raccolta di informazioni e verifica del rispetto del principio di non arrecare danno significativo all’ambiente (DNSH). Fornire indicazioni sui requisiti tassonomici, sulla normativa corrispondente e sugli elementi utili per documentare il rispetto di tali requisiti.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: ai fini di un report sulla decarbonizzazione nei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, la guida presenta i seguenti elementi rilevanti:

  - verifica ex-ante tramite schede di autovalutazione standardizzate per ogni singola misura, che condizionano il disegno degli investimenti e delle riforme al fine di contenere il potenziale effetto sugli obiettivi ambientali, inclusa la mitigazione dei cambiamenti climatici;
  - importanza di tradurre gli impegni presi in sede di autovalutazione in precise avvertenze e monitoraggio fin dai primi atti fino al collaudo;
  - necessità per le Amministrazioni e i soggetti attuatori di indirizzare gli interventi a monte in modo che siano conformi al DNSH, inserendo richiami e indicazioni specifiche negli atti programmatici e negli avvisi per il finanziamento;
  - adozione di criteri premiali per assicurare una progettazione e realizzazione adeguata degli interventi in linea con il DNSH;
  - raccolta di informazioni necessarie per la rendicontazione di ogni milestone e target nel rispetto delle condizioni DNSH;
  - distinzione tra misure che devono contribuire sostanzialmente al raggiungimento degli obiettivi climatici o ambientali (Regime 1) e quelle che devono assicurare di "non arrecare danno significativo" ad alcuno dei sei obiettivi (Regime 2), implicando diversi livelli di vincoli per la decarbonizzazione;
  - importanza dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) come riferimento per selezionare prodotti, servizi o lavori migliori sotto il profilo ambientale, inclusi quelli relativi alle infrastrutture stradali;
  - necessità di considerare i vincoli DNSH nella fase ante-operam in caso di procedimenti di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) o Valutazione di Impatto Ambientale (VIA);
  - possibilità che le schede tecniche associate a misure con dotazione finanziaria prevedano requisiti da tenere presenti nelle procedure di gara per l'acquisto di beni e servizi, inclusi materiali e tecnologie a basse emissioni per infrastrutture stradali;
  - specifica attenzione ai collegamenti terrestri e all’illuminazione stradale, fornendo vincoli DNSH per la mitigazione del cambiamento climatico, tra cui l'esclusione di infrastrutture adibite al trasporto o stoccaggio di combustibili fossili e la necessità di rendere le infrastrutture "a prova di clima" con calcolo dell'impronta di carbonio;
  - specifica attenzione ai cantieri, fornendo indicazioni per ridurre l'impatto ambientale delle attività di costruzione, che possono essere applicate anche ai cantieri stradali, come l'impiego di mezzi efficienti

e la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione con un obiettivo di preparazione per il riutilizzo o riciclaggio;
- richiesta di garantire che almeno il 70% (in termini di peso) dei rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi siano preparati per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale;
- necessità di redigere un report di analisi dell’adattabilità ai cambiamenti climatici per le infrastrutture, soprattutto per interventi superiori a 10 milioni di euro, che prevede una valutazione della vulnerabilità e del rischio climatico e l'individuazione di misure di adattamento;
- richiesta di rendere a prova di clima le nuove infrastrutture o ristrutturazioni importanti, con un calcolo dell'impronta di carbonio che dimostri che non comportano ulteriori emissioni relative di gas serra.

In sintesi, la guida fornisce un quadro metodologico e operativo per integrare la sostenibilità ambientale, inclusa la mitigazione dei cambiamenti climatici, nei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali attraverso la verifica del principio DNSH, l'applicazione dei CAM e la considerazione della resilienza climatica e della riduzione dell'impronta di carbonio.

- **Linea guida ISPRA** – La sfida ambientale per la finanza sostenibile

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: fornire uno strumento di supporto tecnico ai portatori di interesse (imprese, investitori, banche, autorità di vigilanza) al fine di favorire la produzione dell'informazione ambientale necessaria a soddisfare le esigenze di informativa pubblica introdotte dal nuovo quadro regolatorio in materia di finanza sostenibile (SFDR, CSRD, Tassonomia UE).

  Aspetti rilevanti per la de carbonizzazione: ai fini di un report sulla decarbonizzazione nei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, le linee guida presentano i seguenti elementi rilevanti:
  - fornisce metodologie di quantificazione, metriche e fonti integrative per l'informazione ambientale, a partire da quanto indicato nel Regolamento SFDR (*Sustainable Finance Disclosure Regulation*) e nella Direttiva CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*). Questo include riferimenti per il calcolo delle emissioni di GHG Scope 1, 2 e 3 e dell'impronta di carbonio e introduce indicatori coerenti con il report come quello relativo al consumo totale di energia da fonti non rinnovabili, quello relativo alla gestione dei rifiuti (pericolosi e non pericolosi, recuperati e smaltiti) nonché quello riguardante l'uso e il riciclaggio dell'acqua e l'esposizione a zone a elevato stress idrico;
  - richiama i principi, i requisiti e gli orientamenti forniti dal Protocollo sui gas a effetto serra “*Corporate Standard*” e GRI 305 per la rendicontazione delle emissioni Scope 1. Analogamente, per le emissioni Scope 2 rimanda alla “*GHG Protocol Scope 2 Guidance*” e per le emissioni Scope 3 al “*GHG Protocol Corporate Value Chain*”.

  In sintesi, la linea guida fornisce un quadro concettuale, normativo e metodologico per la rendicontazione ambientale nel contesto della finanza sostenibile, offrendo strumenti e riferimenti utili per misurare e comunicare le emissioni di gas serra, il consumo di energia e altri impatti ambientali rilevanti per i processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali.

- **Vademecum "Analisi rischi climatici nel PNRR"** – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE)

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: fornire indicazioni operative e metodologiche ai Soggetti Attuatori delle misure PNRR del Ministero dell’ambiente e della sicurezza energetica, ai fini dello svolgimento dell’analisi dei rischi climatici fisici ai quali può essere esposto un intervento. Tale analisi è richiesta per garantire la conformità di ogni intervento PNRR al principio DNSH, con particolare riferimento all’obiettivo dell’Adattamento ai cambiamenti climatici. Il vademecum descrive il principio DNSH e gli obiettivi tassonomici, e analizza nel dettaglio l’analisi dei rischi climatici fisici negli interventi PNRR, distinguendo in base all'importo dell'investimento.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: sebbene questo vademecum si concentri principalmente sull'analisi dei rischi climatici fisici e sull'adattamento per i progetti PNRR, il principio trasversale del DNSH che esso mira a garantire include anche l'obiettivo della mitigazione dei cambiamenti climatici e la necessità di evitare

significative emissioni di gas serra. Pertanto, le procedure e le verifiche descritte nel documento forniscono un quadro generale all'interno del quale le considerazioni relative alla decarbonizzazione dei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali devono essere integrate per assicurare la conformità al DNSH.

- **D. Lgs n.125 relativo al recepimento della direttiva (UE) 2022/2464** – Disposizioni in materia di rendicontazione di sostenibilità

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: definire i requisiti per la rendicontazione individuale e consolidata di sostenibilità da includere nella relazione sulla gestione di determinate imprese e gruppi. Ciò include descrizioni del modello aziendale, obiettivi di sostenibilità, ruolo degli organi di amministrazione e controllo, rischi e indicatori pertinenti.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la norma riprende le indicazioni della direttiva UE in merito ad una più dettagliata organizzazione del modello della strategia aziendale che indichi la resilienza ai rischi connessi alle questioni di sostenibilità e le opportunità connesse, nonché dei piani atti a garantire che il modello e la strategia aziendali siano compatibili con la transizione verso un’economia sostenibile. Stabilisce che le informazioni incluse nella rendicontazione devono riferirsi alle prospettive temporali a breve, medio e lungo termine, incentivando una visione di sostenibilità che includa la decarbonizzazione nel tempo.

  In sintesi, la normativa impone alle imprese (potenzialmente incluse quelle operanti nel settore delle infrastrutture stradali) di rendicontare in modo dettagliato le proprie strategie, obiettivi, rischi e azioni in materia di sostenibilità, con un focus specifico sulla compatibilità con la transizione ecologica e la riduzione delle emissioni di gas serra, elementi centrali per il tema della decarbonizzazione.

- **Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici** (Decreto Ministeriale n. 434/2023)

  Anno di emissione: 2023

  Scopo: fornire un quadro di indirizzo nazionale per l'implementazione di azioni finalizzate a ridurre al minimo possibile i rischi derivanti dai cambiamenti climatici, a migliorare la capacità di adattamento dei sistemi socioeconomici e naturali, nonché a trarre vantaggio dalle eventuali opportunità derivanti dalle nuove condizioni climatiche. Costruire un contesto organizzativo ottimale e una governance multilivello e multisettoriale per l'adattamento. Il piano intende porre le basi per una pianificazione di breve e lungo termine per l’adattamento, definendo misure per rafforzare la capacità di adattamento a livello nazionale e sviluppare un contesto organizzativo efficace.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: sebbene il PNACC si concentri principalmente sull'adattamento ai cambiamenti climatici, esso fornisce un contesto rilevante per la decarbonizzazione delle infrastrutture stradali definendo un quadro generale di riferimento orientato alla sostenibilità e alla resilienza, in linea con gli obiettivi europei di neutralità climatica. I principi guida del piano e la futura operatività dell'Osservatorio nazionale potrebbero rappresentare un'opportunità per integrare più esplicitamente la decarbonizzazione nel settore infrastrutturale a livello nazionale.

- **Rapporto della Commissione Finanza per le Infrastrutture e la Mobilità Sostenibili (FIMS)**

  Anno di emissione: 2021

  Scopo: identificare nuovi strumenti e modelli di finanziamento per la realizzazione di interventi infrastrutturali, della mobilità e dell’abitare sostenibile. Proporre schemi innovativi per la selezione, il finanziamento e la realizzazione di progetti infrastrutturali, nonché modelli di valutazione e monitoraggio degli impatti ambientali e sociali, e possibili interventi normativi per favorire una maggiore attenzione alla sostenibilità dei modelli di business. Il rapporto si pone come una guida per il disegno delle politiche pubbliche, nazionali e locali, orientate a dotare il Paese delle infrastrutture necessarie per uno sviluppo equo e sostenibile.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: pur non essendone il focus primario, il Rapporto FIMS fornisce un quadro strategico e degli strumenti di valutazione che supportano indirettamente l'integrazione della decarbonizzazione nei processi di realizzazione e manutenzione delle infrastrutture stradali, attraverso l'enfasi sulla sostenibilità, la valutazione degli impatti ambientali e climatici, la promozione dell'economia circolare e l'allineamento con gli obiettivi europei e nazionali di riduzione delle emissioni.

- **Life Cycle Assessment e la catena del valore delle infrastrutture sostenibili** – Position paper n. 7 dell'Associazione Infrastrutture Sostenibili (AIS)

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: fornire un quadro tecnico e metodologico basato sull'LCA per rendere la sostenibilità nel settore delle infrastrutture più concreta, misurabile, integrata nelle decisioni (specialmente in quelle di appalto) e allineata con gli obiettivi e le normative europee. Definire linee guida per l'utilizzo della LCA e di strumenti correlati, basandosi su norme e metodologie esistenti (come le norme ISO sulla LCA e le EPD, la Tassonomia Europea, il principio DNSH, i protocolli di sostenibilità).

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la sostenibilità delle infrastrutture deve essere misurabile per superare la visione che sia solo un costo aggiuntivo. Lo strumento fondamentale per ottenere questa misurazione quantitativa dell'impatto ambientale è la LCA. Le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD), basate sull'LCA e verificate da terze parti, sono cruciali per fornire dati trasparenti e confrontabili sugli impatti dei materiali chiave (come calcestruzzo, armature, conglomerati bituminosi), evidenziando ad esempio i benefici della circolarità e del riciclo. L'LCA supporta attivamente le decisioni in fase di progettazione e negli appalti sostenibili, permettendo di valutare e scegliere soluzioni a minore impatto ambientale. Vi è una forte sinergia tra l'LCA e i protocolli di sostenibilità (es. Envision) e i criteri della Tassonomia Europea (in particolare il principio DNSH), in quanto l'LCA fornisce i dati quantitativi necessari per dimostrare la conformità. L'applicazione dell'LCA incontra sfide nella disponibilità di dati specifici, ma la digitalizzazione (tramite BIM ed EPD digitali) è un facilitatore chiave per migliorare la raccolta, gestione e utilizzo delle informazioni ambientali.

- **Cantiere sostenibile -** Position Paper n.5 dell'Associazione Infrastrutture Sostenibili (AIS)

  Anno di emissione: 2024

  Scopo: fornire un indirizzo metodologico per la misurazione della sostenibilità di un cantiere. È destinato a stazioni appaltanti, progettisti e imprese. L'obiettivo è promuovere una cultura ampia e qualificata a supporto di un processo di sviluppo infrastrutturale italiano nel segno della sostenibilità. Il vademecum offre uno strumento pratico per applicare una metodologia in grado di costruire un modello per la misurazione di indicatori, obiettivi e strategie, dotandosi di un livello di rating. La creazione di un cantiere sostenibile trova la sua ragion d'essere nella fase progettuale, che pone le basi per identificare e sviluppare gli elementi di sostenibilità dell'opera infrastrutturale. È infatti nella fase di cantiere che si è chiamati a vincere le principali sfide rispetto alle tre dimensioni: ambientale, economica e sociale.

  Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la fase di cantiere è fondamentale per "praticare" concretamente la sostenibilità. Dal punto di vista ambientale, in questa fase si può ridurre al minimo l'impatto sul territorio, puntando, ad esempio, al raggiungimento della *Carbon Neutrality* o alla riduzione della Carbon Footprint.

  Il documento individua 4 obiettivi di sostenibilità che devono essere obbligatoriamente considerati in ogni progetto/cantiere:

  1. contenimento delle emission (direttamente correlato alla decarbonizzazione);
  2. tutela/salvaguardia degli elementi naturali e storici;
  3. riuso e riciclo;
  4. riduzione dell'impatto sulla comunità/ambiente sociale/ambiente esterno.

  Per raggiungere questi obiettivi, vengono identificate 10 strategie. Tra queste, la strategia numero 8 è specificamente dedicata alla Decarbonizzazione e razionalizzazione delle fonti energetiche. Per misurare il perseguimento delle strategie e il raggiungimento degli obiettivi, sono definiti 32 indicatori. Il documento suggerisce l'applicazione di approcci digitali. Alcuni di questi possono supportare gli sforzi di decarbonizzazione, come l'utilizzo di software specifici per le analisi di sostenibilità, ad esempio a supporto della LCA e LCC.

- **UNI/PdR 172:2025 -** Cantiere sostenibile per le opere infrastrutturali – Strategie, indicatori e buone pratiche

  Anno di emissione: 2025

  Scopo: introdurre un sistema di rating per misurare e premiare le performance sostenibili nei cantieri infrastrutturali con l'obiettivo di coniugare e identificare una serie di buone pratiche che, analizzando le principali componenti presenti in un cantiere, possono permettere di implementare la sostenibilità anche in

fase di costruzione. La creazione di un cantiere sostenibile parte però sin dalla fase progettuale, nella quale devono essere poste le basi affinché siano identificati e sviluppati tutti gli elementi di sostenibilità che caratterizzano la fase realizzativa dell’opera. Fornire strategie, indicatori e buone pratiche per valutare e migliorare la sostenibilità dei cantieri, affrontando la necessità di assicurare la sostenibilità delle grandi opere sin dal loro concepimento e di disporre di uno strumento di dialogo con le comunità locali.

Aspetti rilevanti per la decarbonizzazione: la norma mira a ridurre le emissioni di CO2 e altri inquinanti attraverso l'adozione di tecnologie “verdi” e pratiche di gestione efficienti, promuovendo l'economia circolare attraverso il riuso dei materiali e la riduzione dei rifiuti. Incoraggia l'uso di materiali riciclati e valuta l'impatto ambientale dei materiali in termini di emissioni di gas serra.

1.4 Policy e piani strategici degli enti gestori

Le principali aziende e società di gestione di infrastrutture stradali hanno avviato già da tempo politiche di sviluppo e piani strategici per la sostenibilità e la decarbonizzazione della propria rete, a tutela e salvaguardia dell’ambiente. L’attuazione delle policy e delle strategie aziendali e societarie si concretizza, comunemente, in azioni e misure integrate, secondo un approccio sistemico, che coinvolge tutta la catena del valore dei propri asset, dalla progettazione, all’esercizio, fino al fine vita.

È stato ampiamente dimostrato che gli investimenti in chiave sostenibile fatti sulla rete hanno un impatto positivo sull’intero sistema produttivo ed economico del Paese, con effetto moltiplicatore dei benefici e ritorni sia diretti che indiretti. Ciò riguarda le nuove opere, la cui progettazione ispirata fin dalla concezione al principio *Avoid-Shift-Improve* (Evita-Sposta-Migliora) e improntata alle più recenti tecnologie a bassa emissione, consente di realizzare infrastrutture caratterizzate sin dall’origine e per tutto il ciclo di vita da una ridotta impronta carbonica. Gli investimenti in sostenibilità producono ovviamente vantaggi anche, e per certi versi in misura ancora maggiore, sulle infrastrutture esistenti. Basti pensare, a parte gli aspetti legati alla sicurezza stradale, alle minori emissioni dovute al decongestionamento del traffico e alla minore frequenza dei necessari interventi manutentivi da eseguirsi sulla rete.

In tale contesto, si riportano le azioni intraprese da alcuni importanti enti gestori nazionali, evidenziandone, tra le altre cose, l’approccio strategico, gli obiettivi e i progetti chiave (**Tabella 1**, **Tabella 2** e

Tabella 3).

TABELLA 1. POLICY DI ANAS S.P.A.

ANAS S.p.A.	
Approccio Strategico	ANAS integra le politiche di sostenibilità attraverso gli impegni assunti per contribuire a migliorare la qualità della vita e dei territori che le strade attraversano, tramite la realizzazione e lo sviluppo di infrastrutture sicure, capaci di durare nel tempo, resilienti, integrate ed efficienti.
Obiettivi	Garantire una gestione integrata e sempre più sostenibile dell'infrastruttura stradale, minimizzando l'impatto ambientale e promuovendo la salute e la sicurezza degli utenti.
Azioni e progetti chiave	○ Integrazione della sostenibilità nei piani strategici e operativi secondo quanto previsto nei principi della Politica di sostenibilità. ○ Sviluppo di "Smart Roads", infrastrutture tecnologiche innovative a basso impatto ambientale, e "Green Islands" con stazioni di ricarica per veicoli elettrici alimentate da energia rinnovabile. ○ Progettazione integrata attraverso una visione multi disciplinare all’interno di un progetto collaborativo e condiviso che coinvolge tutti gli stakeholder. ○ Utilizzo della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) nella fase di progettazione. ○ Promozione dell'utilizzo di materiali riciclati come aggregati riciclati (RCA) e fresato d'asfalto recuperato (RAP), e valutazione di cementi a basso contenuto di clinker. ○ Promozione di cantieri a basse emissioni con l'uso di macchinari di ultima generazione o alimentati con carburanti alternativi e gestione efficiente dell'energia. ○ Istituzione di un modello di Vendor Rating, nell’ambito delle procedure sottosoglia, creato con la finalità di valutare e monitorare la performance degli operatori sulle Aree di valutazione (congiuntamente con le Società del Gruppo FS) attraverso dei Key Performance Indicator (KPI) specificamente scelti sulla base delle peculiarità della categoria in riferimento. E’ particolarmente rilevante l’area ESG – “Sostenibilità ambientale, Sociale e di Governance” – che, con le sue sottocategorie, ha la finalità di verificare, misurare, controllare e sostenere l’impegno in termini di sostenibilità di una impresa o di una organizzazione. I principali KPI di riferimento sono: la presenza di un piano operativo di sostenibilità che consiste in una strategia su misura dell'azienda, che permetta di raggiungere gli obiettivi prefissati, a livello ambientale ed economico e sociale; il possesso della certificazione UNI EN ISO 14001 relativa ai "Sistemi di gestione ambientale” che rappresenta uno strumento aziendale di gestione degli aspetti ambientali, di conformità legislativa e valutazione dei rischi; il possesso della certificazione EMAS relativa ai "Sistemi di gestione ambientale” che rappresenta uno strumento aziendale per la valutazione delle prestazioni ambientali dell’impresa. ○ Massimizzazione del recupero e del riciclaggio dei rifiuti di costruzione e demolizione. ○ Promozione di tecniche di manutenzione a basso impatto e l'utilizzo di materiali innovativi e durevoli. ○ Riutilizzo del fresato d'asfalto proveniente da interventi di manutenzione.
Focus Specifici	Integrazione della sostenibilità in tutte le fasi (pianificazione, progettazione, esecuzione, manutenzione), innovazione tecnologica per infrastrutture intelligenti e a basso impatto, promozione dell'economia circolare attraverso l'uso di materiali riciclati e tecniche di manutenzione sostenibili
Allineamento a Standard e Framework	Adozione del Protocollo ENVISION, Certificazione UNI EN ISO 14001.

TABELLA 2. POLICY DI AUTOSTRADE PER L'ITALIA (ASPI) S.P.A.

Autostrade per l'Italia (ASPI) S.p.A.	
Approccio Strategico	ASPI ha adottato il protocollo internazionale ENVISION per valutare la sostenibilità delle infrastrutture e ha sviluppato specifiche linee guida per la sua applicazione alle infrastrutture stradali, garantendo una progettazione misurabile e oggettiva in ottica di sostenibilità. I criteri di progettazione sono inoltre allineati ai principi DNSH e della Tassonomia Europea.
Obiettivi	Migliorare i livelli di servizio e ridurre la CO_2, con interventi di adeguamento e ammodernamento volti a estendere la vita dell'infrastruttura e incrementare la resilienza climatica, senza aumentare i km percorribili e le emissioni.
Azioni e progetti chiave	○ Implementazione di Studi di Impatto Ambientale (SIA) per valutare e mitigare gli impatti ambientali dei progetti, con interventi specifici per la tutela della vegetazione, della fauna e del paesaggio. ○ Interventi di inserimento, riqualificazione e recupero ambientale per integrare l'infrastruttura nel territorio e ripristinare le aree di cantiere. ○ Misure per minimizzare l'impatto sulla fauna attraverso la creazione di passaggi dedicati. ○ Capitolati ambientali per la gestione dei rifiuti, degli impatti su aria e acqua, e la tutela della biodiversità nei progetti di ammodernamento.
Focus Specifici	Progettazione sostenibile delle infrastrutture, con particolare riguardo alla mitigazione degli impatti ambientali durante la realizzazione e l'esercizio, e all'integrazione dell'infrastruttura con l'ambiente circostante.
Allineamento a Standard e Framework	Adozione del protocollo ENVISION e allineamento ai criteri DNSH della Tassonomia Europea

TABELLA 3. POLICY DEL GRUPPO ASTM S.P.A.

Gruppo ASTM	
Approccio Strategico	ASTM ha adottato un Modello di Organizzazione, Gestione e Controllo e una Politica Ambientale che definiscono principi e procedure per la tutela ambientale, la riduzione delle emissioni, l'adattamento ai cambiamenti climatici, la tutela della biodiversità, l'uso efficiente delle risorse e la gestione dei rifiuti. Il Gruppo vuole essere protagonista della trasformazione digitale ed ecologica della mobilità, per costruire le infrastrutture del domani innovative, resilienti e sostenibili, impegnandosi a minimizzare progressivamente gli impatti ambientali delle proprie attività operative. I criteri di progettazione sono inoltre allineati ai principi del DNSH e della Tassonomia Europea.
Obiettivi	Obiettivi di riduzione delle emissioni validati da SBTi al 2030 e un percorso di lungo termine verso il Net Zero entro il 2050.
Azioni e progetti chiave	○ Fissazione di obiettivi di riduzione delle emissioni su base scientifica (SBTi), allineati all'Accordo di Parigi e integrati nella strategia finanziaria tramite il Sustainability-Linked Financing Framework. ○ Predisposizione di un Climate Transition Plan in linea con le linee guida CDP e i requisiti CSRD, con obiettivi di riduzione delle emissioni Scope 1, 2 e 3 al 2030 3 al 2050. ○ Iniziative per la riduzione delle emissioni Scope 1 e 2, tra cui il passaggio a combustibili a basso impatto, la sostituzione della flotta con veicoli ecologici, l'efficientamento energetico di infrastrutture e uffici, l'autoproduzione e l'acquisto di energia rinnovabile. ○ Iniziative per la riduzione delle emissioni Scope 3, come il green procurement e il coinvolgimento dei fornitori per promuovere pratiche sostenibili. ○ Adozione di una Linea Guida di pianificazione strategica per allineare le attività ai criteri della Tassonomia UE e del Protocollo Envision.
Focus Specifici	Mitigazione e gestione delle emissioni di GHG, con particolare attenzione all'adattamento ai cambiamenti climatici per la costruzione di infrastrutture resilienti e alla transizione verso l'uso di risorse secondarie e catene di fornitura sostenibili.
Allineamento a Standard e Framework	Allineamento all'Accordo di Parigi, al Programma UNEP, al Green Deal europeo e agli SDGs delle Nazioni Unite. Adozione di obiettivi SBTi e allineamento alla Tassonomia UE e al Protocollo Envision.

2 Progettazione orientata alla sostenibilità e alla decarbonizzazione

La sostenibilità complessiva di una infrastruttura stradale dipende da numerosi elementi, tra loro interconnessi, in cui convergono aspetti ambientali, sociali ed economici. Sotto il profilo ambientale, ad esempio, la realizzazione dell’infrastruttura e la successiva gestione devono essere impostate in modo da ridurre il più possibile le emissioni di carbonio, il volume delle risorse naturali utilizzate e il consumo di energia primaria. Per raggiungere tali obiettivi, è necessario abbandonare i tradizionali metodi di lavoro “lineari” a favore di un approccio circolare che riguardi l’intero ciclo di vita dell’infrastruttura stessa (**Figura 2**).

La progettazione costituisce, in questo contesto, un anello cruciale del ciclo.

La selezione dei prodotti da costruzione, con particolare riguardo ai materiali di provenienza locale, ai materiali ricavati dalla decostruzione e dalla demolizione di strutture esistenti, ai materiali a bassa emissione disponibili sul mercato (come cemento e calcestruzzo innovativi, conglomerati bituminosi di recupero e prodotti riciclati), implicano scelte tecniche che attengono a pieno titolo alla fase progettuale.

Lo stesso dicasi per le scelte inerenti alle tecnologie costruttive (ad esempio lo scavo delle gallerie con Tunnel Boring Machine piuttosto che con metodo tradizionale), che possono giocare un ruolo determinante sulle emissioni carboniche connesse all’intero processo costruttivo dell’opera.

Implementando strategie di progettazione efficienti dal punto di vista energetico (ad esempio, incorporando nelle opere in galleria sistemi avanzati di illuminazione, riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) è altresì possibile ridurre in modo significativo il consumo energetico complessivo dell’infrastruttura durante l’esercizio. Anche il riscorso a fonti di energia rinnovabili, già nelle previsioni progettuali inerenti alla cantierizzazione, può fornire ulteriori importanti contributi ai fini della sostenibilità e alla decarbonizzazione.

Nelle parti che seguono si affrontano i temi sopra delineati tentando di evidenziare le strette connessioni tra gli aspetti della sostenibilità e della decarbonizzazione con l’attività di progettazione, sia in termini tecnici che formali.

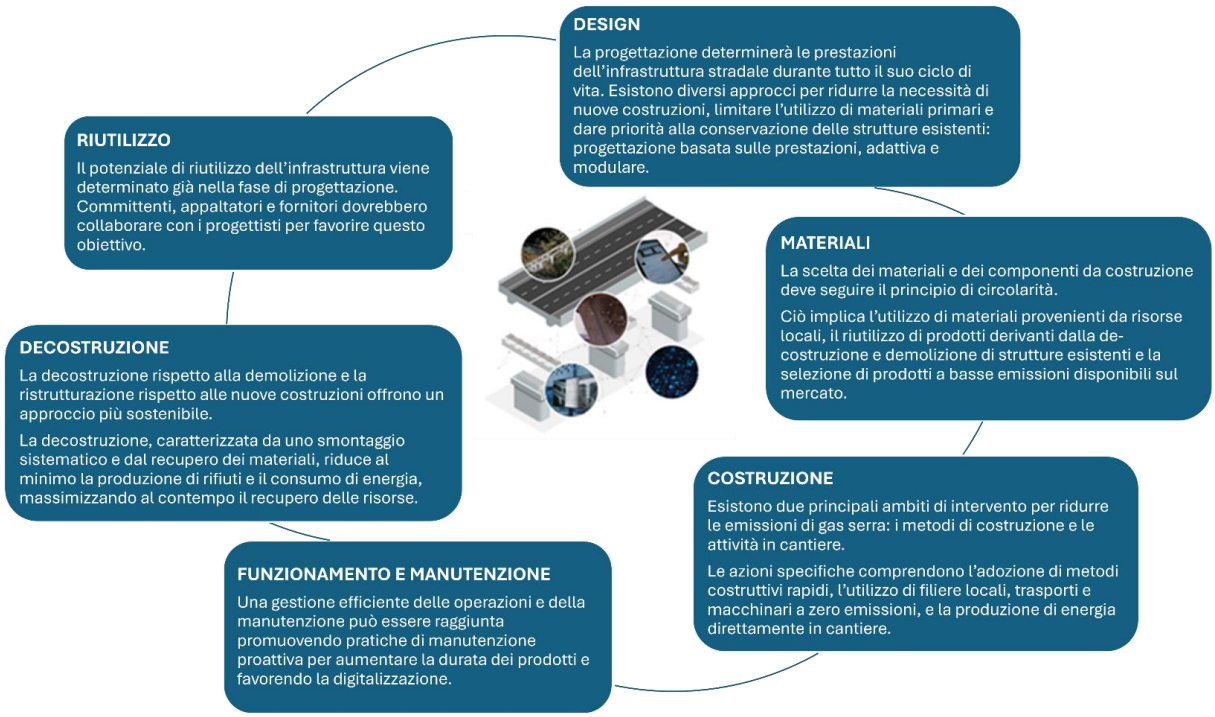


FIGURA 2. APPROCCIO CIRCOLARE PER LA SOSTENIBILITÀ DELLE INFRASTRUTTURE STRADALI.

2.1 Approcci progettuali

Per la progettazione delle infrastrutture orientata alla sostenibilità e alla decarbonizzazione è possibile riferirsi, sotto il profilo metodologico, a diversi approcci riconducibili alle seguenti principali categorie:

- progettazione basata sulle prestazioni;
- progettazione adattiva;
- progettazione modulare;
- progettazione strutturale ottimizzata.

La progettazione basata sulle prestazioni si concentra in modo specifico sull'identificazione delle prestazioni necessarie stabilite in relazione alla tipologia di infrastruttura, integrando le varie funzioni richieste alla stessa infrastruttura, le esigenze di funzionalità e robustezza, la durata e la resistenza alle esposizioni ambientali, nonché il suo potenziale di decarbonizzazione e di circolarità. Nell'ambito di tale approccio, la definizione di una vita utile di lunga durata può assumere grande rilevanza.

La progettazione adattiva si riferisce a un approccio flessibile alla progettazione dei sistemi infrastrutturali, in grado di adattarsi e rispondere a esigenze o condizioni mutevoli nel tempo. Tale approccio progettuale si propone di creare soluzioni in grado di evolversi e adeguarsi a circostanze diverse, come le mutate esigenze degli utenti, l'estensione della vita utile, i progressi tecnologici o i cambiamenti ambientali.

La progettazione modulare si fonda sul principio di suddividere i sistemi costruttivi in moduli e componenti infrastrutturali progettati in modo simile. Un’opera progettata secondo tale approccio è caratterizzata, in linea teorica e pratica, dalla facilità di smontaggio per la modifica, la manutenzione e il riutilizzo dei vari componenti o parti di essi.

La progettazione strutturale ottimizzata è un processo di progettazione delle strutture che massimizza le prestazioni, l'efficienza e la sostenibilità, riducendo al minimo l'uso di materiali, il consumo di energia primaria e i rifiuti.

Indipendentemente dall’approccio seguito, il perseguimento degli obiettivi di sostenibilità nelle pratiche di progettazione di una infrastruttura passa, dunque, attraverso la combinazione di fattori legati alla ottimizzazione delle prestazioni, alla valorizzazione dei materiali, alla selezione delle tecnologie, alla logistica di cantiere e all’efficientamento delle fasi operative.

2.2 Fasi della progettazione

La crescente consapevolezza dell'impatto ambientale del settore delle costruzioni, con particolare riguardo alle opere stradali, trova già da tempo riscontro negli strumenti normativi che regolano, a vari livelli, l’attività di progettazione. Attraverso l'analisi congiunta di questi strumenti è possibile evidenziare sia gli obblighi di legge, sia le opportunità di premialità per le stazioni appaltanti e gli operatori economici che integrano pratiche sostenibili nella realizzazione e manutenzione delle infrastrutture viarie.

In generale, un’infrastruttura può definirsi sostenibile nella misura in cui è in grado di rispondere in maniera adeguata a specifici requisiti di sostenibilità. Nella sostanza, si parla di un sistema progettato, costruito e gestito al fine di minimizzare l’impatto ambientale e massimizzare l’efficienza delle risorse disponibili.

In termini più specifici, un’infrastruttura si definisce sostenibile se:

- riduce le emissioni e il consumo di risorse naturali usando materiali ecologici e fonti di energia rinnovabili;
- favorisce l’inclusione sociale migliorando la qualità di vita delle comunità locali;
- considera il ciclo di vita completo, dalla progettazione alla dismissione, ottimizzando i costi e gli impatti nel lungo termine;
- è resiliente ai cambiamenti climatici adattandosi in modo flessibile alle condizioni ambientali.

Le diverse fasi di progettazione, con la loro natura iterativa, permettono di integrare progressivamente soluzioni tecniche ambientali e di sostenibilità, affinando le scelte progettuali e le strategie operative per minimizzare l'impronta carbonica dell'infrastruttura per la sua fase di costruzione e successiva manutenzione. L'approccio graduale consente di passare da valutazioni preliminari a definizioni sempre più dettagliate, incorporando analisi specifiche e soluzioni innovative orientate alla riduzione delle emissioni.

Gli elaborati progettuali, in ciascun livello di dettaglio, devono attivamente orientare le scelte strategiche e tecniche verso soluzioni a minore impatto ambientale, in linea con il Nuovo Codice degli Appalti Pubblici (D.Lgs. 36/2023), i Criteri Ambientali Minimi (CAM) specifici per le strade, nonché le più ampie regolamentazioni nazionali ed europee in materia di sostenibilità e riduzione delle emissioni citate nei paragrafi precedenti.

Il quadro normativo attuale prevede lo sviluppo e l'approfondimento degli elaborati progettuali secondo l'iter rappresentato in **Figura 3**.

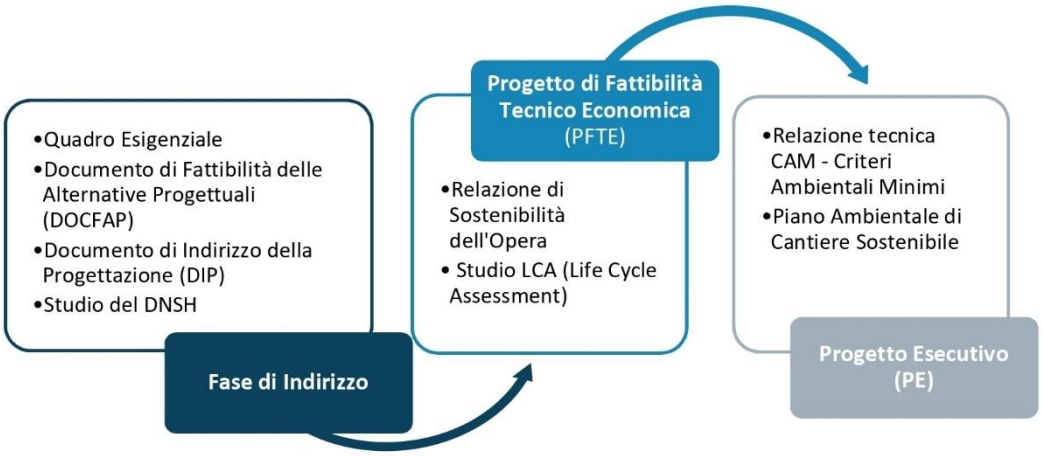


FIGURA 3. FASI PROGETTUALI ED ELABORATI TECNICI RELATIVI ALLA SOSTENIBILITÀ.

2.2.1 Fase di indirizzo

La fase iniziale di indirizzo è fondamentale per orientare le scelte progettuali, fin dalle prime valutazioni, verso le soluzioni a minor impatto. In essa si definiscono gli obiettivi primari del progetto, includendo quelli legati alla decarbonizzazione dell'opera, sebbene ad un livello di dettaglio ancora generale.

Gli elaborati prodotti in questa fase, comprendenti il Quadro Esigenziale, il Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali e il Documento di Indirizzo alla Progettazione, pongono dunque le basi per integrare i requisiti di sostenibilità e di decarbonizzazione nei successivi momenti di sviluppo progettuale. Rientra in questa fase anche lo studio DNSH, volto ad assicurare la conformità del progetto stesso con i principi ambientali europei.

2.2.1.1 Quadro Esigenziale

Il Quadro Esigenziale si caratterizza quale primo strumento di definizione degli obiettivi generali da perseguire nella progettazione dell'opera infrastrutturale e dei fabbisogni quali-quantitativi degli stakeholders coinvolti. Il Nuovo Codice degli appalti (D. Lgs. N.36/2023) stabilisce in modo chiaro quali sono i contenuti del Quadro, schematizzati nella **Figura 4**. In esso, il tema della sostenibilità assume un ruolo centrale con un esplicito richiamo ai principi dell'Agenda 2030. L'integrazione delle esigenze sociali, ambientali ed economiche, passa necessariamente attraverso la progettazione di un'infrastruttura che rispetti il territorio, promuova la transizione ecologica e favorisca la resilienza delle comunità locali.

In termini più specifici, nel Quadro Esigenziale deve essere sviluppata un'attenta analisi delle esigenze con riferimento a:

- reale necessità di realizzare nuove infrastrutture stradali, rispetto alla possibilità di adeguare o riqualificare quelle esistenti;
- possibilità di migliorare la sicurezza stradale e la funzionalità attraverso opere complementari (segnaletica, rallentatori, dissuasori) o mediante una diversa regolamentazione del traffico e il controllo dei limiti di velocità;
- decisione tra adeguare, riqualificare o realizzare nuove infrastrutture tenendo conto delle effettive condizioni di utilizzo, dei relativi costi e risparmi conseguibili, e degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita delle opere.

Gli obiettivi generali da perseguire per ogni intervento devono essere corredati da indicatori chiave di prestazione (KPI). Nel contesto della progettazione infrastrutturale stradale, tali indicatori costituiscono il riferimento fondamentale per

orientare le successive scelte progettuali, assicurando coerenza con le esigenze di mobilità, sostenibilità, sicurezza e funzionalità dell’opera.

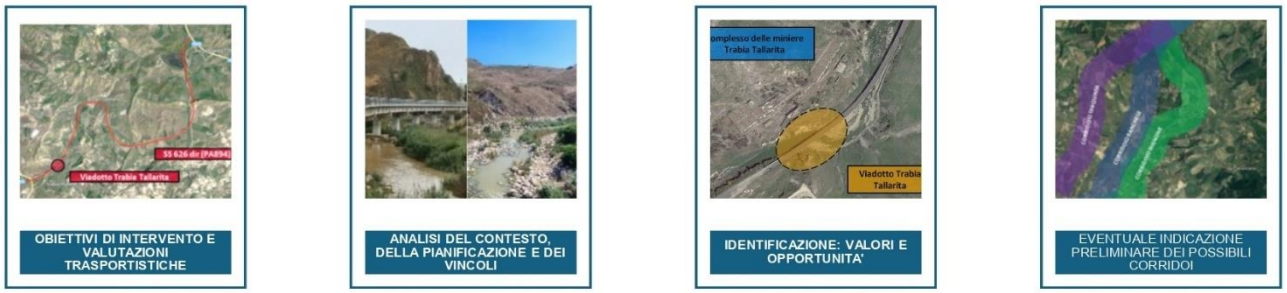


FIGURA 4. SCHEMA DELLE FASI RELATIVE AL QUADRO ESIGENZIALE.

2.2.1.2 Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali (DOCFAP)

Nel DOCFAP trovano definizione gli obiettivi tecnici ed ambientali che le Stazioni Appaltanti intendono perseguire e che derivano dai diversi approfondimenti condotti a livello tematico. Il contesto ambientale in cui si inserisce l’opera costituisce lo scenario di base rispetto a cui parametrare le diverse alternative di progetto. Queste devono essere valutate attraverso metodologie consolidate, basate ad esempio sull’impiego di “matrici di sostenibilità” che consentano, attraverso indicatori quantitativi, di verificare la possibilità di raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile prima definiti.

Alle valutazioni prettamente quantitative si possono poi aggiungere le considerazioni derivanti dall’Analisi Benefici-Costi, nonché da ulteriori approfondimenti di natura qualitativa che non possono essere ricondotti ad un mero elemento numerico. Tale approccio metodologico permette di pervenire ad una scelta ragionata dell’alternativa perseguita, da sviluppare nel successivo Progetto di Fattibilità Tecnico ed Economica (PFTE). Lo schema logico della metodologia di redazione del DOCFAP sopra descritta è rappresentato nella **Figura 5**

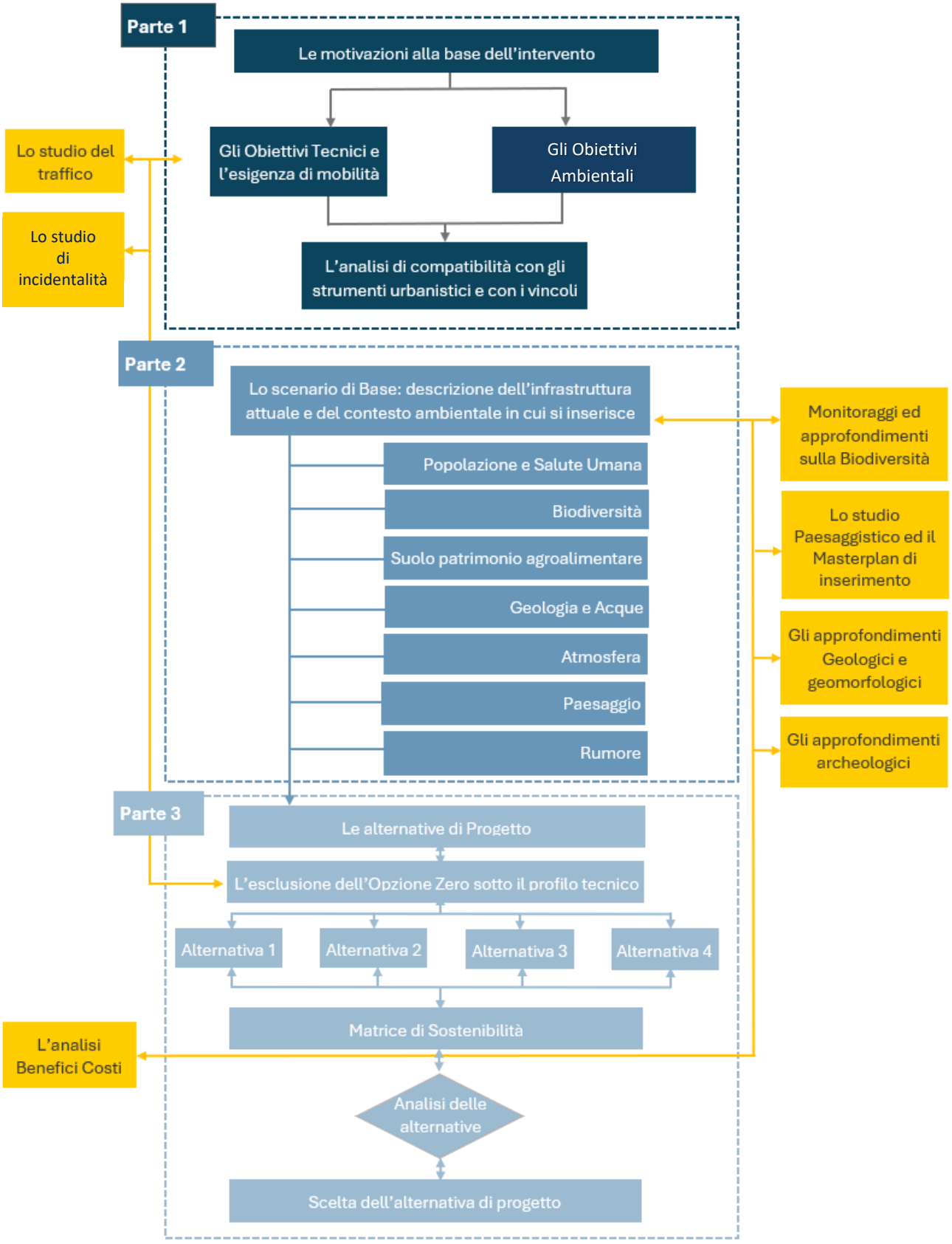


FIGURA 5. FLOW CHART METODOLOGICO DEL DOCFAP.

2.2.1.3 Documento di Indirizzo alla Progettazione (DIP)

Il DIP assume un ruolo cruciale nell'orientare concretamente il progetto verso gli obiettivi di decarbonizzazione. Esso contiene le indicazioni e i requisiti specifici volti a minimizzare la carbon footprint dell'opera, considerando l'intero ciclo di vita della stessa.

Le principali linee di indirizzo che trovano collocazione nel DIP riguardano, in particolare:

- la scelta dei materiali, privilegiando materiali a basso contenuto di carbonio, riciclati o riciclabili, nonché promuovendo l'utilizzo di tecniche costruttive a ridotto impatto ambientale;
- la progettazione geometrica e funzionale, ottimizzando il tracciato stradale per ridurre le movimentazioni di terra, favorendo soluzioni di mobilità sostenibile (piste ciclabili, percorsi pedonali, integrazione con il trasporto pubblico) e prevedendo infrastrutture verdi (es. fasce tampone alberate) per la compensazione delle emissioni;
- l'efficienza energetica, integrando sistemi di illuminazione a basso consumo, prevedendo l'utilizzo di fonti rinnovabili per l'alimentazione di eventuali servizi e infrastrutture connesse, e ottimizzando il drenaggio delle acque meteoriche in ottica di sostenibilità;
- la gestione del cantiere**,** definendo pratiche di gestione ambientale virtuose, minimizzando la produzione di rifiuti, ottimizzando l'uso dei macchinari e promuovendo l'utilizzo di mezzi a basse emissioni;
- la manutenzione, prevedendo strategie di manutenzione preventiva e predittiva per prolungare la vita utile dell'infrastruttura e ridurre la necessità di interventi invasivi e ad alta intensità di carbonio.

2.2.1.4 Studio del DNSH (*Do Not Significant Harm*)

Il Regolamento DNSH (EU) 2021/241 stabilisce i passi che un’attività economica deve compiere per dare un contributo sostanziale al raggiungimento degli obiettivi ambientali.

Il principio DNSH impone che ogni intervento finanziato da fondi europei non arrechi un danno significativo ad alcuno dei sei obiettivi individuati dal Regolamento sulla Tassonomia, ossia:

- mitigazione dei cambiamenti climatici;
- adattamento ai cambiamenti climatici;
- uso sostenibile delle risorse idriche e marine;
- economia circolare;
- prevenzione e riduzione dell’inquinamento;
- protezione della biodiversità e degli ecosistemi.

Per essere considerata sostenibile, un’infrastruttura deve dunque contribuire in modo sostanziale ad almeno uno degli obiettivi tassonomici, senza nel contempo arrecare danno agli altri obiettivi e rispettando altresì criteri tecnici di selezione specifici.

Nella progettazione di una infrastruttura stradale si deve quindi dimostrare e dare prova della non incidenza negativa sugli ambiti rilevanti, integrando criteri ambientali minimi e opportune strategie di mitigazione.

Sono considerate sostenibili quelle attività che:

- contribuiscono significativamente alla mitigazione climatica;
- utilizzano tecnologie e materiali sostenibili;
- promuovono la mobilità a basse emissioni e la riduzione del traffico inquinante;
- rispettano rigorosi criteri tecnici e ambientali stabiliti dalla Commissione Europea.

L’adesione ai principi della Tassonomia consente agli enti appaltanti e ai progettisti di accedere a finanziamenti europei e certificare l’allineamento agli standard ESG (*Environmental, Social, Governance*)..

2.2.2 Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PTFE)

La fase di sviluppo del PTFE rappresenta il momento in cui vengono declinate in modo puntuale le indicazioni del DIP, individuando le specifiche soluzioni tecniche e scelte costruttive in chiave *low carbon*. Sotto tale profilo, l’elaborato più importante che attiene a questa fase progettuale è la Relazione di Sostenibilità.

La Relazione di sostenibilità costituisce un documento del progetto, redatto allo scopo di esplicitare e motivare le scelte adottate in relazione agli aspetti ambientali, sociali ed economici dell'intervento infrastrutturale.

La Relazione riveste un ruolo fondamentale per una progettazione efficace e orientata alla decarbonizzazione delle infrastrutture stradali, ciò in ragione di diversi aspetti:

- **Visione Olistica –** permette di adottare una prospettiva che considera tra loro interconnessi gli aspetti ambientali (inclusa la decarbonizzazione), sociali ed economici. Questo approccio integrato è cruciale per identificare soluzioni progettuali che siano non solo tecnicamente valide ed economicamente sostenibili, ma anche rispettose dell'ambiente e del benessere sociale delle comunità interessate.
- **Motivazione delle Scelte Progettuali –** la tracciabilità e la motivazione delle scelte operate in termini di materiali, tecnologie costruttive, gestione delle risorse, misure di mitigazione degli impatti ambientali e strategie per la riduzione delle emissioni di gas serra rendono il processo decisionale più trasparente e giustificabile.
- **Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) –** la valutazione del ciclo di vita o *Life Cycle Assessment* (LCA) dell'infrastruttura, eventualmente inclusa nella relazione, fornisce una quantificazione degli impatti ambientali complessivi, compresa l'impronta carbonica. Questo permette di identificare le fasi con il maggiore potenziale di riduzione delle emissioni e di orientare di conseguenza le scelte progettuali.
- **Comunicazione e Stakeholder Engagement –** la relazione può costituire uno strumento efficace per comunicare agli stakeholder (cittadini, amministrazioni, imprese) l'impegno del progetto verso la sostenibilità e la decarbonizzazione, aumentando la trasparenza e la fiducia.
- **Monitoraggio e Valutazione Post-Opera –** i KPI ambientali e di sostenibilità possono essere utilizzati per monitorare l'efficacia delle soluzioni adottate durante la fase di costruzione e, soprattutto, durante l'esercizio e la manutenzione dell'infrastruttura, fornendo un feedback prezioso per futuri progetti.

La Relazione di Sostenibilità non è pertanto da intendersi come un mero adempimento burocratico, ma un elemento strategico per una progettazione efficace e responsabile. La redazione del documento deve assicurare, infatti, che la decarbonizzazione e la sostenibilità siano integrate nell’opera fin dal suo concepimento, guidando le scelte tecniche lungo tutto l’iter progettuale e contribuendo a realizzare infrastrutture più resilienti, efficienti e con un impatto ambientale minimizzato nell’intero ciclo di vita.

2.2.3 Progetto Esecutivo (PE)

La fase di progettazione esecutiva rappresenta il momento in cui vengono finalizzati gli elementi del progetto, attraverso l’aggiornamento dettagliato degli elaborati sviluppati nelle precedenti fasi, l’adozione di specifici Capitolati Speciale d'Appalto e la redazione della Relazione Tecnica CAM. Nell’ambito dell’aggiornamento degli elaborati di progetto, assume importanza strategica anche il Piano di Cantierizzazione, ai fini dei processi a favore della decarbonizzazione delle infrastrutture.

2.2.3.1 Relazione tecnica CAM

La redazione della relazione tecnica CAM è un processo iterativo che accompagna l'intero percorso progettuale. Detto processo inizia in forma preliminare nel Quadro Esigenziale, si sviluppa nell'analisi delle alternative, si concretizza negli indirizzi progettuali, si dettaglia nel PFTE e si finalizza nel PE come documento di riferimento per la realizzazione e la verifica della conformità ambientale dell'opera. La Relazione Tecnica sui CAM è fondamentale ai fini di una progettazione efficace e orientata alla decarbonizzazione per i seguenti motivi:

- **Applicazione concreta dei CAM –** Impone al progettista la traduzione di quelli che sono i principi generali dei CAM in azioni concrete e verificabili all'interno del progetto. Non è sufficiente dichiarare l'intenzione di

rispettare i CAM, ma è necessario specificare come ciò avverrà in ogni fase (progettazione, materiali, costruzione, manutenzione).

- **Guida Progettuale –** La necessità di redigere la relazione fin dalle prime fasi progettuali guida attivamente le scelte tecniche. Sapere che si dovrà dimostrare la conformità ai CAM influenza la selezione dei materiali a basso impatto ambientale, l'adozione di tecniche costruttive sostenibili, la pianificazione della gestione dei rifiuti e le strategie per l'efficienza energetica.
- **Focus sulla Decarbonizzazione –** i CAM Strade includono specifici criteri orientati alla riduzione delle emissioni di gas serra e al contenimento del consumo di risorse. La relazione tecnica diventa quindi il luogo in cui si esplicitano le soluzioni adottate per la decarbonizzazione, come l'uso di conglomerati bituminosi a basse emissioni, la massimizzazione del riciclo di materiali, l'ottimizzazione dei trasporti e l'adozione di illuminazione efficiente.
- **Verificabilità e Trasparenza –** la relazione fornisce un documento di riferimento chiaro e dettagliato per la stazione appaltante, la Direzione Lavori e gli organi di controllo per verificare la conformità del progetto e dell'esecuzione ai requisiti ambientali. Questo garantisce trasparenza e accountability.
- **Monitoraggio e Valutazione –** La relazione può costituire la base per definire gli indicatori di performance ambientale da monitorare durante la fase di costruzione e manutenzione, consentendo di valutare l'efficacia delle misure adottate e di apprendere per futuri progetti.

2.2.3.2 Piano di cantierizzazione

La sostenibilità nei cantieri rappresenta un principio cardine che orienta l'intera pianificazione di un progetto infrastrutturale. Le scelte progettuali attinenti alle diverse discipline confluiscono necessariamente nel Piano di Cantierizzazione, il quale definisce le modalità operative, la tempistica e la sostenibilità del progetto stesso, considerandone le dimensioni sociali, ambientali ed economiche. Il Piano di Cantierizzazione si configura quindi come il vero e proprio elaborato dedicato alla gestione delle fasi e delle attività di costruzione dell'infrastruttura e costituisce una garanzia di sostenibilità quando implementa pratiche e tecnologie finalizzate alla riduzione dell'impatto ambientale e del consumo di materie prime. Lo sviluppo del Piano si articola in molteplici aspetti, quali:

- **Ottimizzazione della logistica di cantiere –** Riguarda le diverse attività connesse al cantiere, dalla pianificazione degli spazi alla gestione dei materiali e delle attrezzature. Una buona logistica tende a minimizzare gli spostamenti all'interno del cantiere e verso il territorio, scegliendo percorsi più brevi e/o lontani da centri abitati o da ricettori sensibili. Il piano della mobilità di cantiere è uno degli studi cardine della cantierizzazione assieme a tutta la logistica.
- **Utilizzo sistemi volti a mitigare gli impatti indotti dalle attività di costruzione –** Le strategie e le soluzioni da adottare per la minimizzazione degli impatti ambientali durante la fase costruttiva sono contenute in un elaborato progettuale di tipo tecnico-operativo denominato Piano Ambientale della Cantierizzazione Sostenibile (PACS). Il PACS basa le proprie valutazioni sui dati e sulle informazioni contenute negli studi ed elaborati del progetto, con particolare riferimento al piano di cantierizzazione. Da esso devono essere estrapolate le informazioni relative a:
  - dimensione e localizzazione delle aree e viabilità di cantiere;
  - organizzazione delle attività lungo l'intero sviluppo del tracciato e all'interno dei cantieri fissi;
  - programmazione delle attività;
  - se previsti, localizzazione, distribuzione e orientamento degli impianti di lavorazione (ad esempio, a titolo indicativo: impianto di frantumazione e vaglio; impianto di betonaggio; impianto di depurazione acque; impianto di produzione/stoccaggio/recupero di fanghi polimerici);
  - caratteristiche dei macchinari e dei mezzi impiegati (preferendo mezzi d'opera di alta efficienza motoristica (euro 6 o Standard Europeo Tier 5);
  - modalità, tecniche e particolari costruttivi per la realizzazione delle opere d'arte.

  Le valutazioni del PACS devono essere articolate per componente ambientale, individuando per ciascuna di esse le lavorazioni che possono risultare interferenti e le specifiche soluzioni adottate per il contenimento e minimizzazione degli impatti. Le soluzioni adottate devono essere tecnicamente compatibili con le opere da

realizzare, conformemente alle prescrizioni delle norme di settore. È quindi necessaria la preliminare valutazione delle caratteristiche specifiche del sito e delle lavorazioni da eseguire, quali ad esempio: livello e gradiente della falda; permeabilità e gradiente idraulico locale; litologie; presenza e caratterizzazione di ricettori, antropici e non; fisionomia e composizione delle unità vegetazionali; valore agronomico; tipo di sostanze/materiali utilizzati; etc. Le valutazioni devono essere circoscritte alle componenti ambientali interferite, tenendo conto della sensibilità del territorio attraversato e delle specificità del progetto. Le componenti oggetto di valutazione nel PAC, a titolo meramente indicativo, sono da individuare tra:

1. rumore;
2. vibrazioni;
3. aria e clima;
4. popolazione e salute umana;
5. suolo;
6. acque superficiali e sotterranee;
7. biodiversità;
8. paesaggio e patrimonio culturale e beni materiali;
9. territorio e patrimonio agroalimentare.

Fatti salvi gli adempimenti normativi, sono previste nel PACS tutte le misure per il contenimento degli impatti ambientali stimati. Tali misure consistono in interventi di tipo passivo ed attivo, nonché in procedure gestionali che prevedono il coinvolgimento dell’intero personale di cantiere.

- **Riduzione del consumo energetico in fase di costruzione** – Sulla base delle informazioni di progetto relative all’organizzazione del cantiere base (layout), il Progettista deve dimensionare il fabbisogno di energia necessario per alimentare i servizi generici individuati all’interno dello stesso (uffici, mensa, eventuali dormitori, illuminazione esterna, ecc.) e prevedere il soddisfacimento del fabbisogno energetico mediante l’impiego di fonti energetiche rinnovabili certificate e produzione di energia alternativa (es. installazione di moduli fotovoltaici sulle coperture dei baraccamenti e/o coperture dei parcheggi dei mezzi di servizio).
- **Gestione sostenibile delle acque di cantiere –** Devono definirsi i criteri e i metodi di analisi e valutazione del consumo di risorse impiegate volte all’adozione di sistemi per il riutilizzo delle acque di cantiere. A valle della valutazione dei volumi recuperati si valuta la definizione della carbon footprint legata alla gestione delle acque e il risparmio di CO_2 derivante dal recupero della risorsa. Tale informazione concorrerà alla definizione complessiva della CO_2 risparmiata per l’attribuzione delle scelte sostenibili effettuate.
- **Gestione dei materiali da costruzione (materiale da demolizione e terre e rocce da scavo)** – L’obiettivo è di aumentare il riutilizzo interno e la capacità di soddisfacimento del fabbisogno mediante il materiale prodotto in cantiere. In aggiunta al recupero di materia come elemento di sostenibilità, si valuta quanto le pratiche di riutilizzo concorrano al contenimento delle emissioni di CO_2 e alla definizione della carbon footprint. La quantificazione di CO_2 attribuita agli approvvigionamenti tiene conto dei contributi delle emissioni derivanti dalla produzione dei materiali e dai trasporti dal sito di produzione al cantiere, utilizzando fattori di emissione riconducibili a ciascuna delle suddette attività. Nel calcolo della CO_2 risparmiata è valutata l’incidenza della riduzione dei movimenti di materie conseguente alla riduzione degli approvvigionamenti e alla riduzione dei conferimenti esterni del materiale prodotto in esubero rispetto ai fabbisogni di progetto. Nel caso di riutilizzi, previ trattamenti conformi alla normale pratica industriale, sono altresì valutate le emissioni di CO_2.

2.3 Certificazioni ambientali

Per la realizzazione di infrastrutture stradali, le certificazioni ambientali giocano un ruolo chiave anche ai fini del monitoraggio e della misurazione della sostenibilità. I sistemi di certificazione indipendenti attestano le prestazioni ambientali di un'opera, incentivando l'adozione di pratiche virtuose, e rappresentano un motore fondamentale per la transizione verso infrastrutture viarie a ridotto impatto ambientale.

Tra le certificazioni più rilevanti a livello internazionale si annoverano, con specifico focus sulla progettazione delle infrastrutture, il Protocollo ENVISION ed il Protocollo BREEAM Infrastructure.

Il Protocollo ENVISION, già richiamato al paragrafo 1.1, è un sistema di rating per la valutazione della sostenibilità delle infrastrutture grazie alla sua griglia di criteri, adattabile a qualunque progetto e in grado di orientare concretamente le scelte tecniche con un riferimento diretto anche allo sviluppo sostenibile delle attività di cantiere. Sotto il profilo dell’efficacia dell’investimento, del rispetto dell’ecosistema, del rischio climatico e ambientale, della durabilità, della leadership e del miglioramento della qualità della vita, ENVISION guarda in modo olistico allo sviluppo dell’infrastruttura e alla sua sostenibilità a lungo termine.
Attraverso il Protocollo ENVISION è possibile progettare e realizzare infrastrutture basandosi sulla misurazione oggettiva dei vantaggi che il progetto stesso ha nei confronti della comunità, delle capacità gestionali e manutentive durante tutta la sua vita utile, nonché sull’opportunità di compartecipazione tra capitali pubblici e capitali privati. Obiettivo del protocollo è quello di fornire uno strumento da utilizzare per la misurazione dei parametri di sostenibilità di un progetto, attraverso un percorso di autovalutazione (self-assessment) che può proseguire con la registrazione del progetto, la sua valutazione, la verifica ad opera di un Organismo di Terza Parte indipendente e, infine, la certificazione.

Anche il Protocollo BREEAM Infrastructure rappresenta un sistema di rating strutturato per la valutazione della sostenibilità delle infrastrutture. Attraverso una dettagliata griglia di criteri, il protocollo si adatta in modo flessibile a diverse tipologie di progetti, fornendo un supporto concreto alle decisioni tecniche con un riferimento diretto ai principi dello sviluppo sostenibile applicabili alle attività di cantiere.
Considerando aspetti cruciali quali l'efficacia dell'investimento, il rispetto dell'ambiente e della biodiversità, la resilienza ai cambiamenti climatici, la durabilità nel tempo, la leadership di progetto e il miglioramento della qualità della vita delle comunità, BREEAM Infrastructure adotta una prospettiva olistica sullo sviluppo infrastrutturale e sulla sua sostenibilità a lungo termine. L'applicazione di BREEAM Infrastructure consente di impostare la progettazione e la realizzazione di infrastrutture su una misurazione oggettiva dei benefici che il progetto genera per la società, dell'efficienza nella gestione e manutenzione durante l'intero ciclo di vita, nonché delle opportunità di collaborazione tra finanziamenti pubblici e privati.

Tali metodologie consentono di impostare la progettazione secondo un’ottica di concreta ed effettiva sostenibilità delle infrastrutture poiché legata direttamente alle reali attività di esecuzione delle singole opere e alla loro manutenzione. La scelta “ragionata” dei singoli criteri di valutazione – e la conseguente attribuzione dei punteggi – consente inoltre di collegare le scelte progettuali direttamente alla vita utile dell’infrastruttura.

3 Gestione e controllo

3.1 Monitoraggio dell’impatto ambientale

Per attuare una qualsiasi strategia di decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi stradali, un requisito preliminare ma fondamentale è quello di monitorare e tenere traccia del maggior numero possibile di dati relativi all’impatto ambientale associato ai suddetti processi.

Tale monitoraggio degli impatti deve essere svolto sia nella realizzazione di una nuova infrastruttura stradale sia nel caso di attività manutentive e/o di ampliamento di infrastrutture esistenti. Come noto, sia la nuova costruzione che la manutenzione di un’infrastruttura stradale sono fasi del ciclo di vita di un’opera stradale molto rilevanti dal punto di vista dell’impatto ambientale generato, addirittura comparabili tra loro. Pertanto, durante qualsiasi tipo di lavorazione svolta, l’onere di ogni gestore è quello di raccogliere tutte le informazioni utili a valutare gli impatti generati e, sulla base della loro analisi, di ricercare delle strategie per ottimizzare i processi e ridurre tale impatto.

Si potrebbe pensare che tutte le informazioni relative alla infrastruttura siano desumibili dalla documentazione di progetto, ma questo non è sempre possibile. Prima di tutto perché non sempre tutte le indicazioni di progetto possono essere rispettate in fase di realizzazione dell’opera stessa in quanto risulta spesso necessario apportare variazioni in corso d'opera che possono riguardare ad esempio il cronoprogramma dei lavori oppure alcuni aspetti costruttivi dell’opera stessa. In secondo luogo, la documentazione di progetto potrebbe non riportare completamente le informazioni relative ai materiali, alle tecnologie, agli impianti e ai mezzi di cantiere utilizzati, o almeno non in maniera sistematica e organizzata. Tali informazioni, ove presenti, potrebbero essere distribuite in più documenti separati che risultano, a volte, difficilmente correlabili tra loro. Questa dispersione riguarda ovviamente anche le informazioni relative alle prestazioni ambientali delle singole componenti sopra elencate, utili a determinare gli impatti ambientali correlati.

Pertanto, monitorare costantemente il processo realizzativo dell’opera e tracciare nel modo più rigoroso, organizzato e funzionale possibile le attività svolte e le caratteristiche dell’opera realizzata è di fondamentale importanza. I dati raccolti, opportunamente organizzati, possono essere interrogati e analizzati al fine di quantificare correttamente gli impatti associati a ciascuna lavorazione e, dunque, individuare con un approccio data-driven quelli su cui agire prioritariamente per massimizzare i benefici. Avendo a disposizione dati oggettivi e di tipo quantitativo, risulta inoltre possibile giustificare scelte strategiche come, ad esempio, l’investimento nell’acquisto di nuove attrezzature ad emissioni ridotte, provvisti di certificazioni di conformità rispetto ai requisiti delle normative più recenti.

Fatta questa premessa, i due paragrafi seguenti hanno lo scopo di raccogliere in forma sintetica e pronta all’uso esempi di buona prassi relativi alla tipologia di dati da monitorare durante le attività realizzative e alle modalità per un’efficiente organizzazione degli stessi.

3.1.1 Raccolta dei dati

Per quanto riguarda i dati da raccogliere ai fini della stima e del monitoraggio dell’impatto ambientale associato a un’opera infrastrutturale, è necessario soffermarsi sulle fasi principali della vita utile dell’opera stessa.

- Progettazione - relativamente a questa fase, devono essere raccolti sia i dati direttamente correlati all’impatto ambientale dei materiali e delle tecnologie realizzative adottate sia i dati di carattere prestazionale degli stessi. Progettare la sostenibilità è un concetto che sottintende un bilanciamento tra il contenimento dell’impatto ambientale e le prestazioni attese dall’opera nel corso della sua vita utile. I dati di impatto ambientale sono dunque complementari ai dati prestazionali che hanno effetti indiretti ma non trascurabili sulla sostenibilità. Al fine di garantire la disponibilità di questi dati a livello progettuale, uno strumento di fondamentale importanza è rappresentato dai capitolati tecnici delle stazioni appaltanti, che possono imporre e garantire la completezza e l’uniformità di tutte queste informazioni anche attraverso l’utilizzo dell’Intelligenza Artificiale e le Piattaforme di Gestione Dati.
- Offerte tecniche e affidamento dei lavori - anche per questa fase è fondamentale enfatizzare quanto sia importante che le stazioni appaltanti inseriscano, nei capitolati e nella documentazione di gara, dei criteri premiali per incentivare l’adozione di materiali e processi produttivi performanti ma anche sostenibili, quali ad

esempio materie prime a ridotto impatto ambientale e macchinari ad emissioni ridotte. È fondamentale che tali criteri siano formulati chiaramente e inequivocabilmente, facendo riferimento a metodi di certificazione ambientale standardizzati e ufficialmente riconosciuti, come ad esempio l'EPD. Questa prassi, oltre a risultare un forte incentivo per le imprese a selezionare prodotti e processi di qualità e a ridotto impatto ambientale, contribuisce anche a rendere più disponibili i dati necessari alla valutazione ambientale complessiva dell'opera.

- Realizzazione - in questa fase, l'azione fondamentale da svolgere è il monitoraggio costante e quanto più possibile dettagliato del processo realizzativo, a partire dalla prequalifica e accettazione dei materiali, passando per la raccolta di tutti i dati di impatto ambientale, fino alla loro elaborazione per la stima dell'impatto effettivo, anche ai fini di una verifica di quest'ultimo rispetto all'impatto previsto da progetto. Il monitoraggio degli impatti ambientali in fase di esecuzione, infatti, deve anche assolvere alla necessità di accertare che quanto realizzato sia compatibile con quanto offerto anche in termini di sostenibilità, e non solo in termini prestazionali. Esempi di strumenti digitali a sostegno di questa fase operativa sono le Piattaforme di Monitoraggio e Gestione del Cantiere in Tempo Reale, i Sistemi di Gestione della Flotta, la previsione dell'utilizzo di Sensori e Sistemi IoT (Internet of Things) per il Monitoraggio dei Materiali in cantiere o per mezzo dell'utilizzo di Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR) per la Supervisione del cantiere da remoto.
- Manutenzione - per questa fase, valgono le stesse considerazioni riportate per la fase di realizzazione, senza nessuna eccezione o deroga. È fondamentale ribadire che il monitoraggio ambientale svolto nelle fasi manutentive deve garantire lo stesso livello di informazione di quello svolto in fase di nuova realizzazione, proprio perché, come già messo precedentemente in evidenza, l'impatto delle fasi manutentive è comparabile con quello delle fasi costruttive. Esempi di strumenti da cui è possibile attingere sono: i Sistemi di Monitoraggio Strutturale Continuo (SHM) con Intelligenza Artificiale mediante l'installazione di sensori integrati nell'infrastruttura, l'utilizzo di Droni e Sistemi di Ispezione Robotizzati nonché la previsione di Piattaforme di Gestione della Manutenzione (EAM) e Sistemi GIS.

TABELLA 4. ESEMPIO DI DATI UTILI ALLA STIMA E AL MONITORAGGIO DELL'IMPATTO AMBIENTALE DI UN'OPERA.

Ambito	Oggetto del monitoraggio	Dati da raccogliere e loro fonti
Materiali	Identificazione univoca del materiale, mediante opportuna documentazione tecnica	Dichiarazione di prestazione (DoP) e marcatura CE, schede tecniche dei materiali
	Documentazione relativa agli impatti ambientali legati alla produzione di una specifica quantità del materiale	Certificazione EPD
	Sito di produzione e/o stoccaggio dei materiali	Distanza per il trasporto del materiale all'area di cantiere
	Informazioni di carattere prestazionale	Dichiarazione di prestazione (DoP) e marcatura CE, schede tecniche dei materiali
Tecnologie realizzative e macchinari	Identificazione e caratteristiche dei mezzi impiegati per il trasporto dei materiali dal sito di produzione all'area di cantiere	Marca, modello, anno di produzione, tipo di carburante, dati di consumo dichiarati dal produttore
	Identificazione e caratteristiche dei mezzi impiegati in area di cantiere per la movimentazione dei materiali e per lo svolgimento di lavorazioni (es. macchine escavatrici, macchine fresatrici, etc.)	Marca, modello, anno di produzione, tipo di carburante, dati di consumo di carburante dichiarati dal produttore
	Dati effettivi di utilizzo dei macchinari	Ore di utilizzo in cantiere dei singoli macchinari, distanze percorse dai singoli macchinari, all'interno dell'area di cantiere e al suo esterno, per attività da ricondursi alla realizzazione dell'opera, consumi effettivi di carburante dei macchinari impiegati in cantiere
	Informazioni di carattere prestazionale	Documentazione a supporto della caratterizzazione delle prestazioni dell'opera finita associate alla tecnologia realizzativa
Area di cantiere	Dati di consumo degli impianti di cantiere	Ore di attività e dati di consumo degli impianti di illuminazione, consumi degli impianti per la generazione di energia (es. gruppi elettrogeni), consumi d'acqua relativi agli impianti idrici di cantiere, emissioni di inquinanti in atmosfera in corrispondenza dei camini

Nella **Tabella 4** sopra riportata, si elencano sinteticamente alcuni dei principali esempi di dati di interesse e delle relative fonti, ai fini della stima e del monitoraggio dell’impatto ambientale di un’opera infrastrutturale.

3.1.2 Organizzazione dei dati e supporto della digitalizzazione

Al fine di garantire la fruibilità e un’interpretazione coerente dei dati raccolti, è importante riportarli in un database unificato. Per ciascuna voce di impatto ambientale è necessario riportare tutti gli attributi significativi, come ad esempio gli standard e le normative di riferimento, le eventuali ipotesi rispetto a cui esse sono valutate, ed esplicitare per ciascuna delle quantità riportate le relative unità di misura. Solo mediante questi accorgimenti è possibile abilitare una valutazione e un confronto significativi dei dati raccolti, sulla base del quale definire una concreta strategia di miglioramento.

La scelta dell’architettura e degli strumenti implementativi del database è a discrezione del gestore dell’infrastruttura. Le evoluzioni tecnologiche e digitali stanno mettendo a disposizione metodi sempre più avanzati e intelligenti per questo tipo di operazioni. Basti pensare alle piattaforme BIM, che consentono non solo una rappresentazione tridimensionale delle opere ma anche la raccolta di innumerevoli informazioni relative all’opera e alle sue componenti.

La modellazione dell’ambiente costruito attraverso il BIM per la gestione degli asset è una strategia evoluta e in rapida diffusione, adottata già oggi soprattutto per quanto riguarda i cicli di sorveglianza e il monitoraggio strutturale. Meno frequente è il caso in cui il BIM venga utilizzato per gestire le infrastrutture dal punto di vista della sostenibilità, pratica generalmente implementata solo dalle società di ingegneria più strutturate, limitatamente ai progetti di maggiore rilevanza. Tuttavia, è probabile che il futuro vedrà una diffusione sempre più orizzontale di questa prassi, ossia di utilizzare il BIM anche per sistematizzare le informazioni e gestire gli aspetti legati alla sostenibilità delle opere civili, con conseguenti e importanti vantaggi. I modelli BIM possono essere infatti efficientemente impiegati per raccogliere e integrare dati sui materiali, sull'uso di energia e sul consumo di risorse, supportando lo svolgimento delle analisi di *Life Cycle Assessment* (LCA), facilitando di conseguenza anche l’ottenimento di certificazioni di sostenibilità secondo i già citati protocolli quali BREEAM Infrastructure ed ENVISION. Attraverso la visualizzazione e la reportistica, il BIM può inoltre migliorare la collaborazione tra i diversi attori coinvolti nel processo di progettazione, realizzazione e manutenzione delle opere civili, favorendo un processo decisionale orientato alla sostenibilità. La modellazione BIM può infatti agevolare la simulazione di diversi scenari per confrontare le alternative di progettazione, al fine di ottimizzare le prestazioni energetiche e ridurre al minimo gli impatti associati.

Un’ulteriore evoluzione nell’ambito dell’asset management è rappresentata dall’introduzione del concetto di Digital Twin delle opere infrastrutturali. Un Digital Twin consiste in un modello digitale creato per mezzo di software specialistici che consentono l’integrazione in un'unica piattaforma di svariate tipologie di dati e, nei casi più avanzati, anche un’interazione attiva con l’infrastruttura, rappresentata ad esempio dalla lettura delle misurazioni di sensoristica installata sull’infrastruttura o perfino l’azionamento da remoto di controlli applicati agli impianti e meccanismi propri dell’infrastruttura. Si consideri che modelli di questo tipo possono essere realizzati non solo per gestire un’infrastruttura già realizzata nella sua fase di esercizio, ma anche per gestire un cantiere e le lavorazioni ad esso associate. Pertanto, integrando nel Digital Twin di un’opera infrastrutturale anche i dati di impatto ambientale, il Digital Twin può diventare uno strumento utilissimo per il monitoraggio di tale impatto e per agire attivamente alla sua mitigazione, nel corso dell’intero ciclo di vita dell’infrastruttura.

La complessità di tali modelli può risultare elevata, specialmente in infrastrutture con estensione lineare come appunto quelle stradali. In generale, è opportuno adottare soluzioni ad elevata complessità solo nel caso in cui i gestori siano sufficientemente specializzati e strutturati per garantire nel tempo una gestione controllata dei dati. Qualora ciò non sia possibile, è conveniente optare per modelli via via più approssimati, al fine di garantire il controllo sulle diverse variabili in gioco, ed eventualmente anche una maggiore interoperabilità tra diversi attori coinvolti nella filiera della realizzazione di un’opera.

Tutte le informazioni raccolte e opportunamente strutturate relative alle lavorazioni effettuate, in particolare quelle relative alle fasi manutentive, non solo sono fondamentali per avere una visione d’insieme sugli impatti legati alla realizzazione ma acquisiscono una valenza fondamentale anche nella definizione di strategie manutentive future

3.2 Monitoraggio delle prestazioni ai fini manutentivi e impatto sulla sostenibilità

Nell’ambito della gestione delle opere infrastrutturali, il monitoraggio e il tracciamento degli impatti ambientali associati ai processi manutentivi rappresentano attività essenziali per individuare possibili misure di mitigazione da integrare negli interventi successivi. Tuttavia, questo costituisce solo uno degli elementi di un processo più ampio che mira alla decarbonizzazione degli interventi manutentivi.

Per perseguire efficacemente tale obiettivo è necessario definire una strategia di più ampio respiro che, oltre agli impatti ambientali delle attività manutentive, tenga conto anche delle caratteristiche prestazionali della rete stradale, dei costi, della disponibilità delle squadre di lavoro, delle implicazioni operative e dei possibili disagi alla circolazione.

Considerando i numerosi fattori e interessi in gioco, la definizione di una strategia di questo tipo richiede in genere il raggiungimento di un equilibrio tra esigenze talvolta contrastanti. Tale equilibrio deve essere definito dal management del gestore delle infrastrutture, le cui scelte devono comunque basarsi su criteri oggettivi. Il management deve dunque avere sotto controllo lo stato attuale della rete in gestione in termini di prestazioni strutturali e funzionali, la situazione delle risorse a disposizione e definire la strategia manutentiva tenendo conto anche dell’impatto sulla circolazione.

Dal punto di vista prestazionale, gli indicatori da prendere in considerazione per definire lo stato della rete in modo oggettivo possono essere identificati mediante il supporto di tecnici specialisti che, per i diversi asset che costituiscono l’infrastruttura stradale, possono indicare quali parametri prendere in considerazione, quali siano i metodi di misura e le procedure per il loro monitoraggio e quali siano i limiti e i criteri atti all’interpretazione delle misure di tali parametri.

Alcuni parametri sono in genere definiti da enti governativi sulla base di norme tecniche e prassi standardizzate, in modo da fornire degli indirizzi comuni a livello nazionale per tutti i gestori delle infrastrutture. Ad esempio, i ministeri delle infrastrutture e dei trasporti di vari Paesi sono soliti imporre alle società incaricate della gestione delle infrastrutture stradali l’obbligo di monitorare e dichiarare periodicamente specifici indicatori di qualità delle pavimentazioni stradali, quali il *Sideway Force Coefficient* (SFC) e l’*International Roughness Index* (IRI), rappresentativi delle principali caratteristiche strutturali e funzionali delle pavimentazioni stradali, ovvero l’aderenza e la regolarità, rispettivamente. Entrambi i parametri devono dunque essere misurati dai gestori dell’infrastruttura lungo le tratte di propria competenza, mediante apposite procedure e strumentazioni standardizzate di cui i gestori stessi si devono dotare.

L'adozione di indicatori standard per la misurazione delle prestazioni dell’infrastruttura consente di uniformare i metodi di valutazione e di confrontare i diversi gestori. Tuttavia, le prescrizioni governative hanno principalmente lo scopo di garantire il rispetto di condizioni minime di sicurezza, prevedendo penalità in caso di inadempienza. Questa visione non risulta ottimale per la definizione di una strategia manutentiva di lungo periodo, utile alla decarbonizzazione dei processi manutentivi, in quanto focalizza l’attenzione soprattutto sulla valutazione dello stato attuale delle infrastrutture. Il rischio correlato è quello di portare all’adozione di un approccio alla manutenzione di tipo reattivo, orientato a intervenire localmente e non tenendo conto del processo di degrado degli asset infrastrutturali nel lungo periodo. Questo approccio può portare al raggiungimento di condizioni critiche diffuse riguardo lo stato di salute delle infrastrutture, che risultano poi molto più onerose da sanare. Infatti, una volta raggiunta una condizione di degrado eccessiva, risulta necessario ricorrere ad interventi di risanamento profondo o riabilitazione, poiché la manutenzione ordinaria non è più in grado di garantire una soluzione duratura contro i fenomeni di ammaloramento ormai progrediti a uno stadio avanzato (**Figura 6**).

Per questo motivo, è fondamentale adottare un approccio preventivo alla manutenzione, basato non soltanto sul monitoraggio periodico dei parametri rappresentativi dello stato di salute delle infrastrutture, ma anche sull’adozione di metodologie avanzate per prevederne l’evoluzione nel tempo. Intervenire preventivamente e in modo adeguato consente di ridurre la frequenza degli interventi di manutenzione e, sull’intero ciclo di vita utile dell’infrastruttura, si traduce in un minore impatto ambientale. Da questo semplice concetto emerge ancora una volta l’importanza di monitorare la sovrastruttura nell’ottica di garantire non solo caratteristiche funzionali e strutturali adeguate, ma anche di minimizzare il numero di interventi di manutenzione nel corso della vita utile.

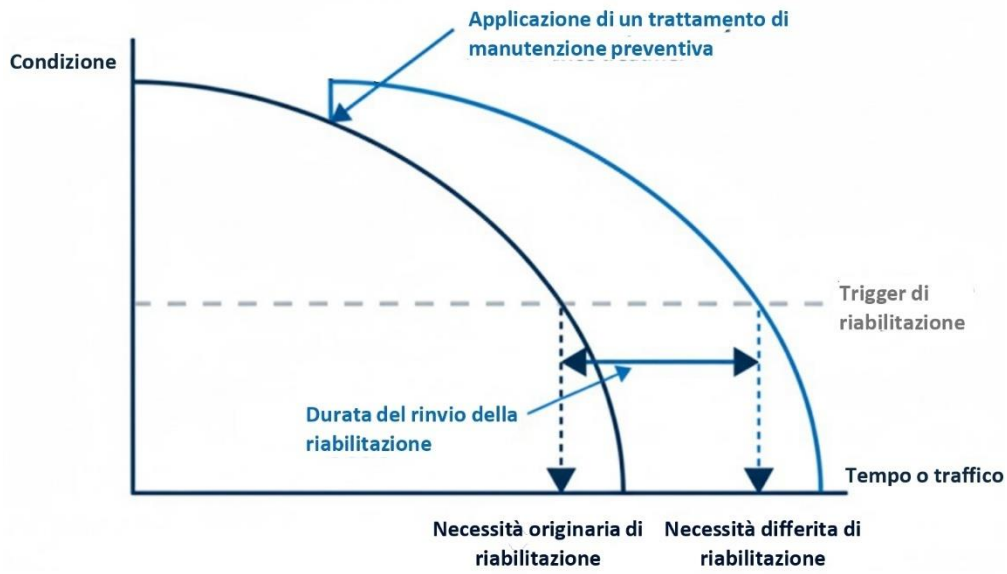


FIGURA 6. LIVELLO DI OTTIMALE INTERVENTO NELL'AMBITO DELLA MANUTENZIONE PREVENTIVA.

Il primo approccio al monitoraggio della sovrastruttura stradale è stato quello basato sull'analisi visiva. Questo approccio, standardizzato dalla norma ASTM 6433 che introduce l'indicatore PCI (*Pavement Condition Index*), è stato adottato in larga scala negli anni, acquisendo una robustezza tale da essere ancora oggi uno degli indicatori più utilizzati. Tuttavia, nella gestione di reti che richiedono un elevato livello di servizio, questo approccio risulta essere limitato e inadatto a proiettare con sufficiente affidabilità l'evoluzione della condizione della sovrastruttura, portando anche in questo caso ad un accumulo eccessivo del danneggiamento. Questo è dovuto principalmente al fatto che l'analisi visiva si basa sull'individuazione di ammaloramenti già presenti sulla superficie e dunque su processi già in stadio avanzato.

L'approccio moderno è basato invece su strategie che non siano solo preventive, ma anche predittive, ossia capaci di determinare il punto ottimale di intervento grazie a una previsione accurata dell'evoluzione nel tempo dello stato delle infrastrutture. Tale previsione può avvenire grazie all'uso di strumenti tecnologici per il monitoraggio degli indicatori prestazionali rappresentativi dello stato degli asset infrastrutturali e, al contempo, grazie all'implementazione di modelli di degrado sviluppati sia sulla base dell'analisi delle serie storiche di dati raccolti in passato sia sulla base di modelli matematici sviluppati nel campo dell'ingegneria civile.

Prendendo in considerazione, a titolo di esempio, l'asset delle pavimentazioni stradali, le tecnologie attualmente più utilizzate per il monitoraggio prestazionale includono i mezzi ad alto rendimento impiegati per misurare, con una cadenza periodica, i parametri standard già menzionati quali il SFC (descritto, ad esempio, dalla specifica tecnica CEN/TS 15901-6) e l'IRI (definito dalla World Bank nel 1986 con l'articolo "*The International Road Roughness Experiment*" e poi descritto, ad esempio, dallo standard ASTM E1926-08 o, in Europa, dalla norma EN 13036-5). I mezzi ad alto rendimento impiegati per la misura di tali parametri possono essere di differenti tipologie come, ad esempio, lo SCRIM (*Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine*), il SUMMS (*Survey Machine for Macrotexture and Skid*), l'ERMES (*Equipment for Routine evaluation of Macrotexture Evenness and Skid resistance*) o l'ARAN (*Automatic Road Analyser*). Oltre a questi, i gestori delle reti viarie più estese sono soliti dotarsi di ulteriori strumenti ancora più avanzati, quali ad esempio i mezzi ad alto rendimento per il monitoraggio della capacità portante delle pavimentazioni, denominati in genere *Rolling Weight Deflectometers* (RWD).

Al giorno d'oggi le possibilità di monitorare reti infrastrutturali estese e complesse sono ulteriormente aumentate, grazie alla diffusione di tecnologie emergenti rappresentate, ad esempio, da:

- sensoristica IoT in grado di comunicare in tempo reale informazioni relative sia alle condizioni ambientali che al comportamento statico e dinamico delle infrastrutture. Si può considerare in questo ambito sia la sensoristica installata direttamente sulle infrastrutture sia quella installata sui veicoli che, percorrendo la rete stradale, consentono un monitoraggio in movimento di tratte stradali estese e delle molteplici strutture. Rispetto a quest'ultimo esempio, è interessante menzionare alcune soluzioni emergenti particolarmente innovative, quali la nascita di pneumatici sensorizzati e di software per l'elaborazione dei dati provenienti dai

veicoli connessi per ricavare in tempo reale informazioni sullo stato delle pavimentazioni, nonché lo sviluppo di veicoli strumentati per il monitoraggio dinamico “indiretto” di ponti e viadotti;

- tecniche di Intelligenza Artificiale (AI) applicate ai fini dell’identificazione di segni di degrado delle infrastrutture mediante l’analisi automatica di immagini. Queste tecniche sono particolarmente flessibili in quanto applicabili, con opportuni accorgimenti, a quasi tutti gli asset costituenti l’infrastruttura stradale, come ponti e viadotti, gallerie, pavimentazioni stradali, segnaletica verticale e orizzontale e barriere di sicurezza. L’aumento della potenza di calcolo dei sistemi di ultima generazione consente la rapida elaborazione di un elevato numero di immagini, anche in tempo reale, che possono essere raccolte non solo da operatori addetti alle ispezioni ma anche da veicoli in movimento o tramite l’impiego di droni. In merito a questi ultimi, si iniziano già ad attuare le prime sperimentazioni di volo a pilotaggio remoto, la cui diffusione è limitata più dagli aspetti autorizzativi che da quelli tecnologici, o persino missioni di volo totalmente automatizzate.

Queste tecnologie, integrandosi a quelle tradizionali, offrono l’opportunità di superare i limiti degli attuali metodi di monitoraggio permettendo, ad esempio, l’acquisizione di dati prestazionali delle pavimentazioni in tempo reale e anche sulle corsie di marcia veloce, ottenendo uno screening completo e continuo della piattaforma stradale. I mezzi ad alto rendimento sopra menzionati consentono infatti solo l’esecuzione di misure limitate alle corsie di marcia lenta e ripetute periodicamente poche volte all’anno, a causa delle limitazioni di velocità e dei costi elevati. Come ulteriore esempio, nell’ambito della gestione dei ponti e viadotti, la documentazione fotografica raccolta dai droni può essere proiettata su modelli digitali delle opere infrastrutturali, abilitando lo svolgimento di cicli ispettivi da remoto, eseguibili perfino automaticamente mediante l’integrazione delle tecniche di AI sopra menzionate. Tali metodi potrebbero consentire una sorveglianza capillare e continua delle infrastrutture, complementare alla supervisione e al giudizio dei tecnici esperti che per questioni operative possono essere svolte meno frequentemente.

È però importante notare che, sebbene gli strumenti e le tecnologie di monitoraggio elencate consentano la raccolta di un’enorme mole di dati, la chiave per definire delle strategie manutentive predittive efficaci rimane nella capacità di integrare, sintetizzare e interpretare in modo snello le informazioni che da tali dati si possono estrapolare. La capacità di elaborare questi dati con modelli analitici avanzati e sempre fondati su una solida base ingegneristica rimane il requisito fondamentale per prevedere l’evoluzione delle condizioni infrastrutturali nel tempo e definire le strategie manutentive tenendo conto delle priorità e identificando gli interventi manutentivi più appropriati. Questo diviene possibile solo mediante lo sviluppo e l’adozione di piattaforme digitali di asset management, come ad esempio i Pavement Management System, i Bridge Management System e i Tunnel Management System. Questi applicativi permettono l’organizzazione sistematica dei dati raccolti mediante le attività di monitoraggio, relativi sia allo stato delle infrastrutture che alle condizioni ambientali e di esercizio delle stesse (es. dati di traffico, condizioni metereologiche), e ne consente l’elaborazione al fine di determinare, su base oggettiva, le priorità di intervento sulle opere infrastrutturali prese in considerazione. Nei casi più avanzati, i sistemi di asset management consentono anche l’implementazione dei modelli di degrado e di logiche manutentive personalizzate, portando all’elaborazione di piani manutentivi di medio e lungo termine, prevedendo l’allocazione delle risorse finanziarie nel tempo in modo da garantire sempre delle condizioni di servizio soddisfacenti.

L’adozione dei sistemi di asset management implica un investimento da parte degli enti gestori delle infrastrutture ma permette allo stesso tempo di ottenere una migliore conoscenza dello stato della rete in gestione, per quanto complessa, e di fruire di uno strumento a supporto della definizione di strategie manutentive predittive, capaci di limitare l’insorgenza di situazioni emergenziali e massimizzare l’efficacia degli investimenti. Tali strumenti divengono fondamentali per riuscire a giustificare, con un metodo razionale e oggettivo, l’allocazione dei budget da dedicare alla manutenzione, garantendo una maggiore trasparenza tra tutti gli stakeholder coinvolti.

Anche rispetto alla decarbonizzazione dei processi manutentivi, i sistemi di asset management possono rappresentare uno strumento di fondamentale importanza. Queste piattaforme digitali possono infatti consentire anche l’integrazione di modelli e metodi capaci di considerare le informazioni relative agli impatti ambientali all’interno del processo di definizione della strategia manutentiva. Avendo a disposizione una solida base di conoscenze relative agli impatti ambientali associati agli interventi manutentivi, è possibile integrare anche questi ultimi nei sistemi di asset management, che potranno dunque consentire una valutazione oggettiva delle strategie manutentive anche in termini di impatto ambientale e suggerire ottimizzazioni per minimizzare tale impatto.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione, sempre legato alla stretta relazione tra la gestione delle infrastrutture stradali e la loro sostenibilità, è il fatto che nella definizione delle strategie manutentive sarebbe opportuno, oggi più che mai, tenere conto del cambiamento climatico e in particolare del progressivo aumento delle temperature. Nel settore stradale ciò assume particolare rilevanza, in quanto la temperatura è un parametro che influenza fortemente le prestazioni delle pavimentazioni, vista la natura termo-dipendente dei conglomerati bituminosi che solitamente le costituiscono. Da un lato, risulta necessario adattare gli attuali criteri di accettazione dei materiali prevedendo l’impiego di leganti bituminosi, selezionati sulla base di sistemi di classificazione già noti come il Performance Grade (PG) introdotto dal “*Superpave*” *Strategic Highway Research Program* (SHRP) (AASHTO M 320, AASHTO M 332), capaci di garantire prestazioni ottimali in range più ampi di temperature. Ciò consentirebbe, ad esempio, di contrastare la comparsa di ammaloramenti legati alla maggiore deformabilità del conglomerato alle alte temperature, come ad esempio l'ormaiamento, che potrebbe rappresentare un degrado rilevante specialmente in presenza di picchi elevati di temperatura. Dall’altro lato, sia la progettazione delle pavimentazioni che le analisi strutturali utilizzate per valutare la resistenza a fatica e programmare gli interventi manutentivi dovrebbero tenere conto dell’aumento delle temperature medie, poiché questo parametro incide in modo significativo sul calcolo della vita residua delle pavimentazioni. Anche in questo contesto, le piattaforme digitali per l’asset management possono costituire un valido supporto: come detto, esse rappresentano strumenti di supporto alla definizione dei piani manutentivi anche nel lungo periodo e, grazie all’integrazione di modelli previsionali sull’evoluzione delle temperature nel tempo, rendono possibile tener conto dell’aumento termico nelle relative analisi.

Emerge chiaramente che le piattaforme digitali di asset management sono chiamate a gestire problematiche complesse e multidimensionali; tuttavia, le tecnologie attuali rendono già oggi possibile lo sviluppo di sistemi di questo tipo, destinati a evolversi ulteriormente e a diffondersi sempre di più. Mediante una raccolta completa e un’organizzazione razionale dei dati, nonché una loro gestione ed elaborazione integrata sarà possibile operare mirando a una sempre migliore gestione delle infrastrutture stradali, al fine di renderle sempre più efficienti, sicure e sostenibili.

4 Materiali tradizionali per le costruzioni stradali ed emissioni associate

La realizzazione e la manutenzione delle infrastrutture comportano impatti significativi in termini di impronta carbonica. Comprendere appieno la portata di tali impatti e identificare i nodi critici nella catena del valore che caratterizza la realizzazione di una opera stradale, costituiscono la precondizione essenziale per poter definire strategie di decarbonizzazione realmente efficaci.

Le principali fonti di emissioni climalteranti (GHG) nelle costruzioni stradali sono legate alla produzione dei materiali (calcestruzzi, acciai, conglomerati bituminosi), al loro trasporto e alla loro messa in opera. In un recente sondaggio condotto dal PIARC a livello mondiale, operatori del settore e specialisti della sostenibilità delle infrastrutture hanno individuato proprio nei materiali i maggiori *carbon hot-spot*[1].

La sfida tecnica ed economica per la decarbonizzazione in questi ambiti può essere affrontata solo attraverso l'introduzione e lo sviluppo di tecnologie a bassa emissione e/o ad alte prestazioni. La corretta organizzazione delle pratiche produttive rappresenta anch'essa un elemento cruciale al fine di mitigare le emissioni indirette. Strategie di approvvigionamento sostenibile, quali la preferenza per materiali con Dichiarazioni Ambientali del Prodotto (EPD) e l'incentivazione all'utilizzo di materie prime secondarie costituiscono, infatti, delle leve essenziali per orientare i processi nella corretta direzione. In tale contesto, la vera complessità risiede nella tracciabilità e nella standardizzazione delle informazioni ambientali lungo l'intera filiera e ciò richiede una maggiore collaborazione e condivisione di dati tra i diversi stakeholder del settore per una valutazione realmente efficace e comparabile.

Nelle parti che seguono si descrivono le emissioni associate ai processi produttivi e alle modalità di posa in opera dei materiali tradizionali comunemente utilizzati nelle attività di costruzione e manutenzione delle strade. L'intento è di evidenziare i passaggi più critici della filiera e dove poter intervenire per ridurre le quantità complessive di CO_2 e degli altri indicatori di impatto. È opportuno sottolineare che i dati di seguito riportati devono essere considerati indicativi e non esaustivi, e sono rappresentativi di medie globali, comprensive degli impatti associati alla produzione e alla manutenzione delle attrezzature impiegate. L'adozione di uno specifico valore deve sempre essere giustificata tramite un'analisi LCA dedicata. I dati nel seguito mostrati sono stati ottenuti principalmente da dati di inventario Ecoinvent, oltre che da fonti terze quali articoli scientifici, atti di convegno ed EPD.

4.1 Conglomerati bituminosi

4.1.1 Materiali costituenti

4.1.1.1 Legante bituminoso

Il bitume è il residuo della colonna di distillazione frazionata del petrolio. Il suo processo produttivo comprende le fasi di estrazione del greggio, il suo trasporto e il frazionamento in raffineria. Il bitume convenzionale viene utilizzato senza l'aggiunta di ulteriori componenti o senza sottoporre il residuo a specifici trattamenti finalizzati a conferire determinate caratteristiche al prodotto finale. Il bitume modificato è un legante prodotto in appositi impianti attraverso la miscelazione di bitume convenzionale (detto anche "madre" o base") con polimeri di diversa natura (principalmente SBS - *Styrene Butadiene Styrene*) e l'aggiunta di ulteriori eventuali additivi (es. cross-linking agent) con un processo che richiede energia elettrica per il riscaldamento e la mescolazione. Le emissioni in ambiente e il consumo energetico stimati per 1 tonnellata di legante sono riportati nella **Tabella 5**[2].

TABELLA 5. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER I LEGANTI BITUMINOSI.

Legante bituminoso	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)
Convenzionale	800 – 1.000	40.000 – 50.000
Modificato con SBS	1.100 – 2.000	40.5000 – 52.000

[1] https://www.piarc.org/en/News-Agenda-PIARC/News/2024-10-25,We-need-your-opinion-participate-in-PIARC-surveys-on-decarbonization-and-disaster-management-PIARC-2024.htm

[2] Le stime dell'Asphalt Insitute indicano una minore differenza percentuale tra bitumi modificati rispetto ai non modificati, quantificabile nel 20% in più per le emissioni di CO_2eq e del 6% in più per il consumo energetico

4.1.1.2 Aggregati e filler

L'estrazione di aggregati lapidei rappresenta una fase importante nel ciclo di vita della pavimentazione, con impatti ambientali relativi per unità di massa contenuti rispetto alla produzione del bitume, ma significativi in termini assoluti a causa della quantità di materiale utilizzato. Il processo produttivo parte dall'estrazione della roccia (cavo meccanico o brillamento, a seconda della durezza e stratigrafia del giacimento sino alla frantumazione e vagliatura), con eventuale lavaggio, coinvolgendo diverse macchine (escavatori, pale meccaniche, martelli perforatori, camion, impianti di lavorazione).

Nella **Tabella 6** si riportano alcuni valori di riferimento relativi a diverse classi di aggregato.

TABELLA 6. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER GLI AGGREGATI LAPIDEI.

Aggregati	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)
Pietrisco e pietrischetto	8 – 10	110 – 130
Sabbia naturale	2 – 6	35 – 70
Sabbia frantumata	9 – 11	110 – 130

Oltre alle parti sottili contenute nelle varie frazioni granulometriche, il proporzionamento dei conglomerati spesso richiede l'aggiunta di filler, che può essere di diversa natura: naturale (da frantumazione di rocce) oppure industriale (cementizio e ceneri). Nella **Tabella 7** si riportano alcuni valori caratteristici.

TABELLA 7. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER I FILLER.

Filler	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)
Naturale	30 – 60	400 – 650
Cementizio	800 – 900	3.500 – 4.000
Da ceneri	0*	0*

** Se da riciclo o da recupero, in assenza di ulteriori lavorazioni*

4.1.1.3 Granulato di conglomerato bituminoso

Il granulato di conglomerato bituminoso (GCB) permette di ridurre il consumo di materie prime non rinnovabili (aggregati, bitume e filler). È possibile dunque determinare per detrazione il risparmio di emissioni e di consumo di energia legato al suo impiego. Non bisogna tuttavia sottovalutare che il processo produttivo del granulato comporta comunque degli impatti, legati tipicamente alle operazioni di fresatura, trasporto, frantumazione e vagliatura. In letteratura i valori di emissioni ed energia primaria associati al recupero e al trattamento del conglomerato bituminoso sono pari a 0,5 – 2,5 $kgCO_2eq$ e 3 – 10 MJ per 1 tonnellata di GCB.

4.1.1.4 Additivi

Gli impatti ambientali degli additivi per conglomerati bituminosi variano moltissimo in funzione delle materie prime (di primo utilizzo o riciclate), della loro natura (fonti fossili o di origine organica) e dei relativi processi produttivi. Se di origine fossile e di primo utilizzo, il loro impatto unitario può essere elevato, ma essendo utilizzati in percentuali minime rispetto alla massa del conglomerato (0,02% - 5%), non incidono in modo significativo rispetto ai potenziali benefici offerti (ad es. i derivati amminici permettono la produzione dei Warm Mix Asphalt, WMA). Il mercato si sta inoltre orientando verso la ricerca e la produzione di additivi con materiali riciclati o di origine organica, riducendo sostanzialmente anche l'impatto unitario. In **Tabella 8** si riportano alcuni dati relativi a emissioni e consumo energetico per diverse tipologie di additivo.

TABELLA 8. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER VARI TIPI DI ADDITIVO.

Tipo di prodotto	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)	Quantità tipiche
Additivi di adesione (amminici)	400 – 2.400	30.000 – 50.000	0,2 – 0,5%*
Additivi di adesione (silanici)	4.500 – 6.500	85.000 – 105.000	0,1 – 0,3%*
Attivanti di adesione (polifosforici)	700 – 2.700	38.000 – 58.000	0,1 – 0,5%*
Fibre (cellulosa, vetro, sintetiche)	300 – 1.200	3.100 – 25.000	0,2 – 0,6%**
Additivi per WMA (non ionici)	1.000 – 3.000	15.000 – 75.000	0,2 – 0,5%*
Rigeneranti (origine vegetale)	300 – 900	4.000 – 25.000	0,2 – 0,5%**
Compound polimerici di primo utilizzo	2.500 – 4.000	50.000 – 90.000	0,2 – 0,5%**
Compound polimerici da plastica riciclata	400 – 1.300	7.000 – 18.000	0,2 – 0,5%**
Polverino di gomma	400 – 600	3.500 – 6.000	15 – 20%* - 2 – 3%**

** riferito alla massa del bitume. ** riferito alla massa del conglomerato bituminoso*

4.1.2 Produzione

Gli impatti ambientali generati dalla produzione dei conglomerati tradizionali a caldo dipendono dalle tecnologie utilizzate, dagli impianti e dalla loro organizzazione (**Figura 7** e **Figura 8**).

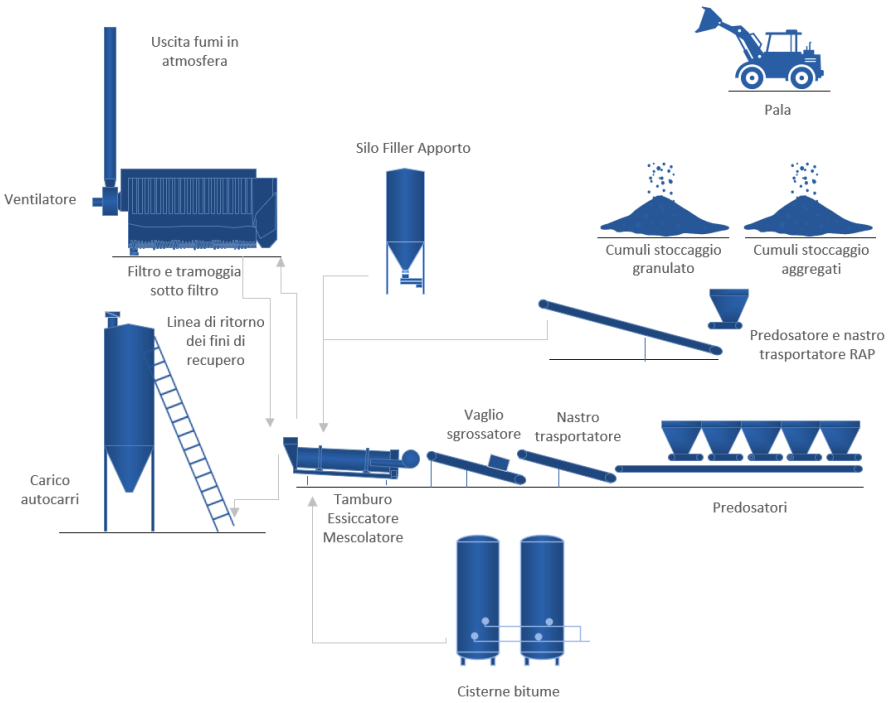


FIGURA 7. CICLO PRODUTTIVO DI IMPIANTI PER CONGLOMERATI BITUMINOSI DI TIPO CONTINUO.

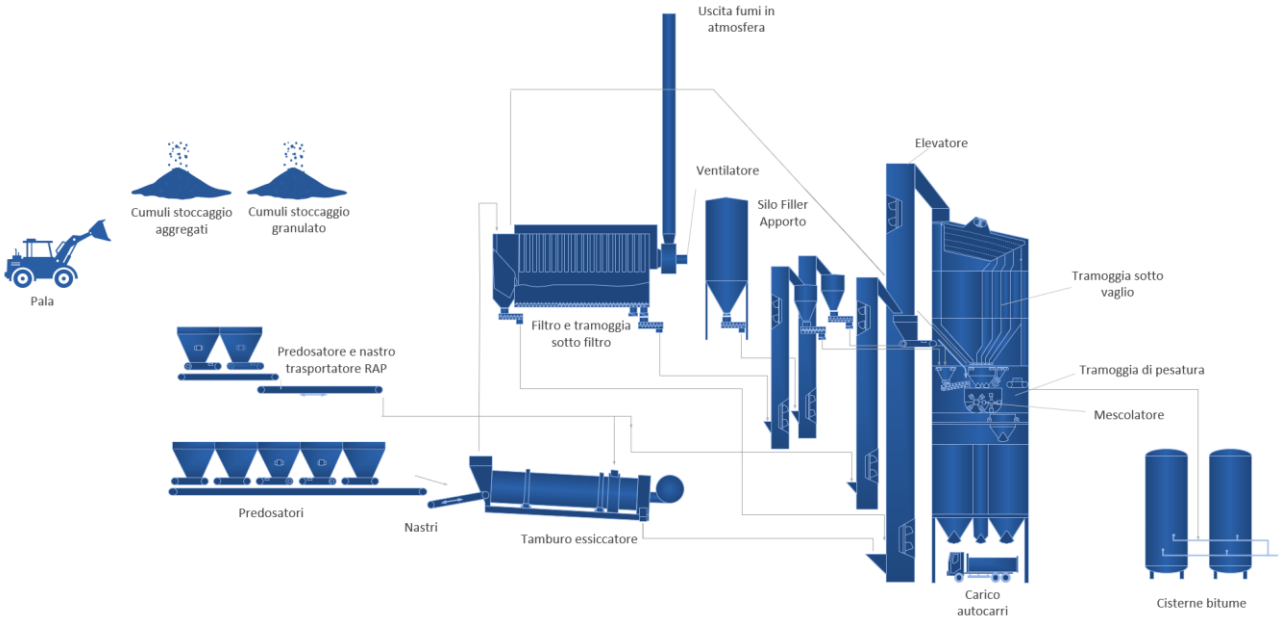


FIGURA 8. CICLO PRODUTTIVO DI IMPIANTI PER CONGLOMERATI BITUMINOSI DI TIPO DISCONTINUO.

Le emissioni associate alla produzione sono mediamente pari a 20 – 70 $kgCO_2eq$ per tonnellata con un consumo di energia di 250 – 750 MJ, in funzione delle tecnologie utilizzate, dell’umidità (maggiore umidità corrisponde a maggiore consumo energetico) degli aggregati e dei bitumi utilizzati (maggiore viscosità corrisponde a maggiore consumo energetico).

Gli impianti moderni sono dotati di sistemi di controllo automatizzati che permettono di monitorare i parametri di produzione (temperature, dosaggi, tempi di mescolazione, ecc.) e di software avanzati che permettono la gestione in tempo reale di tutte le variabili coinvolte nella produzione del conglomerato bituminoso e assicurano che il prodotto finale soddisfi gli standard di qualità richiesti dai committenti. Questi sistemi, se da un lato comportano essi stessi un consumo energetico minimo, dall’altro permettono di ottimizzare il consumo complessivo di energia e risorse.

Di seguito si dettagliano i principali aspetti relativi alle fonti emissive attinenti alle varie fasi operative.

L’efficientamento del processo produttivo può essere perseguito tramite:

- riciclaggio di materiali e prodotti di origine organica (es. granulato, plastiche riciclate, additivi, etc.);
- riduzione del consumo energetico degli impianti, anche attraverso l’adozione di tecnologie moderne (soprattutto per l’immissione e il riscaldamento del granulato) e l'uso di fonti rinnovabili;
- implementazione di sistemi di controllo avanzati (digitalizzazione e monitoraggio) che permette una gestione più efficiente delle risorse e una riduzione degli sprechi, come già prima richiamato;
- gestione dell’umidità (stoccaggio in capannoni o sotto tettoie), soprattutto per sabbie e granulato, che comporta una riduzione del consumo di energia necessaria per l’essicazione.

La riduzione delle emissioni legate alle fasi di trasporto (materie prime – produzione conglomerato – sito) è perseguibile attraverso mezzi di ultima generazione che permettono consumi inferiori e utilizzo di energia meno impattante e alternativa al tradizionale diesel (es. elettricità, metano, etc.). Le medesime considerazioni valgono per i mezzi utilizzati per la posa in opera.

4.1.2.1 Aree di stoccaggio degli aggregati e del granulato, sistemi di dosaggio e nastri trasportatori

Ad esclusione del filler di aggiunta che è contenuto in appositi silos, gli aggregati e il granulato di conglomerato bituminoso sono stoccati all’interno del sedime dell’impianto in cumuli separati. Per quanto concerne il granulato, in caso di pioggia i cumuli possono rilasciare eluati e pertanto i piani di appoggio degli stessi devono essere resi impermeabili con predisposizione di apposito sistema dedicato per il recupero delle acque.

Le emissioni e consumi energetici per gli aggregati e il granulato derivano dalla movimentazione dai cumuli verso le tramogge, tipicamente mediante pala caricatrice. Ulteriori consumi energetici sono dovuti al trasporto degli aggregati verso il tamburo essiccatore che avviene con nastri trasportatori dotati di sistemi che controllano il flusso di materiale (rotovalvole).

Le emissioni e i consumi energetici legati al filler sono dovuti al trasporto dai silos verso la bilancia di dosaggio per mezzo di sistemi di pompaggio in depressione.

4.1.2.2 Essiccazione e riscaldamento

La produzione dei conglomerati a caldo è caratterizzata dalla fase altamente energivora inerente al riscaldamento degli aggregati e del granulato di conglomerato bituminoso.

Gli aggregati sono riscaldati a temperature pari a circa 150–180°C, al fine di rimuovere l'umidità e favorire la mescolazione e quindi l'adesione con il bitume. La modalità tradizionale di alimentazione del tamburo è quella a olio BTZ (Basso Tenore di Zolfo). Nel corso degli ultimi anni, anche in relazione alle direttive CAM Strade, si sta progressivamente passando a fonti meno impattanti come gas metano, biometano, Gas di Petrolio Liquefatto (GPL), bioGPL, idrogeno, *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO), biodiesel e bioetanolo. La fase di essicazione degli aggregati avviene attraverso la rotazione del tamburo, con relativo consumo di elettricità.

Per garantirne la lavorabilità, il bitume è stoccato in cisterne mantenute a temperature pari a 160-180°C (in funzione della classe del bitume e dell’eventuale modifica). Il riscaldamento è ottenuto tramite serpentine interne alle cisterne stesse dentro alle quali passa olio diatermico, oppure tramite riscaldamento elettrico (resistenze posizionate nella parte inferiore della cisterna). Molte aziende, per ridurre gli impatti, si sono dotate (o si stanno dotando) di pannelli fotovoltaici per soddisfare i fabbisogni di energia elettrica.

Per quanto concerne il GCB, l’essiccazione e il riscaldamento possono avvenire all’interno del tamburo essiccatore (immissione attraverso l’anello), in un tamburo dedicato (impianto a doppio tamburo), oppure in modo diretto attraverso l’immissione nell’elevatore a caldo o nel mescolatore.

Si evidenzia come gli impianti produttivi siano soggetti a dei limiti imposti sulle emissioni, indicati all’interno dell’AUA – Autorizzazione Unica Ambientale

4.1.2.3 Miscelazione

La modalità di miscelazione dipende dalla tipologia di impianto produttivo.

Per gli impianti in continuo, la miscelazione dei materiali costituenti avviene direttamente nella parte finale del tamburo essiccatore; l’ulteriore contributo in termini di consumo energetico è in questo caso dovuto al pompaggio del bitume.

Per gli impianti in discontinuo, i consumi energetici ulteriori sono invece legati al trasporto degli aggregati asciutti dal tamburo essiccatore al vaglio attraverso l’elevatore, dalla successiva vagliatura (non sempre eseguita, soprattutto in presenza di GCB), dalla pesatura degli aggregati e del granulato divisi in pezzature per il corretto proporzionamento, infine dalla miscelazione nel mescolatore dei materiali costituenti, dove il bitume è aggiunto per pompaggio.

Il dosaggio degli additivi dipende dalla loro natura (liquida o solida). Tendenzialmente, quelli liquidi sono aggiunti per pompaggio nel bitume (in linea negli impianti in continuo o nella bilancia per quelli in discontinuo). Quelli solidi sono invece regolati attraverso piccoli sistemi dosatori che pompano i prodotti nella parte finale della linea per gli impianti in continuo e nel mescolatore per quelli discontinui.

Una volta miscelato, il conglomerato bituminoso può essere caricato sui mezzi di trasporto direttamente per caduta, oppure può essere stoccato in sili di accumulo attraverso l’impiego di una benna trasportatrice. Nel primo caso, il consumo energetico è dovuto solo all’apertura del mescolatore, nel secondo caso anche alla movimentazione della benna.

I sili di stoccaggio possono essere semplicemente coibentati oppure possono essere riscaldati, comportando quindi un relativo consumo energetico, per evitare il raffreddamento del prodotto e per mantenerlo così pronto per il carico e il trasporto a temperature compatibili con le schede tecniche di prodotto e i capitolati tecnici dei committenti.

4.1.2.4 Gestione dei fumi

I fumi dovuti al ciclo produttivo devono essere gestiti per eliminare le particelle volatili. Generalmente essi sono convogliati ad un filtro (normalmente a maniche altamente resistenti alle temperature) prima dell'uscita dal camino. Il recupero del filler avviene tramite scuotimento, per poi essere canalizzato al silo di stoccaggio del filler di recupero. Il riprocesso richiede consumo di energia, ma consente di recuperare materiale che andrebbe altrimenti disperso in aria, sopperire a eventuali mancanze rispetto al mix design e, allo stesso tempo, di garantire il rispetto dei limiti di emissioni imposti dalle normative ambientali.

4.1.3 Trasporto e posa in opera

Il trasporto del conglomerato bituminoso verso il sito di stesa avviene tramite mezzi dotati di cassone ribaltabile, in genere dotato di coibentazione. Il principale impatto di questa fase è legato al consumo di carburante del mezzo, che dipendente ovviamente dalla distanza del sito rispetto all'impianto. A titolo indicativo e di mero esempio, considerando il trasporto a una distanza impianto-cantiere di circa 50 km, con un mezzo di massa 26 – 40 tonnellate alimentato a gasolio e caratterizzato da un consumo medio di 33 – 40 litri/100 km, le emissioni corrispondenti sono pari a circa 5 – 9 $kgCO_2eq/t$ ed il consumo di energia pari a circa 45 – 80 MJ/t.

Per quanto concerne la posa in opera, in caso di strada già esistente questa è preceduta dalla demolizione della pavimentazione, normalmente attraverso l'utilizzo di fresatrice (demolizione per fresatura), con consumo di carburante ed emissioni correlate (**Figura 9**).

Pima della posa di ogni strato, al fine di consentire l'adesione tra gli strati e quindi garantire il corretto comportamento meccanico della pavimentazione, è normale procedere alla pulizia del piano di appoggio e all'applicazione (con botte spruzzatrice) di una mano d'attacco con emulsione bituminosa. Oltre al consumo di carburante ed emissioni correlate ai mezzi (moto spazzola e autobotte), è importante considerare anche gli impatti dovuti alla produzione dell'emulsione. Tali incidenze dipendono dalla formulazione, dal tipo di bitume, dall'uso di emulsionatori e dai processi produttivi. Indicativamente, per 1 tonnellata di emulsione bituminosa si hanno 150 – 700 $kgCO_2eq$ emessa e 25.000 – 40.000 MJ di energia consumata.

La messa in opera del conglomerato avviene per mezzo di vibrofinitrice, che provvede alla distribuzione del materiale secondo gli spessori indicati in progetto, e rulli compattatori, che provvedono all'addensamento della miscela. Il mercato offre un'ampia offerta di macchine, che si differenziano per larghezza e spessore di stesa e compattazione, capacità produttiva, alimentazione (quelli più utilizzati funzionano a carburante, ma inizia a svilupparsi il mercato di quelli elettrici). Gli impatti da considerare sono sempre quelli legati all'utilizzo di combustibile.

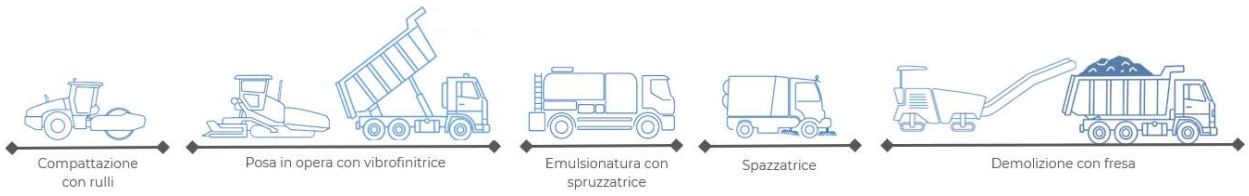


FIGURA 9. TRENO DI LAVORAZIONE PER LA MESSA IN OPERA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI.

4.2 Calcestruzzi

4.2.1 Materiali costituenti

4.2.1.1 Cemento

Il cemento costituisce di gran lunga la componente più impattante del calcestruzzo. La sua produzione, infatti, richiede un processo altamente energivoro, contribuendo in modo rilevante alle emissioni globali di gas serra. La produzione mondiale del cemento è cresciuta rapidamente tra il 1980 e i primi anni del 2000. Nel decennio compreso tra il 2003 e il 2013 è raddoppiata passando da 2 a 4 miliardi di tonnellate anno, restando poi complessivamente stabile fino ad oggi (**Figura 10**). Si stima che la produzione di cemento rappresenti da sola circa il 6-7% delle emissioni globali totali, che ammontano a circa 50 miliardi di tonnellate di CO2eq ogni anno.

Le componenti principali per la produzione del clinker sono calcare (circa il 65%), marna, argilla, sabbia e limo. Il cemento si ottiene attraverso la calcinazione delle componenti (a temperature pari a 1.450°C circa) e successiva macinazione, insieme ad una piccola quantità di gesso (massimo 5%) ed eventuali additivi. In funzione della composizione produttiva e della finezza di macinazione, si ottengono diversi tipi di cemento e classi di resistenza. Uno schema del processo produttivo è riprodotto nella **Figura 11**.

La fase di riscaldamento per la produzione del clinker rappresenta la fase cruciale e più energivora, per consentire la calcinazione del carbonato di calcio ($CaCO_3$).

La reazione termochimica comporta la decomposizione del carbonato di calcio in ossido di calcio (CaO), noto anche come calce viva, e la produzione di anidride carbonica (CaO_2), secondo la seguente reazione:

$$CaCO_3 + \text{calore} \rightarrow CaO + CO_2$$

Le emissioni derivanti dalla reazione sono definite "emissioni di processo", in quanto originate direttamente dal processo chimico di decomposizione del materiale e rappresentano tra il 50-65% di quelle totali afferenti al ciclo produttivo del cemento. Tali emissioni sono quelle più difficili da ridurre poiché la CO_2 è rilasciata da una reazione chimica intrinseca al processo di produzione e non può essere eliminata semplicemente sostituendo il combustibile o migliorando l'efficienza energetica dell'impianto.

Il 30-45% delle emissioni proviene invece da tutte quelle attività necessarie a mantenere in esercizio gli impianti e, in particolare, dal consumo di combustibili per raggiungere le alte temperature. Tipicamente sono utilizzati:

- combustibili tradizionali (carbone, che è il più comune; gas naturale; combustibili fossili liquidi, che includono il pet-coke, ovvero un residuo della raffinazione del petrolio);
- combustibili alternativi come i Combustibili Solidi Secondari - CSS, ovvero rifiuti non pericolosi selezionati e trattati per essere utilizzati come combustibile (es. plastica, gomme, pneumatici, fanghi e rifiuti urbani);
- combustibili di biomasse.

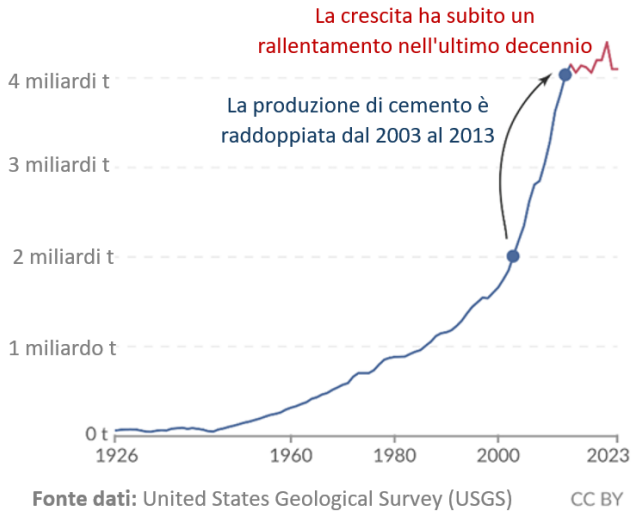


FIGURA 10. PRODUZIONE MONDIALE DI CEMENTO.

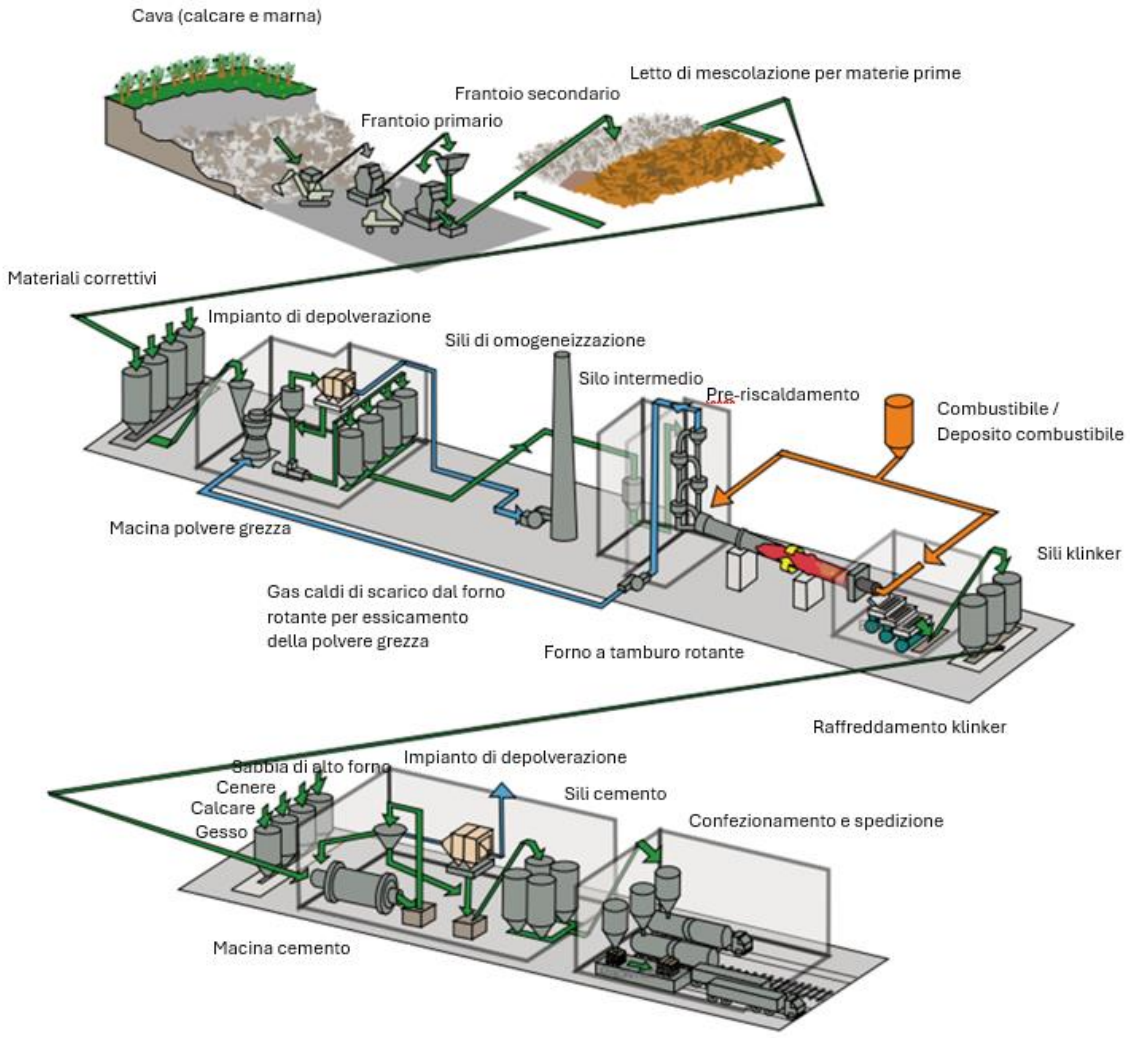


FIGURA 11. PROCESSO DI PRODUZIONE DEL CEMENTO.

L'uso di CSS e biomasse contribuisce a ridurre le emissioni di gas serra rispetto all'uso di combustibili fossili massimizzando, oltretutto, il beneficio legato al riutilizzo di materiali altrimenti destinati allo smaltimento. Inoltre, tale utilizzo diminuisce la necessità di importare combustibili fossili non rinnovabili.

Il consumo di energia è legato all’alimentazione di tutti gli altri macchinari collegati agli impianti produttivi stessi, compresa la fase di convoglio delle materie prime al forno.

Non bisogna poi dimenticare gli impatti associati al trasporto del prodotto finale verso gli hub di smistamento e agli utilizzatori finali, che corrisponde a circa il 5-10% delle emissioni totali emesse dall’industria del cemento.

Lo sforzo affrontato verso la sostenibilità dalla filiera del cemento negli ultimi anni è stata quella di studiare e produrre i Low Carbon Cement (LCC) attraverso la limitazione nell’utilizzo del clinker, ovvero sostituendolo parzialmente con materiali decarbonizzati non tossici, dando origine a quelli che vengono chiamati “blended cements” (cementi miscelati).

I materiali sostitutivi, anche noti come *Supplementary Cementitious Materials* (SCM) a ridotte emissioni, possono essere sottoprodotti di lavorazione industriale o determinati tipi di rocce naturali. Esistono diversi tipi di blended cements, arrivando per alcuni di essi sino alla riduzione delle emissioni correlate di circa il 20%. La produzione su larga scala di blended cements è limitata dalla disponibilità di SCM e da alcune restrizioni normative (le caratteristiche prestazionali variano in funzione del tipo e della quantità di SCM utilizzato). Nella **Tabella 9** sono riportati i valori indicativi di impatto (emissioni e consumo energetico) relativi alla produzione dei vari tipi di cemento.

TABELLA 9. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER VARI TIPI DI CEMENTO.

Cemento	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)
CEM I	800 – 900	3.000 – 4.000
CEM II/A	750 – 850	3.000 – 4.500
CEM II/B	600 – 750	2.500 – 4.000
CEM III/A	500 – 600	2.700 – 3.700
CEM III/B	350 – 450	2.500 – 3.500
CEM IV/A	650 – 750	2.200 – 3.500
CEM V/A	500 – 600	2.000 – 3.000

4.2.1.2 Aggregati

Gli aggregati rappresentano la parte maggiore del volume del calcestruzzo (60-80%) e influenzano notevolmente le sue prestazioni, come resistenza meccanica, durabilità e resistenza al gelo-disgelo. Anche la loro forma e dimensione sono importanti: gli aggregati naturali e tondeggianti (es. ghiaia e sabbia di fiume) migliorano la lavorabilità del calcestruzzo fresco, mentre gli aggregati frantumati possono contribuire ad aumentarne la resistenza a compressione. In alternativa agli aggregati naturali o frantumati, è possibile utilizzare aggregati riciclati (ad esempio ottenuti dalla demolizione e frantumazione di calcestruzzo a fine vita, scorie da acciaieria e altre fonti industriali), consentendo la riduzione degli impatti ambientali del calcestruzzo. La percentuale relativa di aggregati naturali o frantumati (anche da riciclaggio) dipende dal tipo di calcestruzzo da realizzare e dalle prescrizioni dei capitolati.

Come per i conglomerati bituminosi, l'estrazione degli aggregati rappresenta una fase chiave nel ciclo di vita dei calcestruzzi, con impatti ambientali contenuti rispetto alla produzione del cemento in termini relativi, ma comunque significativi a causa delle quantità in gioco.

Per gli impatti si veda il paragrafo 4.1.1.2, con gli ulteriori valori riportati in **Tabella 10**.

TABELLA 10. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER VARI TIPI DI AGGREGATI.

Aggregati	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)
Ghiaia e ghiaietto alluvionale	2 – 5	30 – 60
Ghiaia e ghiaietto riciclati	0,5 – 2,5	3 – 10
Scorie di acciaieria	0,5 – 2,5	3 – 10

4.2.1.3 Acqua

L'acqua svolge un ruolo fondamentale per consentire la reazione chimica di presa (indurimento) del cemento e sviluppare quindi resistenza. Inoltre, l'acqua permette di rendere l'impasto plastico e lavorabile, migliorando la capacità del calcestruzzo di riempire le casseforme e di essere lavorato. Il rapporto acqua/cemento influisce notevolmente sulle proprietà della miscela, come la resistenza e la durabilità, nonché sulla protezione contro la corrosione delle armature.

Con acqua di impasto si intende la quantità d'acqua complessiva contenuta nel calcestruzzo fresco, da considerarsi nel calcolo del rapporto acqua/cemento efficace. L'acqua di impasto è costituita da:

- umidità degli aggregati;
- acqua aggiunta.

L'acqua può essere reperita da diverse fonti: potabile, di falda, di superficie (fluviale o lacustre) e riciclata/processata, marina (eventualmente per calcestruzzo non armato). In generale, le acque reflue non sono idonee.

L'impatto ambientale associato all'uso dell'acqua varia in base alla fonte e al trattamento; in **Tabella 11** si riportano alcuni valori di riferimento.

TABELLA 11. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER TIPO DI ACQUA.

Tipo di acqua	Emissioni ($kgCO_2eq/m3$)	Energia primaria (MJ/ m3)	Note
Potabile	0,3 – 1,2	5 – 15	Incluso pompaggio, filtrazione, disinfezione e distribuzione
Falda o di superficie	0,1 – 0,3	0,2 – 3,0	Senza trattamenti
Riciclata/processata	0,2 – 0,6	0,3 – 2,5	Dipende dal grado di trattamento

4.2.1.4 Additivi

Gli additivi per calcestruzzo possono essere in polvere o liquidi e permettono di modificare determinate caratteristiche fisico-meccaniche del calcestruzzo stesso, sia fresco sia indurito. Essi sono normalmente impiegati in quantità ridotte (0,2- 2% rispetto al peso del cemento) a seconda del tipo di additivo e dell'applicazione specifica; per tale ragione, contribuiscono in modo residuale agli impatti ambientali complessivi del calcestruzzo.

Nella **Tabella 12** si riportano alcuni valori di riferimento relativi alle emissioni e all'energia primaria.

TABELLA 12. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PRIMARIA PER VARI ADDITIVI.

Tipo di additivo	Impiego	Emissioni ($kgCO_2eq/t$)	Energia primaria (MJ/t)	Quantità su cemento (%)
Aeranti	Incremento resistenza al gelo/disgelo	1.800 – 3.800	30.000 – 50.000	0,01 – 0,03%
Acceleranti	Acceleranti di presa ed indurimento	1.900 – 3.900	30.000 – 50.000	1 – 2%
Ritardanti	Rallentamento della presa in climi caldi	500 – 1.500	16.000 – 36.000	0,2 – 0,5%
Fluidificanti	Miglioramento della lavorabilità	1.000 – 2.000	20.000 – 30.000	0,8 – 1,5%
Fibre polimeriche	Aumento della duttilità e della resistenza a trazione	1.500 – 5.000	25.000 – 100.000	0,1 – 0,5%
Impermeabilizzanti	Incremento della resistenza all'acqua	1.500 – 3.500	50.000 – 70.000	0,5 – 1,5%
Espansivi	Compensatori di ritiro durante l'indurimento e la stagionatura	500 – 4.000	5.000 – 70.000	0,5 – 8%

4.2.2 Produzione e messa in opera

La produzione del calcestruzzo e la successiva messa in opera si svolgono attraverso più operazioni, ad ognuna delle quali è possibile associare un determinato contributo in termini di emissioni e consumo energetico (**Figura 12**). Gli impatti complessivi dipendono dalla tipologia di calcestruzzo, nonché dalla specifica ricetta del materiale (ottenuta tramite mix design). Data la variabilità dei materiali impiegabili e delle loro proporzioni, l'analisi degli impatti va condotta caso per caso applicando la metodologia LCA. A titolo indicativo, per un calcestruzzo ordinario è possibile considerare un range per le emissioni climalteranti di 240 – 310 kgCO2eq e un intervallo di 1000-2000 MJ per il consumo energetico.

Di seguito si riportano alcuni dettagli relativi alle diverse fasi realizzative.

4.2.2.1 Produzione in impianto

Indipendentemente dal tipo di calcestruzzo prodotto, le componenti principali di un impianto di betonaggio sono:

- tramogge di stoccaggio degli aggregati e delle diverse materie prime;
- silo dei cementi;

- elementi di trasporto delle materie prime verso il mescolatore (nastri trasportatori, skip, vagonetti, ecc.);
- sistema per il pompaggio dell'acqua;
- bilance, per pesare con precisione le quantità di inerti, cemento, acqua e additivi;
- mescolatori statici (orizzontali bialbero o verticali epicicloidali) che omogeneizzano la miscela.

Gli impianti di betonaggio si distinguono principalmente in:

- a secco, dove la funzione di miscelazione è demandata all'autobetoniera;
- con dosaggio a umido, dove tutti i componenti sono miscelati prima del trasferimento in autobetoniera.

Essi possono essere:

- fissi, per cantieri permanenti - offrono maggiore stabilità e capacità produttiva;
- mobili – offrono flessibilità e velocità di installazione.

Non richiedendo fonti di calore, gli impatti legati alla produzione del calcestruzzo sono tutti di tipo energetico.

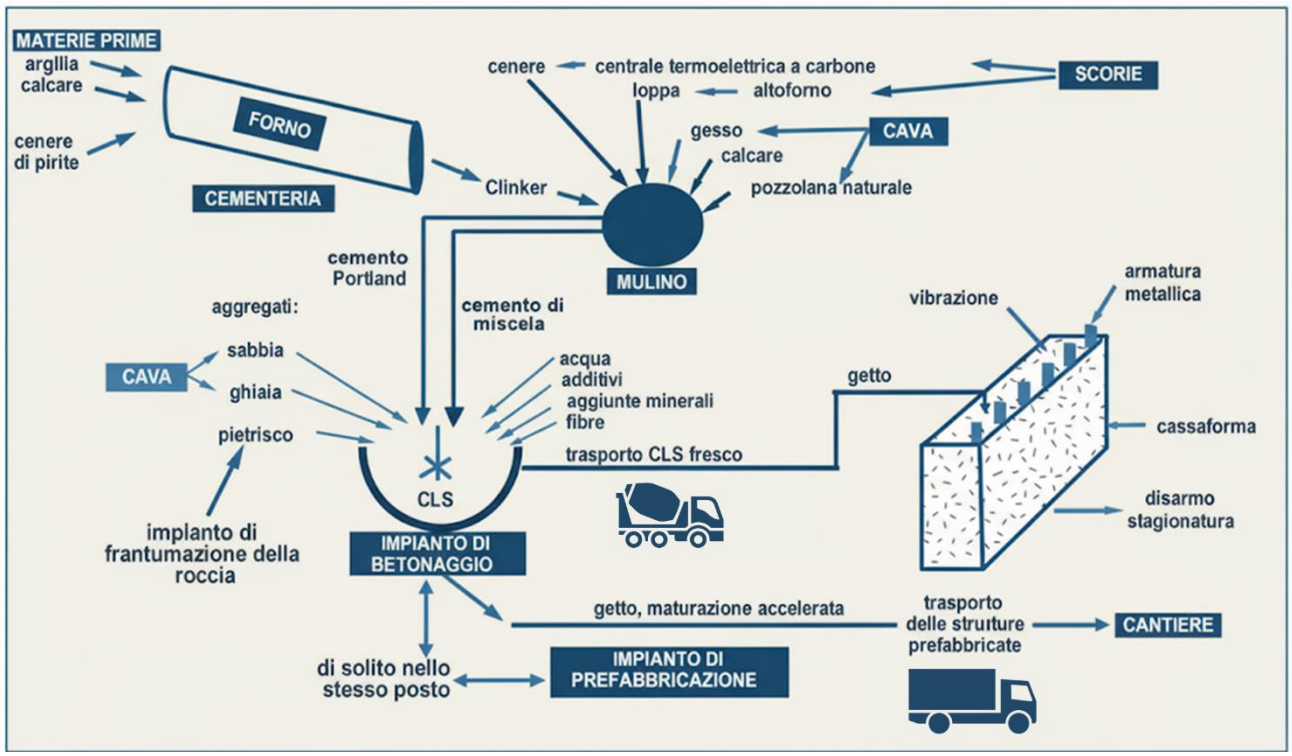


FIGURA 12. FLUSSO DEL CEMENTO.

4.2.2.2 Trasporto

Il trasporto del calcestruzzo dall'impianto al cantiere avviene tramite l'utilizzo di autobetoniere dedicate, caricate per gravità (caduta). Si distinguono tre tipi di betoniere (4 – 12 m^3 di capacità):

- ad asse verticale;
- ad asse orizzontale;
- ad asse inclinato (inclinazione inferiore a 20°), le più comuni.

Oltre al trasporto, le betoniere svolgono anche la funzione di impastare e miscelare i componenti del calcestruzzo (per il rifornimento da impianti a secco) e/o comunque di tenerli in movimento tramite la rotazione del tamburo, per evitare la sedimentazione e garantire omogeneità e qualità. Inoltre, alcune betoniere sono dotate di accessori per il lavaggio del tamburo e per lo scarico a distanza.

4.2.2.3 Getto

Il getto del calcestruzzo all’interno dei casseri si effettua tramite gru munita di benna oppure tramite pompaggio. Allo scopo di distribuire correttamente gli aggregati e garantire la fluidità del calcestruzzo all’interno dei casseri, il CLS viene sottoposto ad operazioni di vibrazione. Le molteplici superfici di contatto tra gli aggregati, infatti, sviluppano delle sollecitazioni di attrito e la vibrazione ha l’effetto di ridurle o annullarle, consentendo l’adeguata lavorabilità e di ridurre il contenuto d’acqua (a vantaggio della resistenza). Inoltre, la vibratura determina anche il costipamento, mentre l’aria viene espulsa. A seconda del caso, si utilizzano tipi differenti di vibratori:

- esterni, fissati sulle casseforme di acciaio che fungono quindi da membrane vibranti;
- superficiali (tavole, travi, aste vibranti, oppure vibrofinitrici); lo spessore del calcestruzzo interessato è compreso tra i 10 e i 20 cm e sono indicati per solette, pannelli, etc.;
- interni (pervibratori), costituiti da aghi vibranti di 40 – 80 cm introdotti e spostati manualmente.

La fase di getto è pertanto contraddistinta da un relativamente basso consumo energetico ed è particolarmente influenzata dall’altezza di getto (maggiore altezza richiede maggiore energia di pompaggio), dalla logistica complessa e dall’utilizzo di pompe in continuo su lunghe distanze orizzontali (>100 m).

Nel caso specifico delle pavimentazioni in CLS, queste sono molto spesso realizzate tramite l’utilizzo di macchine a casseforme scorrevoli (slipform) che consentono la formazione continua della sovrastruttura. Tale metodo offre diversi vantaggi, come l'accelerazione dei tempi di costruzione e la possibilità di ottenere una maggiore precisione costruttiva. In questo caso, gli impatti sono legati principalmente al consumo di carburante per il funzionamento della macchina.

4.2.2.4 Fase di presa e stagionatura

Nella fase di presa e indurimento, il calcestruzzo emana calore in virtù delle reazioni chimiche di natura esotermica legate all’idratazione che portano al raggiungimento di temperature pari a 50 – 60 °C. Per garantire una presa ottimale ed evitare problemi come la formazione di fessurazioni dovute al ritiro, è importante proteggere il calcestruzzo dall'evaporazione dell'acqua di impasto mediante opportune tecniche di stagionatura come la bagnatura, la copertura con teli umidi o l'uso di agenti di maturazione (*curing*, a base d'acqua, di solvente o composti chimici polimerici). In funzione dei prodotti utilizzati, gli impatti al metroquadro di calcestruzzo trattato possono cambiare notevolmente.

4.2.3 Calcestruzzo prefabbricato

La tecnologia degli elementi in calcestruzzo prefabbricato si basa sulla produzione in fabbrica di componenti strutturali (pilastri, travi, lastre, pannelli, barriere, pozzetti, canali, tubi, etc.) che sono poi assemblati in cantiere per formare l'opera. Questo processo permette di ridurre i tempi di costruzione, migliorare la qualità e la precisione costruttiva, nonché aumentare la velocità delle operazioni.

Dal punto di vista ambientale, i principali benefici della prefabbricazione sono correlati a:

- minore spreco di materiale in cantiere (avanzi di produzione);
- minore trasporto (il calcestruzzo fresco è trasportato in piccoli lotti);
- casseforme riciclabili e non “a perdere”;
- risparmio di energia dovuta alla movimentazione dei diversi materiali e componenti;
- minore movimentazione dell’attrezzatura di cantiere;
- minori tempi di lavorazione.

Rispetto alla realizzazione in opera, i risparmi di emissioni in ambiente e di consumi energetici possono risultare sostanziali.

4.3 Acciai

4.3.1 Composizione e impieghi

Gli acciai possono essere classificati in diverse tipologie in base alla composizione chimica, agli elementi leganti, all’uso e al trattamento termico. I più comuni sono:

- acciai non legati, per i quali i tenori degli elementi di lega rientrano nei limiti indicati dalla UNI EN 10020, prospetto I, distinti in:
  - Basso tenore di carbonio (< 0,25%);
  - Medio tenore di carbonio (0,25-0,6%);
  - Elevato tenore di carbonio (> 0,6%).
- acciai legati, per i quali almeno un limite indicato del suddetto prospetto I è superato (basso legati con elementi di lega in quantità < 5% e alto legati con elementi di lega in quantità > 5%) con:
  - cromo per elevata resistenza alla corrosione (inossidabile);
  - nichel per elevata tenacità e resistenza alle basse temperature;
  - molibdeno per elevata resistenza alle alte temperature;
  - manganese per incrementare durezza e resistenza.

Nel campo delle infrastrutture viarie, gli acciai sono impiegati in molteplici componenti e applicazioni per le loro eccellenti proprietà meccaniche, duttilità, resistenza alla fatica e durata nel tempo. Di seguito si riporta un elenco dei principali usi:

- ponti e viadotti:
  - strutturali (es. S355, S460 secondo norma EN 10025), per travature reticolari, archi, pile e impalcati;
  - ad alta resistenza e basso legame (HSLA), per ridurre il peso;
  - sistemi di ritenuta stradali (guardrail, terminali e attenuatori d’urto, secondo EN 1317), in questo caso zincato, per prevenire la corrosione;
- armature ad aderenza migliorata per calcestruzzo armato, ovvero acciai nervati a basso tenore di carbonio (secondo norma EN 10080, in barre, rotoli o reti elettrosaldate), con piccole quantità di manganese e silicio per migliorare la saldabilità del materiale;
- gallerie e opere di sostegno, compreso centinature e telai di sostegno durante lo scavo, rivestimenti metallici temporanei o permanenti;
- barriere antirumore;
- reti paramassi e barriere fermaneve;
- segnaletica;
- giunti di dilatazione;
- dispositivi antisismici;
- appoggi strutturali;
- tubi, micropali, palancole;
- bulloneria strutturale e tirafondi.

Le Norme tecniche per le costruzioni del 2018 (NTC 18) prevedono che i due tipi di acciaio per il calcestruzzo armato siano il B450C e il B450A.

L’acciaio B450C è laminato a caldo ed è caratterizzato da un comportamento duttile con grandi deformazioni a rottura, risultando così particolarmente adatto nelle strutture che richiedono un comportamento dissipativo durante gli eventi sismici. Esso è prodotto in barre di diametro tra 6 e 40 mm di lunghezza massima 12 metri o, per diametri fino a 16 mm, anche in rotoli.

L'acciaio B450A è trafilato a freddo ed è prevalentemente usato per la produzione di reti elettrosaldate; è caratterizzato da un comportamento poco duttile per cui non può essere usato in strutture dissipative, ma al massimo in elementi secondari. Esso è prodotto in barre di diametro compreso tra 5 e 10 mm.

4.3.2 Produzione

La produzione dell'acciaio è un'attività "*energy intensive*" e comporta l'emissione di GHG in atmosfera sia in forma diretta (processo di combustione nelle diverse fasi del ciclo produttivo), sia in modo indiretto (consumo di energia elettrica).

La produzione dell'acciaio può avvenire attraverso due principali cicli tecnologici, ognuno con caratteristiche, impatti ambientali e impieghi differenti. Essi sono di seguito descritti.

- **Ciclo integrale** (altoforno – convertitore – a caldo) - è il processo tradizionale che utilizza materie prime non rinnovabili quali minerali di ferro (Fe_2O_3, Fe_3O_4) e calcare ($CaCO_3$, per rimuovere le impurità), che sono stoccate e miscelate nei parchi minerali, per poi essere trasferite in impianti di agglomerazione (sinterizzazione) per ottimizzare la granulometria del materiale da caricare nell'altoforno. La fonte energetica è il coke, ottenuto dalla distillazione del carbone; l'altoforno è caratterizzato dalla produzione di acciaio di ottima qualità, con caratteristiche fisico-chimiche costanti, ma necessita di grandi impianti ed è contraddistinto dalle elevate emissioni in ambiente dovute alla combustione del coke. I processi integrali più utilizzati sono il Bessemer, il Martin-Siemens e l'LD (BOF). L'altoforno è comunque un reattore verticale alto fino a 30 – 35 metri, rivestito internamente di materiale refrattario ed è caricato a strati alternati (minerale + coke + calcare + altri elementi a seconda del tipo di acciaio). Dalla base sono insufflati aria calda e ossigeno per avviare la combustione del coke. I prodotti sono ghisa e scorie (loppa d'altoforno). La trasformazione da ghisa in acciaio avviene spesso all'interno del convertitore (BOF - Basic Oxygen Furnace, con una capacitò di 100 – 350 tonnellate), aggiungendo anche rottame metallico freddo (20 – 30%) e calcare. L'ossigeno appositamente soffiato brucia principalmente il carbonio e altri elementi indesiderati, ottenendo così l'acciaio in un tempo di 30 – 45 minuti. I prodotti finali hanno una temperatura di circa 1.600°C. Le scorie di affinamento possono essere utilizzate anche in campo stradale, come, ad esempio, per la formazione di rilevati. Per 1 tonnellata di acciaio (altoforno-convertitore), le emissioni in ambiente sono indicativamente pari a circa 1.800 – 2.500 $kgCO_2eq$ e i consumi energetici a 19.000 – 24.000 MJ.
- **Ciclo secondario** (elettrico ad arco - EAF) - le materie prime sono i rottami ferrosi (riciclaggio di acciaio al carbonio, ghisa o leghe) e il calore è generato da archi elettrici tra elettrodi in grafite e il materiale metallico da fondere. Quando quest'ultimo è stato caricato, gli elettrodi entrano in contatto con i rottami e generano l'arco elettrico, sino a raggiungere almeno i 3.500°C (potenza installata fino a 120 – 150 MW e tensione di 100 – 1000 V). Può essere previsto anche un trattamento di affinazione attraverso l'iniezione di carbone, ferroleghe e fluorspato. L'EAF consente grande controllo sulla composizione dell'acciaio ed è caratterizzato dalla produzione di acciaio di qualità variabile e da minore consumo energetico ed emissioni (principalmente di tipo indiretto, associate cioè alla produzione dell'energia elettrica necessaria per fondere il rottame di acciaio). Inoltre, a differenza dell'altoforno, può essere facilmente interrotto una volta avviato. I prodotti finali sono acciaio liquido e scorie EAF (utilizzabili anche per usi stradali). Per 1 tonnellata di acciaio, le emissioni in ambiente sono indicativamente pari a circa 1.000 – 2.000 $kgCO_2eq$ e i consumi energetici pari a 10.000 – 20.000 MJ.

Il 70% dell'acciaio globale è prodotto tramite altoforno. A livello europeo, la produzione proveniente da acciaio riciclato con la tecnologia a forno elettrico raggiunge il 39%. In Italia, l'impiego dell'altoforno è in declino grazie al passaggio ai forni elettrici ad arco e la maggior parte della produzione (circa 85%) avviene mediante l'utilizzo di rottame.

4.3.3 Lavorazione e trasformazione

Le emissioni di CO_2eq inerenti alle attività di lavorazione e trasformazione dell'acciaio (laminazione, forgiatura, ecc.) sono essenzialmente dovute all'utilizzo di energia per il riscaldamento dei forni o per il trattamento termico.

Si riportano, in **Tabella 13**, alcuni valori indicativi relativi ai vari processi.

TABELLA 13. VALORI INDICATIVI DELLE EMISSIONI CARBONICHE E DELL'ENERGIA PER VARI PROCESSI DI LAVORAZIONE.

Processo	Emissioni CO_2eq (kg/t)	Energia (MJ/t)
Laminazione a caldo	150 – 350	2.500 – 4.500
Laminazione a freddo	250 – 450	3.500 – 5.500
Trafilatura	300 – 500	2.000 – 4.000

4.4 Terre e materiali granulari

Dal punto di vista delle emissioni in ambiente e dei consumi energetici medi è difficile dare delle indicazioni a causa della scarsa bibliografia e di EPD presenti sul mercato. Di seguito, oltre alla descrizione dei diversi materiali e processi produttivi, si riporta solo dove possibile i relativi valori di riferimento. Si lascia ai diversi portatori di interesse l'eventuale calcolo dell'LCA del processo produttivo.

4.4.1 Terre

In Italia sono definite "terre" le rocce sciolte o frammentate, incoerenti o che divengono tali in seguito al contatto più o meno prolungato con l'acqua; oppure, anche, l'insieme di grani naturali minerali e organici, separabili con debole azione meccanica, provenienti da scavi o da cave, dai quali il materiale venga trasferito al cantiere senza particolari operazioni di selezione, salvo l'eventuale passaggio su un vaglio sgrossatore. Si attribuisce la medesima denominazione al materiale ottenuto per miscelazione di due terre o di una terra ed un aggregato naturale. La definizione di "terra" evidenzia una specificità di origine, composizione e utilizzo che la rende differente dall'aggregato e dalle miscele granulari di cui al successivo paragrafo 4.4.2. Le terre, nel relativo ambiente naturale, assumono la denominazione di "terreno".

Le caratteristiche fisiche e meccaniche intrinseche di una terra ne determinano un utilizzo per la formazione del corpo di rilevati di infrastrutture di trasporto, sino allo strato sommitale, denominato sottofondo.

Qualora le terre "tal quali" risultassero non idonee all'impiego, può essere valutata la possibilità di sottoporle a correzione granulometrica, miglioramento o stabilizzazione. La correzione di una terra consiste nella sua integrazione con altra terra, di idonea composizione, o aggregato naturale, in modo che la miscela possegga requisiti che ne permettano un idoneo utilizzo. Il miglioramento di una terra si sostanzia nel suo trattamento con legante (idraulico, aereo o entrambi), al fine di incrementarne le caratteristiche geotecniche e/o facilitarne il costipamento, senza tuttavia modificarne le caratteristiche granulari; si tratta di un intervento che può essere destinato alla realizzazione di piste di cantiere, bonifiche del piano di posa dei rilevati, costruzione del corpo dei rilevati. La stabilizzazione di una terra consiste nel suo trattamento con legante (idraulico, aereo o entrambi, oppure bituminoso) con l'obiettivo di raggiungere resistenze meccaniche durevoli anche a seguito di prolungata immersione in acqua; si tratta di un intervento che può essere impiegato in opere di bonifica, formazione di strati del corpo stradale, o (più raramente) nella realizzazione di strati profondi della pavimentazione.

Il ciclo delle terre comincia dalle operazioni di scavo, da eseguirsi in cava di prestito, o in cantiere. Nel primo caso viene eseguito uno scasso con attrezzature meccaniche, quali martelli demolitori, cunei idraulici espansivi o esplosivo in funzione della consistenza della roccia da cui ricavare il materiale da destinare all'impiego. Nel secondo caso si effettuano operazioni di smacchiamento generale (taglio di alberature e arbusti, rimozione di ceppaie ecc.), scoticamento (asporto della coltre di terreno vegetale), sbancamento, scavo a sezione ristretta, con apripista (dozer), ruspa, escavatore, pala meccanica.

Il materiale è quindi soggetto a trasporto in deposito provvisorio, in deposito definitivo o nel luogo di impiego; il trasporto è realizzato normalmente, in funzione delle quantità da movimentare, con escavatori, pale meccaniche, autocarri o dumpers.

La terra non è sottoposta ad operazioni di frantumazione o selezione, eccezion fatta per una eventuale sgrossatura con vaglio. Se idonea all'utilizzo è indirizzata al sito di impiego, ove viene stesa per strati successivi, normalmente di spessore costante, previa omogeneizzazione durante le fasi di spostamento e applicazione, adoperando pale meccaniche, ruspe, livellatrici. Se richiesto per l'ottimizzazione delle proprietà meccaniche, alla terra va aggiunta acqua, trasportata mediante autobotte, sino a raggiungere il contenuto d'umidità utile a garantirne il massimo addensamento. Il

costipamento allo scopo effettuato è eseguito utilizzando rulli a piedi costipanti ed a segmenti (terre fini coesive), rulli a griglia (rocce tenere), rulli lisci vibranti (terre granulari), rulli gommati (terre fini, granulari e detritiche), rulli lisci statici (finitura degli strati compattati con rulli a piedi o gommati).

4.4.2 Materiali granulari non legati

Si definisce “materiale granulare” un insieme costituito da granuli di origine diversa, o depositi antropici o accumuli di materiale di riporto o di scarto per i quali sia ammesso il recupero nella costruzione di infrastrutture (UNI 11531-2). Più nello specifico, la Norma UNI 11531-1 precisa che una “miscela granulare” può essere costituita da “materiale granulare” assortito, composto da uno o più tipi di “aggregati” conformi a UNI EN 13242, quindi di origine naturale, artificiale o di riciclo. A differenziare la terra dall’aggregato è il fatto che quest’ultimo, potenzialmente di varia provenienza, sia ottenuto da un trattamento che va al di là della semplice sgrossatura e che invece contempla frantumazione e/o selezione mediante classificazione dell’inerte in pezzature.

Le miscele granulari sono utilizzate nella realizzazione di pavimentazioni stradali, con particolare riferimento alla formazione di strati di fondazione e di base.

Il processo di confezionamento delle miscele granulari non legate è affine a quello delle terre (cfr. par. 4.4.1), da cui si differenzia per l’impegno di alimentatori (tramogge) destinati al caricamento degli aggregati e, successivamente, di macchine per la frantumazione che consentono di ridurre la dimensione alla pezzatura desiderata, al fine di poter realizzare la miscela richiesta. I frantoi possono essere classificati in:

- primari, per la frantumazione delle rocce più consistenti e abrasive;
- secondari, anche detti granulatori, per aggregati poliedrici;
- mulini ad urto secondari, per ridurre la pezzatura dell’aggregato;
- mulini ad urto terziari (come i secondari, ma per aggregati di media dimensione).

I frantoi si differenziano anche per la modalità di trattamento dell’inerte (a mascelle, a cono, ad urto con rotore con martelli o barre in rotazione ad alta velocità). I frantoi, infine, possono essere fissi o mobili. Per selezionare l’aggregato in frazioni granulometriche si ricorre a vagli, che possono distinguersi in:

- rotanti a secco (per aggregati sporchi e inquinati);
- lavatrici rotanti (per aggregati sporchi di fango e melma);
- a vibrazione libera circolare (per la prevagliatura secondaria);
- orizzontali (per una maggiore versatilità);
- vibranti unidirezionali (in presenza di umidità/acqua);
- drenanti (per eliminare acque in eccesso).

A sussidio del trattamento dei materiali granulari si possono utilizzare nastri trasportatori e coclee per la movimentazione degli aggregati, separatori magnetici per allontanare i materiali ferrosi inquinanti, impianti di lavaggio.

Il trasporto della materia prima da trattare avviene su strada con autocarri mentre all’interno di impianti/cantieri con autocarri, dumpers, escavatori, pale meccaniche. Gli stessi mezzi sono coinvolti nella fase costruttiva. La miscela granulare è stesa per strati successivi, normalmente di spessore costante e ridotto (per l’ottimale costipamento), adoperando pale meccaniche, ruspe, livellatrici. Se richiesto per l’ottimizzazione delle proprietà meccaniche, alla miscela va aggiunta acqua, trasportata in cantiere mediante autobotte. Il costipamento è eseguito utilizzando rulli lisci vibranti, statici o gommati.

La realizzazione di strati di materiale granulare non legato determina impatti sull’ambiente non diversi da quelli correlati alle terre, con l’aggravante determinata dalla necessità di coinvolgere nel ciclo produttivo alimentatori, frantoi e vagli. Ne conseguono un significativo consumo energetico e una notevole emissione di polveri, che vengono abbattute mediante lavaggio, cannoni nebulizzatori, barriere. D’altro canto, la produzione di miscele granulari può avvenire utilizzando aggregati artificiali e di riciclo, con riduzione degli impatti altrimenti determinati dal relativo smaltimento;

devono però essere adoperati tutti gli accorgimenti necessari ad impedire l’eventuale inquinamento ambientale correlato con la loro provenienza e composizione. Al contempo si riducono gli impatti sugli ecosistemi e sul paesaggio determinati dal mancato prelievo di roccia in cave di prestito.

4.4.3 Miscele granulari stabilizzate

Le miscele granulari stabilizzate sono costituite da materiale granulare trattato con legante, al fine di ottenere, a seguito di idonea maturazione, una resistenza meccanica durevole nel tempo anche in condizioni di prolungata immersione in acqua. Gli aggregati che compongono le miscele possono essere di origine naturale, artificiale e di riciclo, ai sensi della UNI EN 13242. I leganti possono essere idraulici, aerei o, in alcune specifiche applicazioni, di tipo idrocarburico. Gli utilizzi più comuni delle miscele granulari stabilizzate con legante sono:

- piani di posa di rilevati, strati di rilevato, sottofondi, strati di fondazione stabilizzati con cemento;
- sottofondi stabilizzati a calce o calce + cemento;
- fondazioni stabilizzate con cemento (qualificato ai sensi del Regolamento 305/2011/CPR) ed emulsione bituminosa (sovrastabilizzata ai sensi di UNI EN 13808) o, in alternativa, bitume schiumato;
- strati di fondazione o di base in misto cementato.

Gli impatti sono legati all’uso dei leganti, dell’acqua e alle macchine.

A titolo indicativo, le emissioni dovute alla produzione di 1 tonnellata di misto cementato in impianto sono pari a circa 40 – 100 kgCO2eq con un consumo energetico di 200 – 400 MJ (escluso trasporto e posa in opera).

Nel caso di stabilizzazione a cemento in situ gli impatti per la realizzazione di 1 tonnellata di misto stabilizzato sono pari a circa 30 – 90 kgCO2eq per la produzione e 200 – 400 MJ per il consumo di energia.

5 Tecnologie per la decarbonizzazione

La crescente esigenza di ridurre l'impatto ambientale delle costruzioni e di promuovere pratiche sempre più eco-compatibili ha spinto con forza il settore, negli ultimi anni, verso lo sviluppo di soluzioni innovative che privilegino l’impiego di materiali a basso impatto e di tecnologie in grado di minimizzare le emissioni lungo tutta la filiera realizzativa.

L’innovazione ha riguardato, parallelamente, le prestazioni e la durabilità delle infrastrutture, in quanto garantire una lunga vita utile e una minore necessità di manutenzione contribuisce in modo determinante alla sostenibilità delle opere e alla salvaguardia dell’ambiente.

L'uso di materiali riciclati e di tecnologie a basso impatto si inserisce altresì in un più ampio quadro di economia circolare, volto a favorire l’utilizzo delle risorse e a ridurre l’approvvigionamento di materie prime.

L'integrazione di materiali e tecnologie a ridotta emissione e alta durabilità rappresenta dunque una sfida e al contempo un'opportunità per la decarbonizzazione delle infrastrutture stradali.

Nelle parti che seguono vengono descritte alcune soluzioni low carbon, relative alle pavimentazioni, ai rilevati e alle opere d'arte. Buona parte di esse sono di uso già diffuso e consolidato; altre si limitano, per il momento, ad applicazioni di tipo sperimentale.

5.1 Pavimentazioni

Il settore delle pavimentazioni stradali sta affrontando una trasformazione significativa verso la sostenibilità ambientale e l'efficienza economica. La crescente consapevolezza dell'impatto ambientale delle infrastrutture di trasporto ha spinto la ricerca verso materiali e tecnologie innovative che coniughino prestazioni elevate con una ridotta impronta carbonica.

Le pavimentazioni tradizionali in conglomerato bituminoso, pur garantendo standard qualitativi consolidati, presentano criticità legate all'elevato consumo energetico durante la produzione, alle emissioni di CO_2 e all’eventuale limitata durabilità nel tempo. Queste problematiche si traducono in costi ambientali ed economici significativi, considerando la necessità di interventi di manutenzione frequenti e il consumo di risorse naturali non rinnovabili.

L'evoluzione tecnologica ha portato allo sviluppo di soluzioni innovative che includono leganti ad alte prestazioni, materiali *bio-based*, materiali riciclati, tecnologie di produzione a temperature inferiori e sistemi di pavimentazione modulari. Tali soluzioni, usate anche in combinazione tra loro, permettono potenzialmente di ridurre le emissioni di gas serra fino al 40 – 60% rispetto alle tecnologie convenzionali, garantendo allo stesso tempo un’adeguata vita utile delle infrastrutture.

5.1.1 Bitumi modificati “convenzionali” e ad elevato tenore di polimeri

L’uso dei bitumi modificati consente un miglioramento delle prestazioni meccaniche delle miscele rispetto a quelle prodotte con bitumi tradizionali, che si traducono in maggiore resistenza al fenomeno dell’ormaiamento ad alte temperature, maggiore resistenza alla fatica a temperature intermedie e maggiore resistenza alla fessurazione termica a basse temperature. Inoltre, risultano migliorate anche le proprietà adesive del legante e la resistenza all’invecchiamento, con conseguente incremento della durabilità della pavimentazione. Rispetto ai bitumi tradizionali, i bitumi modificati sono altresì meno suscettibili alle variazioni termiche (caratteristica da cui deriva il miglioramento delle prestazioni), ma necessitano di temperature di lavorazione più elevate. Il bitume modificato si pone così come compromesso tra un bitume tradizionale (facilmente lavorabile ma prestazionalmente limitato) e un bitume “ideale” (lavorabilità e prestazioni ottimali).

I polimeri sono macromolecole formate da monomeri ripetuti in catene o cluster. La sequenza e la struttura chimica dei monomeri determinano le proprietà del polimero che ne risulta. Tipicamente, la struttura di un polimero può essere lineare, radiale, ramificata o reticolata. In generale, esistono due tipologie di polimeri, i.e., termoindurenti e termoplastici. I polimeri termoindurenti non vengono utilizzati in ambito stradale, in quanto una volta prodotti non possono essere fusi senza subire una degradazione chimica. Al contrario, i polimeri termoplastici diventano lavorabili ogniqualvolta vengono riscaldati, caratteristica che ne facilita l’impiego come agente di modifica dei bitumi. I polimeri termoplastici si dividono a loro volta in due grandi gruppi, i.e., elastomeri e plastomeri. I plastomeri (e.g., etilene-

vinilacetato EVA, polipropilene PP, polietilene PE) determinano un aumento della resistenza ma non migliorano l'elasticità. Al contrario, gli elastomeri come SBS (stirene-butadiene-stirene) e SB (stirene-butadiene), causano un significativo miglioramento dell'elasticità del legante, e per questo sono generalmente preferiti nella modifica dei bitumi stradali.

I polimeri SBS sono ad oggi i più impiegati. Le sue proprietà derivano dalla combinazione tra rigidezza (fornita dai domini di polistirene) ed elasticità (fornita dalle catene di polibutadiene). Il comportamento del polimero dipende dunque sia dal rapporto stirene/butadiene (S/B), sia dalla struttura (lineare o radiale). La modifica del bitume con polimeri SBS avviene attraverso una miscelazione fisica. Alle alte temperature (>100 °C), i domini stirenici si dissociano, facilitando la lavorazione; al raffreddamento, si riformano, creando un sistema continuo all'interno del bitume. Durante tale processo, che risulta reversibile, i domini stirenici assorbono i componenti leggeri del bitume (malteni), causando un rigonfiamento del polimero fino a nove volte rispetto al suo volume iniziale e un certo irrigidimento del bitume. Ne consegue che, per bassi dosaggi di SBS (<5%), il polimero è disperso nel bitume; per dosaggi intorno al 5%, si formano due fasi continue; per dosaggi superiori al 5%, si verifica un'inversione di fase, con il bitume disperso nel polimero.

Tuttavia, i bitumi modificati "convenzionali" presentano alcune criticità, la più importante delle quali è la stabilità allo stoccaggio: alle temperature di stoccaggio, infatti, il polimero e il bitume tendono a separarsi. Tale comportamento può essere mitigato tramite processi di vulcanizzazione, che però comportano reazioni chimiche irreversibili e dunque possono compromettere la riciclabilità del bitume. Un'altra criticità dei bitumi modificati con polimeri SBS è la presenza di doppi legami C=C e di legami a idrogeno (molto reattivi) nel polibutadiene, che rendono il materiale vulnerabile a calore, ossigeno e radiazioni UV.

Per ovviare a tali criticità, sono stati introdotti nuovi polimeri stirenici con elevato contenuto di gruppi vinilici nel polibutadiene. In questi polimeri, i doppi legami C=C del polibutadiene si trovano nelle catene laterali invece che nella catena principale. Di conseguenza, in caso di ossidazione o esposizione a calore o raggi UV, vengono attaccate solamente le catene laterali del polibutadiene, mentre la catena centrale resta integra. Inoltre, a parità di peso molecolare, il polimero risulta più corto, il che favorisce la compatibilità con il bitume base e riduce la viscosità del bitume modificato. La compatibilità tra bitume e polimero è ulteriormente favorita dall'elevata reattività dei polimeri ad elevato contenuto di gruppi vinilici, che induce anche alcune reazioni chimiche tra polimero e bitume ("*grafting*"). Tali polimeri stirenici ad alto contenuto vinilico consentono un aumento del dosaggio di polimero all'interno del bitume fino al 7÷9%, dando origine ai cosiddetti HiMA (*highly modified asphalt*) o HPMB (*highly polymer-modified binders*).

TABELLA 14. PRINCIPALI PROPRIETÀ DEI POLIMERI SBS.

Nomenclatura del polimero	L-SBS	HV-SBS	DB-SB	B-SBS
Nome del grado	D1101	D1192	D0243	D1184
Struttura	Lineare	Lineare	Lineare	Ramificato
Tipo di polimero	Triblock	Triblock	Diblock	Triblock
Contenuto di Diblock (%)	<15	<15	>75	<15
Rapporto stirene/butadiene	≈30/70			
Contenuto di vinile (%)	≤15	≥30	≥30	≤15
Indice di fluidità: 200°C/5kg, (g/10min)	<1	<1	20	<1
Viscosità in Toluene a 25°C: 25wt% (Pa s)	3 – 5	1,4 – 2,4	0,2 – 0,4	16 – 21

I diversi polimeri stirenici disponibili sul mercato comprendono, tra gli altri, il polimero SBS lineare (L-SBS), il polimero SBS radiale (B-SBS), il polimero SBS a tre blocchi con elevato contenuto di gruppi vinilici (HV-SBS) e il polimero SB a due blocchi (DB-SB). Le principali proprietà di tali polimeri sono riassunte in **Tabella 14**. Si può osservare che i polimeri L-SBS, HV-SBS e DB-SB sono tutti a struttura lineare, mentre il polimero B-SBS è l'unico con struttura radiale. Inoltre, il polimero DB-SB è caratterizzato da un contenuto di SB a due blocchi superiore al 75%, mentre gli altri tre polimeri sono a tre blocchi. Il contenuto di gruppi vinilici è maggiore del 30% per i polimeri HV-SBS e DB-SB e minore del 15% per i polimeri L-SBS e B-SBS. L'analisi di tali polimeri ha evidenziato che il peso molecolare del polimero a due blocchi (DB-SB) è significativamente inferiore rispetto ai polimeri a tre blocchi. Inoltre, i polimeri L-SBS e HV-SBS hanno peso molecolare

simile per via della loro analoga struttura (entrambi lineari e a tre blocchi), mentre il polimero radiale (B-SBS) è quello caratterizzato dal peso molecolare maggiore. I valori del peso molecolare si ripercuotono sulla viscosità del polimero.

La valutazione sperimentale di bitumi modificati con i polimeri prima citati ha confermato che i polimeri ad alto contenuto di gruppi vinilici (HV-SBS e DB-SB) offrono prestazioni meccaniche superiori, migliore stabilità allo stoccaggio, e maggiore resistenza all’invecchiamento e all’ossidazione rispetto ai polimeri SBS “convenzionali” (L-SBS e B-SBS). A tal proposito, è comunque consigliabile l’adozione di tecnologie tiepide (Warm Mix Asphalt, WMA) per limitare la degradazione del polimero durante la produzione del conglomerato bituminoso.

Tuttavia, i bitumi modificati ad elevato tenore di polimeri presentano tipicamente un comportamento reologico complesso, che si avvicina più a quello delle gomme che a quello dei bitumi tradizionali. Inoltre, tali leganti possono avere proprietà adesive inferiori rispetto ai bitumi convenzionali per effetto della predominanza volumetrica del polimero rispetto al bitume. Pertanto, tale aspetto risulta da attenzionare, in quanto potrebbe avere ripercussioni sulle prestazioni delle miscele prodotte con tali leganti. Infine, occorre sottolineare che, per i bitumi modificati ad elevato tenore di polimeri, le condizioni di prova tipicamente considerate per studiare i bitumi modificati “convenzionali” potrebbero non essere sufficientemente aggressive.

5.1.2 Bio-leganti

I bio-leganti, così chiamati in virtù della presenza di componenti rinnovabili al loro interno, sono ottenuti in molti casi come scarti o sottoprodotti industriali, rifiuti di origine vegetale o animale, prodotti nella vita di tutti giorni oppure largamente disponibili in natura. Pertanto, il loro utilizzo contribuisce in genere anche a promuovere i principi dell’economia circolare.

Per essere considerati idonei all’utilizzo nelle pavimentazioni stradali, tali bio-materiali devono possedere alcuni requisiti fondamentali:

- devono essere compatibili con il bitume, se è previsto l’impiego combinato dei due materiali (condizione che risulta generalmente soddisfatta se il bio-materiale è composto da idrocarburi non fossili);
- non devono comportare rischi aggiuntivi per la salute degli operatori o per l’ambiente;
- devono permettere di riciclare la miscela una volta giunta a fine vita;
- devono garantire prestazioni almeno comparabili rispetto ai materiali convenzionali, a fronte di costi analoghi o leggermente superiori (nel breve termine, non sono da escludere costi maggiori alla luce degli investimenti necessari per produttori e/o raffinerie);
- devono essere facilmente reperibili localmente in quantità adeguate;
- devono essere quanto più possibile compatibili con i processi esistenti tipicamente impiegati per i materiali bituminosi;
- idealmente, dovrebbero essere viscosi e adesivi se si vuole conseguire una significativa percentuale di sostituzione del bitume.

I bio-materiali possono essere divisi in due grandi categorie, impiegabili con funzioni diverse:

- bio-oli (liquidi o viscosi a temperatura ambiente);
- bio-materiali solidi.

Tra i primi ricadono i bio-oli derivanti dalla lavorazione del legno da parte delle industrie del legno e della carta, gli oli vegetali (e.g., soia, lino, colza), gli oli da cucina esausti, alcuni bio-oli prodotti a partire dal letame degli animali. Gli oli da cucina esausti sono disponibili in grandi quantità in tutto il mondo e, se non adeguatamente trattati, generano tipicamente seri problemi di inquinamento delle acque. I bio-oli ottenuti dal letame animale hanno invece il vantaggio di non competere con le risorse alimentari o altri materiali destinati al consumo umano. Tuttavia, l’impiego di queste due tipologie di bio-oli su larga scala sembra, ad oggi, piuttosto ambiziosa. Tra i bio-materiali solidi, il più impiegato è sicuramente la lignina in polvere, anch’essa derivante dalla lavorazione del legno nelle industrie del legno e della carta.

Affinché possano essere impiegati all’interno delle pavimentazioni stradali, i bio-materiali grezzi devono tipicamente subire dei pretrattamenti di tipo termico e/o chimico, e.g., pirolisi per i residui del legno e delle piante, esterificazione per gli oli vegetali e gli oli da cucina esausti, liquefazione idrotermica per il letame animale, che possono incidere sui costi del materiale.

In linea di massima, i bio-materiali possono essere impiegati nelle pavimentazioni come agenti modificanti del bitume (≤ 10%), come "*extender*" del bitume (10÷75%) o in alternativa al bitume (≈100%).

Più nel dettaglio:

- se il bio-materiale ha un comportamento simile al bitume, può essere utilizzato come "*extender*" (> 10%) o come diretta alternativa al bitume (100%). Riguardo quest'ultimo caso, occorre sottolineare che difficilmente il mercato e la comunità tecnico-scientifica saranno pronti per questa soluzione nel breve e medio termine. Tuttavia, la completa sostituzione del bitume rappresenta una necessità nel lungo termine, considerate le attuali previsioni sulla raffinazione del petrolio;
- se il bio-materiale è caratterizzato da una bassa viscosità (caso tipico dei bio-oli), può essere usato per ridurre la consistenza del legante come agente flussante, oppure come rigenerante in presenza di fresato (normalmente il dosaggio è minore del 10%);
- i bio-materiali solidi vengono tipicamente impiegati come modificanti, per migliorare una o più proprietà specifiche del legante. Ad esempio, la lignina presenta proprietà antiossidanti che permettono di migliorare la resistenza all'invecchiamento del legante;
- qualora il bio-materiale causi un peggioramento indesiderato delle proprietà del legante, può comunque essere impiegato in combinazione con polimeri o bio-polimeri (da preferire), al fine di ottenere un prodotto finale a ridotto impatto ambientale.

Oggi sono inoltre in fase di sviluppo bio-leganti modificati, da impiegare in alternativa ai bitumi modificati per pavimentazioni soggette ad elevati livelli di traffico (e.g., pavimentazioni autostradali).

In generale, i bio-oli riducono la viscosità e la rigidezza del legante nel quale vengono aggiunti, determinando tipicamente – rispetto al bitume base – un miglioramento delle prestazioni a bassa temperatura e a temperatura intermedia ma anche un simultaneo peggioramento della resistenza all'ormaiamento ad alte temperature. Tale effetto è dovuto essenzialmente alla bassa viscosità tipica dei bio-oli. L'aggiunta di polimeri o bio-polimeri, come la lignina, può compensare gli effetti negativi alle alte temperature. Al contrario, i bio-materiali solidi determinano tipicamente un aumento della rigidezza, che comporta un miglioramento delle prestazioni alle alte temperature, ma al contempo può portare ad un peggioramento della resistenza alla fessurazione a temperature basse e intermedie. In tal senso, l'uso combinato di bio-oli e bio-materiali solidi può potenzialmente fornire effetti sinergistici positivi dal punto di vista delle prestazioni (a fronte, ovviamente, di un aumento della complessità del materiale). Tali effetti si riscontrano normalmente sia a livello di legante sia a livello di miscela.

In alcuni casi, la presenza di bio-materiali (soprattutto bio-oli) può comportare una maggiore suscettività all'invecchiamento per effetto di una marcata perdita in peso (dovuta all'elevato contenuto di acqua tipico dei bio-materiali) e della volatilizzazione di composti leggeri presenti nel bio-materiale. Tuttavia, gli studi più recenti hanno evidenziato che, se il bio-materiale e/o il bio-legante sono opportunamente ingegnerizzati, non emergono particolari problemi in termini di resistenza all'invecchiamento.

L'adesione tra bio-legante e aggregati è un altro elemento da considerare con attenzione, in quanto può risultare alterata per la presenza del bio-materiale stesso. In generale, i bio-materiali sono ricchi di composti contenenti ossigeno, considerati i principali responsabili dell'adesione tra bitume e aggregati. In tal senso, l'elevata polarità dei bio-leganti potrebbe portare a benefici anche in termini di adesione con gli aggregati. Tuttavia, tale aspetto dipende fortemente dalla composizione chimica del bio-legante, e dunque va valutato caso per caso.

L'impiego di bio-materiali può ridurre le emissioni di anidride carbonica CO_2, metano CH_4 e ossidi di azoto (e.g., N_2O), contribuendo così alla mitigazione dell'effetto serra. In aggiunta, va considerato che i bio-materiali derivanti dal legno assorbono CO_2 dall'atmosfera, intrappolandola, permettendo di parlare di carbon footprint negativo.

5.1.3 Plastiche riciclate nei conglomerati bituminosi

I materiali plastici (comunemente noti come "plastiche") sono polimeri sintetici generalmente prodotti per polimerizzazione di monomeri estratti da materie prime naturali a matrice idrocarburica. I monomeri sono unità ripetitive composte, di base, da lunghe catene di atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno, legati tra loro per mezzo di legami covalenti, ai quali si possono aggiungere altre specie chimiche.

La natura non biodegradabile della plastica pone una seria sfida alla sostenibilità, in virtù degli effetti sulla salute umana e degli ecosistemi dovuti al rilascio di inquinanti nell'ambiente. Ad aggravare il problema pesa il basso tasso di riciclo delle materie plastiche, corrispondente a circa il 9% su scala globale[3]. Per la quota parte di materie plastiche non riciclate, il 19% è sottoposto a incenerimento, il 50% a conferimento a rifiuto e il 22%, purtroppo, risulta soggetto ad uno smaltimento incontrollato. Un ulteriore punto di criticità è dettato dalla grande varietà di materiali plastici attualmente in commercio (**Tabella 15**), caratterizzati da un ampio ventaglio di proprietà, che si riflette inevitabilmente sulla composizione della frazione plastica dei rifiuti urbani, rendendo difficoltosa la definizione di un approccio univoco al riciclo.

In Figura 13 è rappresentata la distribuzione media della frazione plastica dei rifiuti urbani[4].

TABELLA 15. PRINCIPALI TIPI DI PLASTICA.

Tipo di plastica	Applicazioni	Punto di fusione o rammollimento (°C)
Polietilene tereftalato (PET)	Bottiglie; contenitori alimentari; packaging	>250
Polietilene ad alta densità (HDPE)	Incarti; tubi flessibili; sedie di plastica; giocattoli; buste	130
Polivinilcloruro (PVC)	Tubi; cavi elettrici; materiali da costruzione; cartelli	100 – 260
Polietilene a bassa densità (LDPE)	Vassoi e contenitori; pellicole; sacchetti; contenitori per alimenti	110 – 120
Polipropilene (PP)	Tubi; sedie; contenitori riutilizzabili; stampi in plastica	160 – 165
Polistirene (PS)	Contenitori alimentari; custodie per CD e DVD; utensili monouso	100 (rammollimento)
Altri (Policarbonati – PC; Acrilonitrile Butadiene Stirene – ABS; …)	Varie	N/A

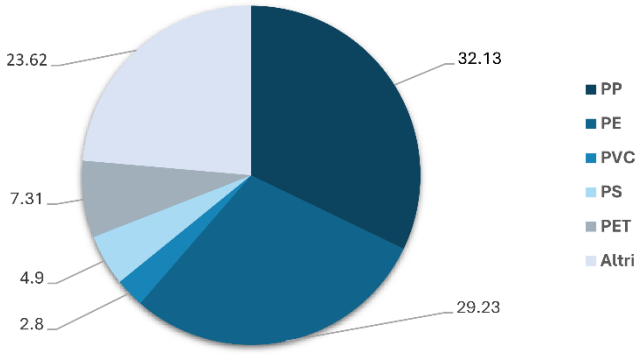


FIGURA 13. COMPOSIZIONE MEDIA DELLA FRAZIONE PLASTICA DEI RIFIUTI URBANI.

Le tecniche tradizionali di riciclo dei rifiuti di natura polimerica includono metodi meccanici (setacciatura, lavaggio, asciugatura, comminuzione, rigranulazione e compounding), chimici (azioni di degradazione delle catene polimeriche) e termici (fusione e riformatura). Tali metodi possono essere applicati con differente efficacia alle varie tipologie di plastiche esistenti. Le criticità relative all'accumulo dei rifiuti plastici, la grande rilevanza dell'industria delle costruzioni nell'economia dei Paesi, il suo impatto sul consumo delle risorse naturali e la spinta degli organi sovranazionali (UE su tutti) verso un modello economico circolare, hanno posto le basi per lo sviluppo di tecnologie di riciclo dei rifiuti polimerici nei materiali da costruzioni. Applicazioni attualmente in fase di studio coinvolgono il confezionamento di

[3] Dati relativi al 2019. Fonte: OCSE – Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico

[4] Dati relativi al 2020. Fonte: EPA – Environmental Protection Agency, Stati Uniti

calcestruzzi (in parziale sostituzione degli aggregati o come fibre da addizionare alla matrice cementizia) e la produzione di conglomerati bituminosi.

Nell’ambito delle costruzioni stradali, è importante sottolineare che l’utilizzo di plastiche vergini come modificanti dei leganti bituminosi rappresenta una pratica ben consolidata da decenni nella tecnica di settore, con la produzione dei cosiddetti bitumi modificati (PMB – *Polymer modified bitumen*). In questo contesto tecnologico, l’utilizzo di plastiche di riciclo può dunque portare a diversi benefici, quali la riduzione del volume di rifiuti da dover destinare alla discarica, l’abbattimento dei costi di produzione di bitumi modificati dato dal minor costo delle plastiche di riciclo rispetto quelle di primo impiego, il miglioramento delle prestazioni dei conglomerati bituminosi in cui sono incluse.

Dai dati ottenuti da analisi LCA, risulta evidente, qualora l’utilizzo di conglomerati bituminosi modificati con plastiche di riciclo non comporti una sensibile differenza in termini di spessori degli strati della pavimentazione e di durata della vita utile, la necessità di quantificare i benefici del mancato conferimento a rifiuto delle materie plastiche al fine di poter osservare un miglioramento dell’impronta ambientale del materiale a matrice bituminosa. Nel caso in cui la diversa prestazione del materiale comporti anche una netta variazione in termini di spessori degli strati della sovrastruttura stradale, determinati in fase di progettazione strutturale della pavimentazione. anche limitando l’analisi alle sole fasi di produzione e costruzione (cradle to gate), il guadagno ambientale che si osserva risulta netto.

Un altro aspetto di primaria importanza nelle valutazioni circa l’impiego di tali materiali è quello relativo all’estensione delle fasi del ciclo vita considerate. Come mostrato in diversi studi, se da un lato la scelta di conglomerati bituminosi modificati con polimeri di riciclo risulta vincente rispetto a quelli prodotti con polimeri commerciali di primo impiego, dall’altro la loro produzione comporta un maggiore impatto ambientale; di conseguenza, solo un diverso approccio all’analisi LCA tale da includere le fasi di uso e smaltimento (*cradle to grave*) può evidenziare la diversa organizzazione delle attività di manutenzione e riabilitazione dettata dalla diversa prestazione in opera offerta dal materiale.

E’ opportuno altresì precisare che le proprietà delle plastiche di riciclo mostrano una maggiore variabilità rispetto alle plastiche vergini, anche per la stessa classe di materiale, in funzione della fonte primaria dalla quale esse sono state generate. Tale variabilità può impattare sulle caratteristiche prestazionali e la risposta in opera dei conglomerati bituminosi.

I materiali plastici (vergini e di riciclo) possono essere introdotti all’interno dei conglomerati bituminosi operando sia alla scala del legante sia alla scala della miscela.

Nel caso in cui le plastiche di riciclo siano impiegate per la produzione di leganti bituminosi modificati, il polimero è miscelato all’interno del bitume preventivamente riscaldato ad elevate temperature, tipicamente tra i 160 °C e i 180 °C, in percentuali in massa che possono arrivare fino a un massimo del 6%-10%. Questa tecnologia, nota come “*wet process*”, è generalmente finalizzata a ottenere una fase bituminosa omogenea. Per questa tipologia di processo sono comunemente impiegate plastiche di riciclo a basso punto di fusione, come il polietilene (PE, con temperatura di fusione compresa tra i 100 °C e i 140 °C) e il polipropilene (PP, con temperatura di fusione compresa tra i 160 °C e i 165 °C). Risulta altresì necessario che gli agenti modificanti non siano inquinati da polimeri ad alta temperatura di fusione, come per esempio il PET, il PVC e il PS o da altre impurità, come carta e metalli, per assicurare la totale integrazione del polimero nella miscela. Un ulteriore parametro di interesse è la viscosità della plastica alle alte temperature, in quanto questa può influenzare il livello di dispersione del modificante nel bitume. Infine, un aspetto da considerare riguardo a questo tipo di processo è quello relativo alla compatibilità tra polimero e legante che, nel caso di materiali semicristallini come PE e PP, potrebbe comportare una separazione delle fasi se non opportunamente trattati durante la produzione.

Nel caso in cui le plastiche siano introdotte direttamente nel conglomerato bituminoso, la loro addizione avviene nell’impianto di produzione nel miscelatore, insieme agli aggregati e al bitume. Questa tecnologia di miscelazione presenta evidenti vantaggi sotto il profilo dei costi e della facilità di applicazione, dal momento che non sono richiesti interventi significativi sugli impianti esistenti. Sulla base delle specificità del materiale plastico utilizzato, esso può andare a sostituire totalmente o parzialmente la fase litica e/o la fase legante, con diversi effetti sulle prestazioni attese in esercizio. Nel caso in cui l’addizione del polimero di riciclo sia finalizzata alla sostituzione della fase litica, risulta particolarmente efficace l’impiego di plastiche amorfe e ad alto punto di fusione, come il PET e l’acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), seppur si possano riscontrare alcune criticità legate alla definizione della distribuzione granulometrica del polimero di addizione. Questa tipologia di processo di produzione è comunemente nota come “*dry process*”. Quando il

processo risulta invece finalizzato ad ottenere una sostituzione della fase legante, si rende necessario l'impiego di plastiche caratterizzate da un punto di fusione inferiore a quello di miscelazione del conglomerato bituminoso. Questa tecnologia è comunemente nota come "hybrid process" o "mixed process".

5.1.4 Conglomerati bituminosi di recupero (RAP)

L'utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP) nelle pavimentazioni costituisce una pratica tecnica diffusa ormai da parecchi anni e molto efficace al fine di ridurre le emissioni di CO_2. I benefici che ne derivano in termini di salvaguardia del territorio e di riutilizzo delle risorse si sommano a vantaggi di natura economica. I principali vantaggi sono:

- Riduzione del quantitativo di rifiuti – i lavori di pavimentazione eseguiti nell'ambito della manutenzione e riqualificazione delle strade porta alla produzione di notevoli quantità di materiale fresato, con conseguenti problematiche relative alla gestione dello stesso.
- Riduzione dell'attività estrattiva dalle cave – il minore fabbisogno di materiale di primo impiego consente di salvaguardare l'ambiente, evitando lo spreco di risorse non rinnovabili con benefici anche sui costi.
- Risparmio di energia – la ridotta attività di estrazione e lavorazione degli aggregati richiede meno risorse energetiche così come la riduzione dei viaggi dei mezzi necessari al trasporto.

I risultati di analisi pubblicati recentemente dalla NAPA[5], mostrano come l'impiego del 50% di RAP può determinare (per le fasi A1-A3) una riduzione del 30% delle emissioni totali associate alla produzione di una tonnellata di conglomerato.

Il riciclaggio dei conglomerati bituminosi provenienti dalle pavimentazioni esistenti può avvenire in diversi modi e con diverse tecniche, come schematicamente rappresentato in **Figura 14**.

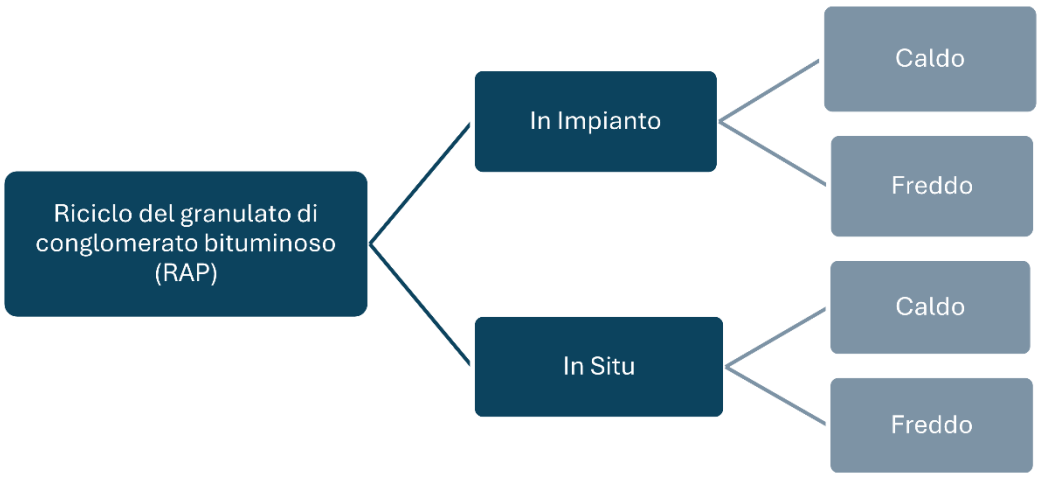


FIGURA 14. TECNICHE DI RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI BITUMINOSE.

5.1.4.1 Riciclaggio in situ

Il riciclaggio in situ delle pavimentazioni stradali può essere realizzato sia con tecnica a caldo che a freddo. Entrambe presentano i loro vantaggi e sono utilizzate in base alle specifiche esigenze del progetto.

Nella tecnica a caldo, il materiale esistente viene riscaldato a temperature elevate, generalmente tra i 140 e i 180°C. Questo processo consente di ammorbidire il conglomerato, rendendolo più facile da lavorare e da mescolare con nuovi leganti e additivi. Una volta riscaldato, il materiale viene fresato e poi riutilizzato per creare una nuova pavimentazione. I vantaggi di questa tecnica includono una buona coesione tra i materiali riciclati e quelli nuovi, oltre a una maggiore

[5] Fonte NAPA – National Asphalt Pavement Association. The Carbon Footprint of Asphalt Pavements (SIP-109), 2024

resistenza e durata della pavimentazione finale. Tuttavia, richiede attrezzature specializzate e può comportare un notevole consumo energetico che può inficiare i vantaggi ambientali complessivi dell’intervento.

La tecnica a freddo, invece, non prevede il riscaldamento del materiale. In questo caso, il fresato viene mescolato con leganti a freddo, come bitume schiumato oppure emulsioni bituminose o leganti polimerici, direttamente in situ. Questa tecnica è meno energivora e può essere utilizzata in condizioni climatiche più variabili, poiché non è influenzata dalla temperatura. Tuttavia, la coesione tra i materiali riciclati e quelli nuovi può essere inferiore rispetto alla tecnica a caldo, il che potrebbe influire sulla durata della pavimentazione. È più frequentemente impiegata per il rifacimento o il consolidamento di strati inferiori delle pavimentazioni.

5.1.4.2 Riciclaggio in impianto

Le tecniche a caldo o a freddo di riciclaggio in impianto delle pavimentazioni stradali sono processi altamente specializzati, che consentono di riutilizzare il materiale bituminoso esistente a vantaggio della sostenibilità e dell'efficienza costruttiva.

Il conglomerato bituminoso di recupero proviene dalla fresatura di pavimentazioni stradali esistenti. Questa operazione viene eseguita con macchinari appositi (fresatrici) che rimuovono lo strato superficiale della strada, ottenendo il cosiddetto fresato. Dal sito di demolizione, questo materiale viene poi trasportato agli appositi siti preposti al conferimento e trasformazione in materia prima secondaria, ovvero il granulato di conglomerato bituminoso. Per una corretta impostazione del mix design, è di fondamentale importanza identificare e qualificare la natura del materiale in termini di granulometria degli aggregati e di caratteristiche del legante invecchiato, in modo che si possa operare la scelta tecnologica e impiantistica più idonea al risultato che si vuole conseguire.

Nel riciclaggio a caldo, il RAP all’impianto viene sottoposto a riscaldamento che può avvenire in varie modalità.

Una prima modalità consiste nel riscaldamento per contatto con aggregati vergini. Essa prevede che il RAP freddo venga aggiunto agli aggregati caldi, che devono quindi essere sovra-riscaldati rispetto alle miscele convenzionali. La quantità possibile da aggiungere è determinata principalmente dalla temperatura degli aggregati caldi e dal contenuto di acqua del RAP. Una seconda tecnica, frequentemente utilizzata, è quella di aggiungere il RAP a freddo direttamente nel mescolatore. Un vantaggio offerto da questa soluzione risiede nel fatto che il vaglio può essere utilizzato per gli aggregati vergini riscaldati, immettendo la frazione fredda nel mescolatore durante la miscelazione. Di contro, la necessità di surriscaldare gli aggregati (anche oltre i 300-350 °C) per garantire la corretta temperatura finale comporta consumi energetici molto elevati, possibili danneggiamenti irreversibili al bitume contenuto nel RAP e al bitume vergine aggiunto in fase di miscelazione, nonché alti livelli di rilascio di COV (*Composti Organici Volatili*) ed emissioni odorigene. Anche per tali ragioni, questa tecnica si rivela non performante se spinta oltre percentuali di fresato del 20 – 25%.

Altre soluzioni impiantistiche consentono invece di anticipare l’ingresso del RAP già nelle fasi di riscaldamento degli aggregati, ovvero nel cilindro essiccatore. In questo caso, il RAP viene introdotto all’interno del cilindro essiccatore attraverso uno specifico ingresso ad anello sul cilindro stesso che permette quindi, completata generalmente la fase di asciugatura del RAP ed iniziato o completato il riscaldamento, di far entrare il RAP in contatto con gli aggregati. In questo modo viene assicurato un più graduale scambio termico tra i componenti con minor produzione di emissioni gassose ed odorigene, una maggior omogenizzazione della miscela e minori dispersioni energetiche. Le percentuali che si possono raggiungere in questo caso arrivano anche al 40 – 50% di RAP riferite alla quantità di materiale inerte riscaldato.

Un’ulteriore modalità consiste nel riscaldamento del RAP in un tamburo separato, appositamente attrezzato. Il fattore chiave è sempre rappresentato dalla temperatura del granulato, che deve essere opportunamente regolata al fine di poter raggiungere la temperatura target finale di miscelazione senza danneggiare eccessivamente la fase legante.

Qualunque sia la modalità seguita, le successive fasi di miscelazione con il bitume, eventuale stoccaggio, trasporto e messa in opera, sono sostanzialmente analoghe a quelle delle miscele a caldo tradizionali.

Nel caso di riciclaggio in impianto con legante a freddo, è possibile il recupero anche fino al 100% di RAP. I vantaggi ambientali sono quelli già segnalati, con assenza di emissioni dovuta al fatto che il processo non coinvolge alcun trattamento termico di riscaldamento. Con tale tecnica si può ottenere un ottimo prodotto da utilizzare per diverse applicazioni, sebbene ad oggi non è ancora tecnicamente in grado di sostituire, anche in termini di domanda, le miscele prodotte a caldo.

5.1.5 Conglomerati tiepidi (WMA)

La tecnologia dei conglomerati bituminosi tiepidi (*Warm Mix Asphalt*, WMA) consente la produzione e la posa in opera di miscele bituminose a temperature inferiori rispetto a quelle tradizionali. L’abbassamento delle temperature è dell’ordine di 30-40 °C (vi sono anche esperienze con riduzioni superiori) e può essere ottenuto con varie modalità e tecniche, come di seguito descritte.

- Schiumatura, attraverso processi a base d’acqua. Si utilizzano, ad esempio, prodotti a struttura microporosa (zeoliti o sabbie) in grado di trattenere elevati percentuali di acqua (umidità), mediamente del 25% per le zeoliti. Durante la miscelazione con aggregati e bitume, l’acqua è rilasciata a causa del calore, generando la schiumatura del bitume per effetto della vaporizzazione. In alternativa, l’acqua può essere iniettata direttamente sul bitume in apposita camera di schiumatura prima della miscelazione con aggregati. La schiumatura del bitume permette la riduzione temporanea della viscosità, facilitando la miscelazione e la successiva stesa a temperature inferiori rispetto ai metodi tradizionali. I bitumi utilizzati solitamente devono essere additivati con agenti schiumogeni per mantenere il giusto contenuto di schiuma necessario per garantire la lavorabilità della miscela. È necessaria un’adeguata compattazione per consentire l’evaporazione dell’acqua e garantire la corretta adesione aggregato-bitume.
- Impiego di additivi chimici, immessi direttamente nel bitume durante le fasi produttive del conglomerato, che riducono la tensione superficiale tra aggregati e bitume (tensioattivi) e garantiscono la relativa adesione (bagnabilità). Ciò consente di abbassare l’energia necessaria per le fasi di miscelazione e compattazione, senza modificare, quantomeno in modo significativo, la viscosità del legante bituminoso. Sono dosati in funzione delle temperature produttive e di quelle ambientali. Per il relativo dosaggio è tuttavia necessaria una relativa pompa di dosaggio che deve essere integrata con il sistema impianto.
- Utilizzo di additivi organici (cere), che agiscono attraverso la riduzione della viscosità del bitume durante la fase di miscelazione, migliorando la lavorabilità della miscela anche a temperature più basse. La tecnologia è adatta soprattutto per climi temperati poiché, se non adeguatamente formulata, può causare problemi di deformazioni permanenti (ormaiamenti) durante i periodi estivi e/o irrigidimenti (fessurazioni termiche) nei periodi invernali. Sono dosati in funzione delle temperature produttive e di quelle ambientali.
- Impiego di leganti bituminosi additivati, attraverso l’utilizzo delle tecnologie sopra menzionate, prodotti direttamente negli impianti di bitume con lo scopo di semplificare le operazioni di produzione del conglomerato. I quantitativi sono fissi (non possono essere modificati durante la miscelazione in funzione delle temperature produttive ed ambientali) e bisogna verificare anche la stabilità allo stoccaggio (in taluni casi la loro capacità può ridursi a causa del riscaldamento in cisterna).

Come riportato in uno studio condotto negli Stati Uniti dalla NAPA, fino al 2018 la tecnologia di schiumatura diretta rappresentava la soluzione più diffusa per la produzione di WMA. Tuttavia, a partire dagli anni successivi, si è osservata un’inversione di tendenza, con una progressiva affermazione degli additivi chimici, che hanno raggiunto una quota di mercato pari al 64%. Al contrario, le tecnologie basate su additivi organici e schiumatura diretta sono rimaste marginali nel tempo, mantenendo un impiego significativamente inferiore (**Figura 15**).

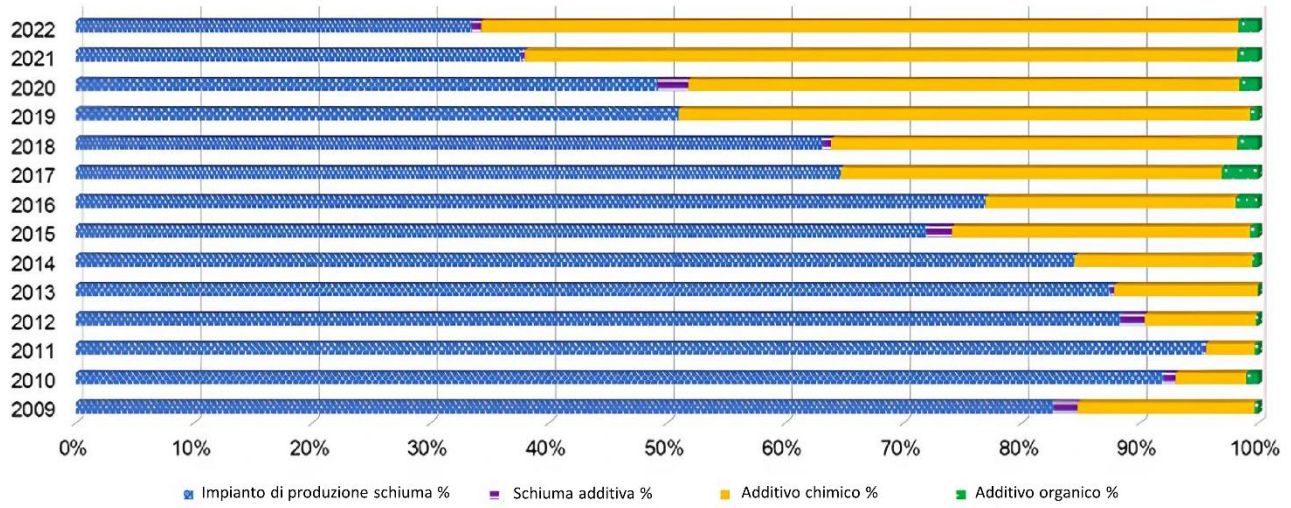


FIGURA 15. PERCENTUALI DI IMPIEGO DELLE DIVERSE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI WMA (2009-2022)[6].

L'impiego delle tecnologie WMA comporta numerosi vantaggi sia dal punto di vista ambientale che operativo. Tra i principali benefici si elencano:

- riduzione delle emissioni atmosferiche e dei consumi energetici durante le fasi di produzione e posa;
- miglioramento delle condizioni di lavoro per gli operatori in cantiere;
- minore invecchiamento del legante bituminoso, con conseguente incremento delle prestazioni a lungo termine;
- riduzione dei tempi di riapertura al traffico, riducendo le casistiche legate alla relativa incidentalità.

Numerosi altri studi hanno inoltre evidenziato che l'impiego dei WMA può facilitare un aumento del contenuto di materiale riciclato nella miscela, contribuendo così ad incrementare la sostenibilità ambientale del processo produttivo.

Le tecnologie dei WMA possono essere utilizzate anche per produrre alle classiche temperature dei conglomerati tradizionali, al fine di conseguire i seguenti vantaggi:

- incrementare le distanze o i tempi di trasporto senza comprometterne la compattazione in situ;
- stendere e compattare le miscele anche in condizioni climatiche sfavorevoli, come durante i mesi più freddi, in cui l'uso dei conglomerati bituminosi tradizionali risulterebbe critico o non praticabile.

La quantificazione dei benefici ambientali associati alle tecnologie WMA risulta complessa; infatti, i risultati riportati in letteratura mostrano una significativa variabilità, legata alle specifiche condizioni operative, ai materiali impiegati e alle metodologie di analisi.

Secondo dati pubblicati dall'*European Asphalt Pavement Association* (EAPA) nel 2022, basati su analisi LCA, l'impiego delle tecnologie WMA, rispetto ai tradizionali conglomerati a caldo, consente di ottenere significativi benefici ambientali, tra cui: riduzione del 24% delle emissioni inquinanti in atmosfera in impianto e stesa; diminuzione del 18% nel consumo di combustibili fossili; riduzione del 10% del potenziale di formazione di smog, abbattimento del 3% del potenziale di riscaldamento globale (GWP).

Secondo i dati di una ricerca condotta dalla già citata NAPA (National Asphalt Pavement Association) nel 2024, l'utilizzo delle tecnologie WMA consente una significativa riduzione delle emissioni di gas serra nella fase di produzione (fase A3). In particolare, per un impianto tipico alimentato a gas naturale, si osserva una diminuzione delle emissioni tra il 9% e il 16%, corrispondente a riduzioni della temperatura di produzione rispettivamente pari a 17°C e 28°C. Questa riduzione si traduce in un abbattimento potenziale delle emissioni complessive "*from cradle to gate*" (fasi A1–A3) compreso tra il

[6] Fonte NAPA – National Asphalt Pavement Association

3,6% e il 6,0%. Va tuttavia osservato che la suddetta analisi non ha tenuto conto delle emissioni associate alla produzione a monte degli additivi utilizzati nelle miscele WMA, che comporterebbero una riduzione di benefici.

Ulteriori studi basati su analisi LCA cradle-to-gate hanno esaminato e messo a confronto gli impatti ambientali di diverse tecniche di produzione WMA (in particolare quelle che utilizzano zeoliti, additivi organici e additivi chimici). L'analisi ha evidenziato che, nel complesso, le tecnologie WMA permettono una riduzione degli impatti ambientali compresa tra il 10% e il 15% rispetto alle miscele a caldo, principalmente grazie alle temperature di produzione più basse. Tra le tipologie di additivi esaminati, le miscele WMA a base di zeoliti hanno mostrato gli impatti ambientali più elevati in tutte le categorie considerate. Al contrario, gli additivi chimici hanno evidenziato i carichi ambientali medi più bassi ma comunque fortemente dipendenti dalla natura dell'additivo.

Analisi LCA secondo un approccio *cradle to grave* su miscele WMA[7], considerando un orizzonte temporale di 20 anni, hanno consentito di valutare l'impatto ambientale al variare della temperatura di compattazione (110 °C, 120 °C, 140 °C) e della percentuale di granulato impiegata (30%, 40%, 50%). Le miscele analizzate utilizzavano un bitume modificato, additivato con un prodotto specificamente formulato per rigenerare il fresato e migliorare la lavorabilità della miscela. I risultati dell'analisi hanno mostrato che le emissioni complessive di gas serra (espresse in CO_2 equivalente) sono influenzate solo marginalmente dalla variazione della temperatura di produzione e compattazione. Questo effetto è attribuibile al bilanciamento tra la riduzione dei consumi energetici a basse temperature e l'aumento del fabbisogno energetico dovuto alla maggiore resistenza alla compattazione, che richiede un lavoro meccanico più intenso da parte delle attrezzature operative di cantiere. Infine, è stato osservato che una miscela contenente il 50% di granulato prodotta a 110 °C consente una riduzione dell'impatto ambientale di circa il 13% rispetto a una miscela con il 30% prodotta a 140 °C, evidenziando il potenziale beneficio ambientale derivante dalla combinazione di alti tassi di riciclo e basse temperature di produzione.

In conclusione, le tecnologie WMA rappresentano un'alternativa valida ai conglomerati bituminosi tradizionali, offrendo vantaggi significativi sia sotto il profilo tecnico che ambientale. Queste tecnologie soddisfano le moderne esigenze di durabilità, efficienza e sostenibilità delle infrastrutture stradali, riducendo l'impatto ambientale e migliorando le condizioni di lavoro, senza compromettere le prestazioni delle pavimentazioni.

5.1.6 Conglomerati a freddo (CMA)

Con riferimento all'utilizzo dei conglomerati bituminosi a freddo (*Cold Mix Asphalt* - CMA), tipicamente per gli strati profondi delle pavimentazioni, è fondamentale distinguere se la relativa produzione avviene in impianto o direttamente in situ. Nel primo caso si rigenera il granulato (anche al 100%) attraverso l'utilizzo di emulsioni bituminose o bitumi schiumati; nel secondo caso, si ricicla direttamente in sito la pavimentazione esistente giunta a fine vita utile, utilizzando sempre emulsioni bituminose o bitumi schiumati. L'aggiunta di cemento in un CMA è opzionale, in funzione della miscela da riciclare e delle prestazioni da raggiungere.

Nel caso di produzione in impianto, il processo produttivo e di posa in opera non si differenzia rispetto a quello dei conglomerati tradizionali a caldo, tranne per il fatto che la miscelazione è eseguita a temperatura ambiente e non vi è il riscaldamento del granulato.

Nel caso del riciclaggio in situ, le lavorazioni si svolgono in più fasi operative che prevedono l'impiego di diverse macchine secondo il seguente processo produttivo:

- demolizione della pavimentazione esistente mediante fresatrice;
- miscelazione del fresato con il legante bituminoso mediante riciclatrice;
- regolarizzazione della superficie di lavoro mediante grader e/o vibrofinitrice;
- compattazione del CMA mediante rulli.

Le operazioni di riciclaggio prevedono anche l'utilizzo dei seguenti mezzi:

- macchina spandi-cemento (nel caso eventuale di aggiunta di cemento nella miscela CMA);

[7] Studio sviluppato presso il Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti dell'Università di Napoli Federico II

- botte dell'emulsione bituminosa per l'aggiunta del legante, oppure botte del bitume e botte dell'acqua per la produzione del bitume schiumato attraverso il sistema dedicato già compreso nella riciclatrice.

Attualmente in commercio esistono anche riciclatrici con banco di stesa integrato per garantire una migliore distribuzione del materiale (il grader non è necessario con tale dotazione).

Gli impatti dovuti alla produzione di 1 tonnellata di CMA in impianto, raffrontati a quelle delle miscele a caldo, possono risultare inferiore anche del 50 – 60% per le emissioni di CO2eq e fino all'80 – 85% per il consumo di energia. Per quanto concerne il riciclaggio direttamente in situ, gli impatti sono ancora più bassi.

5.1.7 Conglomerati drenanti contenenti RAP

Il conglomerato bituminoso drenante si caratterizza per l'alta presenza di porosità interconnessa, in media superiore al 15%. In tal modo, il suo impiego nella realizzazione dello strato di usura è tale da garantire il rapido smaltimento dell'acqua piovana dalla piattaforma stradale. Grazie alla sua struttura porosa, l'acqua viene filtrata attraverso i vuoti e smaltita lateralmente, riducendo sensibilmente il rischio di aquaplaning per i veicoli circolanti. L'elevata porosità dello strato drenante consente, oltre al drenaggio delle acque superficiali, di assorbire parte del rumore generato dal contatto pneumatico-pavimentazione.

Per la natura porosa, il conglomerato bituminoso drenante richiede una manutenzione specifica rispetto ad uno strato di usura chiuso necessitando di interventi periodici di pulizia e manutenzione per evitare l'intasamento dei vuoti e il conseguente decadimento delle prestazioni drenanti. Ne consegue che per ottenere una miscela di conglomerato bituminoso di usura drenante funzionale e duratura è necessario bilanciare con precisione tutte le componenti al fine di ottimizzare le proprietà volumetriche e meccaniche. Tale necessità risulta particolarmente significativa nel caso di miscele drenanti contenenti RAP.

L'utilizzo di RAP nelle miscele drenanti è tecnicamente possibile ma va gestito con attenzione per il controllo della curva granulometrica al fine di non compromettere la porosità, assicurando al contempo una buona compatibilità tra il bitume del RAP e il legante vergine di aggiunta. Evidenze sperimentali dimostrano che l'aggiunta di RAP fino al 20% non compromette la permeabilità e la resistenza meccanica, purché la miscela sia realizzata con bitume modificato ed esista un controllo accurato dell'assortimento granulometrico. Si può riscontrare un leggero calo della permeabilità in presenza di fresato in percentuali superiori al 25%. Tuttavia, con l'impiego di opportuni rigeneranti, si può utilizzare fino al 25% di RAP, mantenendo porosità superiore al 18% e una buona resistenza all'azione del traffico. Risultati relativi a miscele drenanti ad alta porosità con il 15% di RAP, additivate con oli rigeneranti e fibre polimeriche, hanno mostrato un miglioramento della durabilità e una leggera riduzione del rumore da rotolamento rispetto a miscele progettate con materiali interamente vergini.

In generale, buona parte della letteratura sembra indicare una percentuale di reimpiego del RAP nei conglomerati bituminosi drenanti non superiore al 25% al fine di raggiungere prestazioni equivalenti a quelle tradizionali. Viene evidenziata anche la necessità di attuare un preriscaldamento del RAP (ottimale tra 150 °C e 160 °C), in quanto l'inserimento di RAP a temperatura ambiente sembra provocare effetti negativi sulle prestazioni finali del materiale e resistenza all'acqua.

L'utilizzo dei rigeneranti è auspicabile nelle miscele drenanti contenenti RAP per la presenza di bitume ossidato, al fine di aumentare e non compromettere la lavorabilità, nonché la risposta in termini di suscettività all'acqua e resistenza a fatica. In particolare, l'utilizzo di additivi a base polimerica altamente fluidificante sembra apportare un incremento delle proprietà rispetto all'uso di rigeneranti ordinari.

5.2 Rilevati

5.2.1 Stabilizzazione a calce

La stabilizzazione a calce è una tecnica utilizzata per migliorare le caratteristiche meccaniche e la durabilità dei terreni (in particolare quelli limo-argillosi) impiegati nella costruzione di rilevati stradali. Questo metodo prevede l'aggiunta di calce viva o idrata al terreno, con l'obiettivo di modificarne le proprietà fisico-chimiche e renderlo più adatto alle esigenze strutturali delle infrastrutture.

La stabilizzazione a calce sfrutta principalmente l’ossido di calcio (CaO) – o calce viva – come legante. Al contatto con l’acqua il CaO si idrata secondo la reazione:

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + \text{calore}$$

L’idrossido di calcio formato è poco solubile (~1,65 g/L a 20°) e porta la miscela a un pH molto alto (~12,4). In questo ambiente alcalino avviene una rapida flocculazione delle particelle argillose (scambio ionico) e, nel tempo, il silicio e l’alluminio delle argille si solubilizzano e reagiscono con il calcio per formare composti cementanti stabili (calcio-silicato idrati CSH e calcio-alluminato idrati CAH). Tali reazioni, definite “pozzolaniche”, si esplicano nel tempo inducendo nell’aggregato (terreno + calce) la formazione di legami di cementazione secondari. In generale si osserva un miglioramento delle caratteristiche geotecniche dei terreni trattati.

La stabilizzazione a calce è particolarmente efficace per trattare terreni con elevato contenuto di argilla, migliorando la capacità portante del piano di posa dei rilevati stradali e riducendo la sensibilità all'azione dell'acqua e delle variazioni termiche. In particolare, è possibile individuare degli effetti a breve termine ed effetti a lungo termine. I primi sono legati alla riduzione dell'umidità naturale del terreno, alla diminuzione del suo indice di plasticità, al miglioramento della lavorabilità e della compattazione, all’incremento dell’indice di portanza immediata. I secondi si traducono nella formazione di composti cementanti stabili attraverso le reazioni pozzolaniche, nell’aumento del modulo di elasticità del terreno, nell’incremento dei parametri di resistenza al taglio.

Sotto il profilo delle norme ambientali per la gestione delle terre da scavo, valgono le disposizioni del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. (Testo unico ambientale), del DPR 120/2017 (Gestione terre e rocce da scavo) e del D.Lgs. 36/2023 (Codice dei contratti). Nella Relazione di sostenibilità dell’opera, di cui all’art. 11 dell’Allegato I.7 di quest’ultimo (vedasi par. 2.2.2.1), che deve contenere una stima della Carbon Footprint e l’LCA dell’opera, particolare riferimento deve essere fatto al riutilizzo dei materiali da costruzione. Va segnalato che l’uso della stabilizzazione con calce come “normale pratica industriale” è stato oggetto di dibattito normativo (il DPR 120/2017 ha escluso temporaneamente tale pratica dall’elenco delle norme ordinarie), ma l’attuale orientamento consente il suo impiego a condizione di rispettare tutti i requisiti ambientali e di qualità del progetto (Linee Guida sull’applicazione della disciplina delle terre e rocce da scavo – SNPA n.22/2019). Il D.M. 127/2024 (“Regolamento recante disciplina della cessazione di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione, altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell’articolo 184-ter, comma2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152/2006”) e il D.M. 5 agosto 2024 (“Adozione dei criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali (CAM Strade)”), integrano e completano il quadro normativo definendo la disciplina di cessazione della classificazione di rifiuto dei materiali inerti e i criteri ambientali minimi da rispettare nella progettazione e nell’esecuzione di lavori stradali.

Dal punto di vista dei requisiti tecnici, il riferimento normativo principale è la UNI 11531-2:2021 – “Costruzione e manutenzione delle opere civili delle infrastrutture – Criteri per l’impiego di materiali – Parte 2: Materiali granulari e miscele di aggregati legati con leganti idraulici e aerei.” La norma ha lo scopo di fornire istruzioni per l’applicazione in Italia delle varie parti della UNI EN 14227 – “Miscele legate con leganti idraulici”, indicando i valori di riferimento per le caratteristiche prestazionali in relazione a ciascuna destinazione d’uso.

La stabilizzazione a calce dei rilevati stradali può essere considerata un processo ambientalmente sostenibile.

La calce trasforma terreni altrimenti non idonei in materiali adatti alla costruzione delle opere in terra, evitando o comunque riducendo il consumo di risorse naturali non rinnovabili, come ghiaie o sabbie da cava. Il miglioramento delle lavorabilità del terreno indotto dal trattamento con la calce riduce notevolmente anche i tempi di lavorazione rispetto ad altre tecniche, facendo risparmiare energia nei processi di cantiere. La maggiore durabilità nei confronti degli agenti atmosferici (acqua, cicli gelo-disgelo, ecc), comporta una minore richiesta di manutenzione dell’opera, che può tradursi in un minor impatto ambientale nel lungo termine.

La stabilizzazione a calce è inoltre considerata una tecnologia a ridotta carbon footprint. Utilizzando il terreno già presente in loco, si evita (o si riduce drasticamente) il trasporto di materiali di risulta verso le discariche e di materiali vergini da cava verso il cantiere, riducendo di conseguenza la circolazione di mezzi. Questo, oltre ad avere un impatto positivo sulla congestione stradale nei dintorni dell’area di cantiere, produce anche un minor consumo di carburante e di conseguenza può contribuire a generare minori emissioni di CO_2.

Tuttavia, va considerato anche il ciclo di vita della calce, che durante la produzione emette CO_2. Queste emissioni possono essere compensate dai benefici ambientali complessivi del processo sul lungo periodo. La calce stabilizzata assorbe progressivamente CO_2 dall’atmosfera man mano che indurisce (processo di carbonatazione): alcuni studi indicano che, in media, circa il 30 – 35% della CO_2 emessa per produrre la calce viene ri-incamerata durante la sua vita utile.

5.2.2 Stabilizzazione con materiali innovativi e bio-based

La ricerca di soluzioni tecniche sempre più sostenibili ha spinto verso lo studio e lo sviluppo di materiali alternativi bio-based da utilizzarsi per la stabilizzazione delle terre.

Gran parte delle tecnologie presentate in questo paragrafo sono state impiegate solo a livello sperimentale. Il futuro della stabilizzazione delle terre con materiali bio-based appare tuttavia promettente, con numerose ricerche in corso. Questi materiali sono potenzialmente in grado di mantenere o addirittura migliorare le prestazioni tecniche degli stabilizzanti tradizionali, riducendo drasticamente l'impatto ambientale e contribuendo agli obiettivi di economia circolare. Lo sviluppo di materiali ibridi che combinano polimeri bio-based con fibre naturali, ad esempio, hanno mostrato risultati eccellenti in termini di prestazioni e sostenibilità. La biodegradabilità controllata di molti di questi materiali permette inoltre una gestione ambientale ottimale del fine vita delle opere.

Dal punto di vista dei costi, molti di questi materiali sono economicamente vantaggiosi, specialmente quando derivano da scarti industriali o agricoli. La loro disponibilità locale riduce i costi di trasporto e supporta le economie locali.

Tuttavia, esistono anche limitazioni significative. La variabilità delle prestazioni legata alla natura biologica di questi prodotti può rappresentare una sfida per la standardizzazione delle applicazioni. I tempi di presa spesso più lunghi rispetto ai materiali tradizionali possono limitare alcune applicazioni. La sensibilità alle condizioni ambientali come temperatura, pH e umidità richiede un controllo più attento durante l'applicazione.

L’eventuale successo di queste tecnologie, dunque, dovrà necessariamente passare attraverso un approccio integrato che consideri aspetti tecnici, economici e normativi.

La standardizzazione normativa rappresenta, infine, un altro aspetto cruciale per l'adozione diffusa di queste tecnologie. Si rendono tuttavia necessari sia lo sviluppo di standard tecnici specifici che di protocolli di controllo qualità, per facilitarne l'accettazione da parte del mercato e delle autorità competenti.

5.2.2.1 Polimeri bio-based

I polimeri bio-based derivano da fonti rinnovabili come amido, cellulosa, chitosano e alghe. La loro azione si esplica attraverso meccanismi di coesione molecolare e formazione di gel stabilizzanti.

Il poliacrilato di sodio bio-based agisce come super-assorbente, aumentando la coesione del terreno attraverso la formazione di una matrice gelatinosa che intrappola le particelle di suolo. Questo polimero biodegradabile migliora la resistenza a compressione e riduce la permeabilità del terreno, risultando particolarmente efficace per terreni sabbiosi e limosi.

La gomma di guar e altri polisaccaridi naturali formano gel viscosi che agiscono come agenti cementanti biologici. Questi materiali mostrano proprietà di stabilizzazione temporanea, ideali per applicazioni dove è richiesta una stabilizzazione transitoria seguita da processi di consolidamento naturale.

I biopolimeri a base di xantano offrono prestazioni superiori in termini di viscosità e stabilità termica. La loro capacità di formare soluzioni altamente viscose anche a basse concentrazioni li rende economicamente vantaggiosi, mentre la loro origine batterica garantisce completa biodegradabilità.

5.2.2.2 Enzimi

Gli enzimi trovano impiego nella stabilizzazione delle terre, come catalizzatori biologici che accelerano reazioni chimiche naturali nel suolo. Questi biocatalizzatori offrono un approccio sostenibile alla stabilizzazione, lavorando in sinergia con i componenti naturali del terreno.

Le ossidasi catalizzano reazioni di ossidazione che creano legami crociati tra le particelle organiche presenti nel suolo, formando una matrice stabilizzante naturale. Questo processo è particolarmente efficace in terreni con contenuto organico significativo, dove gli enzimi possono trasformare la materia organica in agenti cementanti.

Le ligninasi e altri enzimi di degradazione della lignina possono essere utilizzate per modificare la struttura della lignina presente nei terreni, trasformandola in composti fenolici che agiscono come stabilizzanti naturali. Questo approccio è particolarmente interessante per terreni con elevato contenuto di materiale vegetale decomposto.

Gli enzimi urease-based catalizzano la precipitazione di carbonato di calcio attraverso processi di biomineralizzazione, creando una cementazione naturale simile a quella ottenuta con la calce ma attraverso processi biologici a temperatura ambiente. Questo fenomeno, noto come *Microbially Induced Carbonate Precipitation* (MICP), rappresenta una delle tecnologie più innovative nel campo della stabilizzazione sostenibile.

5.2.2.3 Fibre naturali

Le fibre naturali agiscono come rinforzo distribuito, migliorando la resistenza a trazione del terreno e controllando la formazione di fessure.

Le fibre di juta offrono eccellenti proprietà meccaniche e biodegradabilità controllata. Il loro utilizzo, in combinazione con terreni argillosi, produce significativi miglioramenti della resistenza a compressione e riduzione del rigonfiamento, problemi tipici dei terreni espansivi. La degradazione graduale delle fibre nel tempo permette al terreno di sviluppare una struttura stabile attraverso processi di consolidamento naturale.

Le fibre di cocco presentano elevata resistenza all'umidità e durabilità nel tempo, rendendole ideali per applicazioni in ambienti umidi. La loro struttura lignificata fornisce rinforzo meccanico a lungo termine, mentre la loro biodegradabilità graduale assicura una transizione controllata verso la stabilizzazione naturale del terreno.

Le fibre di bambù rappresentano una soluzione innovativa grazie alla loro elevata resistenza meccanica e rapida rinnovabilità. Trattate con processi di mercerizzazione alcalina, queste fibre sviluppano una migliore adesione con le particelle di terreno, risultando in un incremento significativo della resistenza a trazione del complesso terra-fibra.

5.2.2.4 Materiali di scarto *bio-based*

L'utilizzo di materiali di scarto dell'industria agroalimentare per la stabilizzazione delle terre può rappresentare un perfetto esempio di economia circolare applicata all'ingegneria geotecnica. Questi materiali, disponibili in grandi quantità e a basso costo, offrono proprietà stabilizzanti interessanti dopo appropriati trattamenti.

La cenere di lolla di riso contiene elevate percentuali di silice amorfa che conferisce proprietà pozzolaniche simili a quelle del cemento. Quando utilizzata in combinazione con piccole quantità di calce, sviluppa reazioni di indurimento che migliorano significativamente le proprietà meccaniche del terreno. La sua origine agricola la rende completamente sostenibile e carbon-neutral.

I gusci di noci macinate e altri scarti lignificati agiscono come aggreganti naturali, migliorando la struttura granulometrica del terreno e riducendo la sua plasticità. Questi materiali sono particolarmente efficaci per la stabilizzazione di terreni argillosi, dove riducono il potenziale di rigonfiamento e migliorano la lavorabilità.

La bagassa di canna da zucchero trattata chimicamente sviluppa proprietà leganti attraverso l'attivazione della lignina e della cellulosa presenti nella sua struttura. Questo materiale di scarto può essere utilizzato come parziale sostituto del cemento, riducendo significativamente l'impatto ambientale della stabilizzazione.

5.2.2.5 *Biocementation*

La tecnica di biocementation sfrutta processi biologici per indurre la precipitazione di minerali cementanti all'interno della struttura del terreno. Essa si basa sull’utilizzo di microrganismi specifici per catalizzare reazioni chimiche che producono agenti cementanti naturali.

Il processo più sviluppato utilizza batteri ureolitici che producono l'enzima urease, catalizzando l'idrolisi dell'urea in ammonio e anidride carbonica. In presenza di ioni calcio, questo processo porta alla precipitazione di carbonato di calcio che cementa le particelle di terreno. La tecnica MICP (*Microbially Induced Carbonate Precipitation*) ha dimostrato capacità di migliorare significativamente la resistenza del terreno e ridurre la permeabilità.

I batteri solfato-riduttori possono essere utilizzati per indurre la precipitazione di solfuri metallici, creando una matrice cementante particolarmente resistente. Questo processo è efficace in terreni contaminati da metalli pesanti, dove la precipitazione di solfuri contribuisce anche alla stabilizzazione ambientale.

Le tecniche di *algae-based stabilization* sfruttano la capacità di alcune alghe di produrre polimeri extracellulari che agiscono come agenti cementanti biologici. Questo approccio è particolarmente interessante per la sua sostenibilità, in quanto le alghe possono essere coltivate utilizzando CO_2 come fonte di carbonio, contribuendo alla riduzione delle emissioni GHG.

5.2.3 Materiali riciclati da attività di costruzione e demolizione (CDW)

Secondo recenti dati pubblicati dall'Ufficio statistico dell'Unione europea, le attività legate alla costruzione e demolizione di opere civili sono state responsabili del 37,5 % dei rifiuti totali prodotti all'interno della Comunità Europea[8].

Una parte considerevole dei rifiuti da costruzione e demolizione (CDW – *Construction and Demolition Waste*) risulta ancora destinata al conferimento in discarica; tuttavia, l'utilizzo degli aggregati da CDW sta assumendo un ruolo sempre più rilevante come fonte di materia prima secondaria nel settore delle costruzioni viarie, consentendo una riduzione dell'impatto ambientale legato alla gestione di tali rifiuti, ma permettendo anche di risparmiare risorse naturali e costi di produzione. Ciò anche grazie all'impulso di importanti provvedimenti normativi. Il decreto di recente introduzione del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica recante il regolamento per la disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione (DM n. 127 del 28 giugno 2024), unito all'ancor più recente decreto sui CAM Strade (DM 5 agosto 2024 e DM 11 settembre 2025), mira a promuovere l'uso delle materie prime secondarie nel processo costruttivo e manutentivo delle infrastrutture stradali. In particolare, i CDW sottoposti ad operazione di recupero, cessano di essere qualificati come rifiuti per diventare prodotto come "aggregato recuperato".

La composizione dei rifiuti da demolizione e costruzione è fortemente influenzata da diversi fattori, che variano in base al tipo di costruzione (edificio o infrastruttura), alle tecniche costruttive e ai materiali utilizzati, alla tipologia di intervento (demolizione o manutenzione), alle modalità di raccolta e selezione del rifiuto, alla gestione del cantiere e al contesto geografico e normativo. A titolo di esempio, in un cantiere stradale verranno prodotti grandi quantità di terre, aggregati e conglomerati bituminosi, laddove in un sito di demolizione di opere civili e edili il materiale di risulta sarà composto principalmente da calcestruzzo, malta, gesso e laterizi. La **Tabella 16** riporta la composizione tipica di un CDW.

Gli aggregati di recupero derivanti da rifiuti di costruzione e demolizione trovano impiego principalmente nella formazione di rilevati, sottofondi e di strati di fondazione non legati. Questo loro utilizzo rientra a pieno titolo tra le buone pratiche dell'ingegneria sostenibile, contribuendo in maniera efficace a ridurre i costi e l'eco-impronta dell'industria costruttiva, in termini di potenziale di riscaldamento globale, di depauperamento delle risorse naturali ed energetiche, nonché di rilascio di emissioni inquinanti nei confronti degli ecosistemi acquatici e terrestri (come eutrofizzanti e acidificanti).

TABELLA 16. COMPOSIZIONE TIPO DEI CDW.

Tipo di rifiuto	Minimo – Massimo (%)
Calcestruzzo	12 – 40
Muratura	8 – 54
Conglomerato bituminoso	4 – 26
Altri rifiuti minerali	2 – 9
Legno	2 – 4
Metalli	0,2 – 4
Gesso	0,2 – 0,4
Plastiche	0,1 – 2

[8] https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/eu-construction-demolition-waste-management-protocol-2024-updated

Da un punto di vista strutturale e ambientale, l'impiego degli aggregati di recupero prodotti dai detriti di costruzione e demolizione nel settore stradale è stato avallato sia da studi riguardanti le caratteristiche meccaniche degli aggregati di riciclo che da indagini LCA.

5.2.3.1 Attitudine alla compattazione

In relazione alle loro caratteristiche compositive, gli aggregati da rifiuti CDW presentano densità del secco raggiungibili fortemente influenzate dalla loro natura, con valori elevati nel caso di materiali a matrice litico-cementizia, inferiori qualora la natura sia di origine laterizia o vetrosa. Inoltre, manifestano generalmente una ridotta sensibilità alla variazione del contenuto di acqua rispetto agli aggregati naturali di primo impiego, favorendo le operazioni di compattazione in sito degli strati in cui sono impiegati.

Tuttavia, si è osservato come la tecnica di compattazione possa rappresentare un fattore di criticità, soprattutto in relazione alla possibile tendenza del materiale a frantumarsi per effetto delle sollecitazioni indotte dall'azione costipante. Ciò porta a preferire metodologie vibratorie che consentano una riorganizzazione degli aggregati evitando il rischio di rottura dei granuli a pezzatura maggiore (così come avviene con le metodologie ad impatto che possono, conseguentemente, originare zone a densità disomogenea).

5.2.3.2 Prestazioni meccaniche

Le prestazioni meccaniche delle miscele sono funzione dello stato di addensamento in opera delle stesse e delle caratteristiche dei materiali costituenti; nella fattispecie, le proprietà in esercizio dei materiali a base CDW sono funzione del tipo di compattazione, del contenuto d'acqua (che determinano lo stato in opera del materiale), nonché della qualità degli aggregati di riciclo, la quale è strettamente connessa alla composizione dei grani, alla loro granulometria, alla resistenza alla frantumazione e all'abrasione e alle caratteristiche igroscopiche.

La distribuzione granulometrica è funzione del materiale da cui si origina il CDW, così come della tecnologia demolitiva e della filiera di riciclo. L'adozione di due fasi distinte di frantumazione favorisce, infatti, la produzione di aggregati a forma poliedrica a discapito di aggregati appiattiti, i quali aumenterebbero la tendenza alla frantumazione del materiale in fase di compattazione, con conseguente perdita della stabilità granulometrica della miscela. In termini di caratteristiche igroscopiche, generalmente, i materiali da CDW sono più propensi all'assorbimento di acqua rispetto agli aggregati minerali vergini, a seguito della possibile presenza di materiali porosi come residui di laterizio e malta. La presenza di componenti porosi in quantità significative comporta un incremento del contenuto di acqua ottimale delle miscele, nonché una diminuzione della densità massima raggiungibile. Per tale ragione è necessario che queste componenti siano trascurabili rispetto alla fase litico-cementizia, al fine di mantenere elevata la qualità degli aggregati di riciclo. La resistenza all'abrasione e alla frantumazione, infine, risulta essere inferiore a quelle degli aggregati vergini, caratteristiche comunque fortemente influenzate, come le altre qui presentate, dalla composizione del rifiuto da demolizione, che può avere un tenore più o meno elevato di materiali ceramici.

La capacità portante delle miscele granulari realizzate con aggregati di recupero da rifiuti CDW, espressa in termini di indice CBR (*California Bearing Ratio*), ha evidenziato risultati contrastanti in relazione alle procedure di selezione e trattamento a cui sono stati sottoposti. Infatti, se opportunamente selezionati e trattati al fine di isolare la sola componente cementizia (RCA – *Recycled Concrete Aggregates*), possono raggiungere valori di CBR comparabili o leggermente inferiori rispetto agli aggregati naturali, comunque compatibili con i requisiti imposti dalle normative tecniche per le opere stradali comunemente adottati. Diversi studi in letteratura riportano risultati associati a numerose prove CBR su materiali RCA i cui valori, fortemente variabili, si attestano in un range compreso tra il 100% e il 200%. Qualora, però, vi sia la presenza di materiali diversi dal solo calcestruzzo, quali, per esempio, il laterizio, la capacità portante ne risulta condizionata e i valori di CBR scendono ben al di sotto del 100%. Tra le proprietà più di interesse, vi è senza dubbio il carattere pozzolanico delle miscele contenenti CDW, che comporta un incremento nel tempo della capacità portante a seguito di processi di idratazione dei materiali cementizi presenti.

In termini di modulo resiliente, nei test condotti in cella triassiale sotto carico ripetuto, i materiali di riciclo ottenuti da CDW hanno mostrato una marcata dipendenza dallo stato tensionale e dall'energia di compattazione cui il materiale è stato sottoposto, pur evidenziando il tipico comportamento "*stress-stiffening*" proprio dei materiali granulari naturali.

In generale, si è osservato un modulo resiliente superiore a quello di miscele di aggregati tradizionali per uso stradale e un minore accumulo di deformazioni permanenti. Inoltre, la forma degli aggregati di recupero CDW è risultata avere un ruolo fondamentale, evidenziando come la presenza ridotta di aggregati a forma poliedrica possa indurre una riduzione del modulo resiliente e, contestualmente, della resistenza all’accumulo delle deformazioni permanenti. Anche la possibile natura pozzolanica di alcuni costituenti dei rifiuti di recupero da CDW può avere effetti positivi sulla rigidezza del materiale nel lungo periodo.

Ne deriva come l’eterogeneità intrinseca dei CDW imponga un maggiore controllo di qualità in fase di produzione e posa in opera, per garantirne la costanza prestazionale.

5.2.3.3 Durabilità

Uno dei fattori di maggior criticità per i materiali stradali non legati riguarda la resistenza ai cicli di gelo-disgelo. In presenza di aggregati di recupero da CDW ad elevato contenuto di materiali porosi (quali alcune tipologie di calcestruzzo, laterizi, gesso) questo aspetto potrebbe assurgere a problematica rilevante in quanto più suscettibili all’assorbimento di acqua che, per effetto del suo aumento di volume nella fase geliva, potrebbe generare pressioni interne e microfessurazioni con conseguente rischio di frammentazione, riducendo la durabilità dello strato in cui sono stati impiegati. In assenza di materiali porosi, però, il comportamento del misto granulare di riciclo è in grado di esibire prestazioni non inferiori rispetto a quelle prodotte da aggregati vergini.

Si segnala, inoltre, che laddove gli aggregati presentino ridotta resistenza all’aggressione chimica, è possibile il verificarsi di deformazioni localizzate dovute al deterioramento dei grani, con una conseguente potenziale perdita complessiva di prestazioni.

5.3 Opere d’arte

5.3.1 Calcestruzzi a ridotta impronta carbonica

È difficile stabilire se entro il 2050 sarà disponibile sul mercato il calcestruzzo Net Zero. Tuttavia, in base alle conoscenze scientifiche e tecnologiche, è già possibile attuare strategie per ridurre significativamente l'impatto del calcestruzzo.

Dette strategie possono essere distinte in due grandi gruppi: la strategia di sostituzione, in cui il clinker è sostituito da aggiunte di minerali, e la strategia di prestazione, volta a ridurre il volume di calcestruzzo necessario per un dato processo di costruzione attraverso l’incremento delle sue prestazioni.

5.3.1.1 Strategia della sostituzione

La prima delle strategie per ridurre la CO_2 consiste nel sostituire gran parte del clinker con aggiunte minerali. La formazione scientifica necessaria per utilizzare queste aggiunte minerali è già nota e questa opzione è ampiamente utilizzata da decenni (dapprima più per motivi economici che ambientali). A seconda delle loro proprietà fisiche (curva granulometrica, dimensione media, ecc.) o della loro natura chimica, le aggiunte minerali possono avere una funzione di riempimento (riducono la porosità del materiale e quindi ne aumentano il modulo elastico e la resistenza meccanica) e/o una capacità legante (reagiscono con l'acqua o con i prodotti di idratazione del clinker per formare idrati stabili). In quest'ultimo caso, tali aggiunte sono generalmente chiamate *Supplementary Cementitious Materials* (SCM) e possono sostituire parzialmente o totalmente il cemento Portland, come accennato al § 4.2.1.1.

I SCM possono anche migliorare alcune proprietà del calcestruzzo. Infatti, in presenza di SCM, si osservano differenze nella microstruttura del cemento e del calcestruzzo, ed in particolare la riduzione del volume totale dei pori aperti nella pasta cementizia indurita e nella zona di contatto tra pasta e aggregati. Ciò migliora le prestazioni dei compositi a base cementizia, soprattutto in termini di durabilità o di resistenza ad un ambiente aggressivo (e.g., carbonatazione, presenza di ioni cloruro, solfati, ecc.), aumentando, ad esempio, la tenuta all'acqua.

Il tipo di SCM oggi più comune è rappresentato dalla cenere volante silicea, un sottoprodotto della combustione del carbone nelle centrali elettriche. Tuttavia, le ceneri volanti stanno lentamente perdendo il primato a causa del progressivo smantellamento delle centrali elettriche a carbone. Le loppe granulari d'altoforno, anch’esse utilizzate per ridurre il contenuto di clinker, non possono interamente sostituire le ceneri volanti a causa delle loro proprietà e della loro disponibilità limitata. Per questa ragione, le ceneri volanti provenienti dalla combustione di biomasse o pozzolane

naturali (pomice, tufi vulcanici) o artificiali (metacaolino) sono sempre impiegate nell'industria dei materiali da costruzione.

Nella strategia di sostituzione rientra anche l'uso di clinker alternativi, come i cementi a base di argilla calcinata, noti come LC3 (*Limestone Calcined Clay Cement*). Questi cementi utilizzano argilla calcinata, che è un sottoprodotto di vari processi industriali ed è facilmente reperibile. I leganti alcalini attivati (noti come geopolimeri) costituiscono un'altra categoria di tecnologie alternative al clinker. Questi leganti sono ottenuti combinando sottoprodotti industriali, come ceneri volanti o scorie, con attivatori alcalini. Essi offrono proprietà meccaniche simili, o addirittura superiori, rispetto al cemento tradizionale e hanno dimostrato una grande durabilità in diverse applicazioni. Le varie ricerche in corso mirano a ottimizzare la formulazione, a migliorare le prestazioni a lungo termine e ad aumentare l'efficacia dei geopolimeri in termini di costi, con l’obiettivo di arrivare a prodotti facilmente commercializzabili.

Nei cataloghi dei produttori di cemento si trovano anche altre tipologie di leganti, tra cui il solfoalluminato di calcio (CSA), che può ridurre drasticamente le emissioni di carbonio rispetto del cemento Portland tradizionale. Questo speciale cemento si distingue dal cemento Portland per essere un legante ad alta velocità, a rapido sviluppo della resistenza e contraddistinto da un basso ritiro. Il cemento CSA è stato utilizzato per decenni come legante nel calcestruzzo per ponti, piste e rampe aeroportuali, riparazione di strade in calcestruzzo e molte altre applicazioni in cui è richiesto un rapido raggiungimento delle resistenze. Infatti, la presa iniziale del cemento CSA inizia dopo circa venti minuti e la sua presa finale arriva dopo altri dieci minuti. Il CSA è composto principalmente da:

- calcio solfoalluminato (C4A3S);
- ettringite;
- anidrite di calcio solfoalluminato;
- belite (C2S);
- gesso (CaSO4·2H2O).

Questi componenti conferiscono al CSA proprietà uniche come la rapida presa, lo sviluppo veloce delle resistenze e la riduzione del ritiro. Inoltre, il CSA ha un impatto ambientale inferiore rispetto al cemento Portland, grazie alle minori temperature di clinkerizzazione e alle ridotte emissioni di CO_2. Con l'uso di ritardanti, il tempo di lavorazione può essere notevolmente prolungato. Anche in ambienti a bassa temperatura il cemento CSA mantiene la sua reattività a differenza di altri tipi di cemento.

Le malte e il calcestruzzo con CSA raggiungono la resistenza finale entro 24 ore, mentre il cemento Portland impiega 28 giorni. Ci sono diversi criteri che mostrano le caratteristiche di compensazione del ritiro del cemento CSA:

- la tensione che si verifica durante l'idratazione si accumula in un lasso di tempo molto più breve rispetto ai cementi tradizionali;
- i cementi CSA richiedono più acqua rispetto al cemento Portland: 0,35 contro 0,25 per Portland. Tuttavia, l'acqua è, in maniera completa, chimicamente legata e non causa alcuna eccedenza d'acqua. È l'eccedenza d'acqua che si verifica con altri tipi di cemento che è la causa di ritiro, fessurazioni e deformazioni;
- durante la fase di indurimento si verifica un'espansione chimica e stabile che impedisce un ulteriore ritiro nel tempo.

È necessario evitare che tutti i leganti idraulici si asciughino rapidamente. Con leganti molto veloci, lo sviluppo della temperatura è spesso così esplosivo da portare a un'ulteriore perdita di umidità. Lo sviluppo della temperatura nel cemento CSA è significativamente più basso e più breve, il che si traduce in una fase di "stagionatura" di poche ore.

Il cemento CSA non forma calce libera come il cemento Portland, il che si traduce in un contenuto di alcali inferiore. Il pH del CSA è compreso tra 10,5 e 11, mentre Portland ha un pH di 13. In questo modo la reazione alcali-silice è ridotta e lo rende un prodotto adatto ad essere combinato con la fibra di vetro e i sostituti della sabbia come il vetro.

Il cemento CSA è considerato un legante verde in relazione a due aspetti. Anzitutto, come già detto, esso viene calcinato a 1250°C (2250°F) mentre il Portland viene calcinato a una temperatura di 1500°C (2700°C). Inoltre, il clinker CSA è molto più morbido rispetto al clinker Portland, il che riduce il fabbisogno di energia durante la macinazione. Ciò

determina un impatto ambientale inferiore rispetto al cemento Portland tradizionale, che si traduce in minori emissioni di CO2, in minore richiesta di energia per la produzione, nella possibilità di incorporare una maggiore quantità di materiali riciclati (riducendo così la necessità di materie prime vergini), nella minore tendenza al ritiro che può contribuire a ridurre la necessità di riparazioni e manutenzioni nel tempo.

La produzione di cemento CSA presenta più basse emissioni di CO_2 anche rispetto ad altri cementi alternativi, come il cemento al magnesio (Sorel), il metasilicato di sodio (silice solubile) e il cemento alluminato di calcio.

5.3.1.2 Strategia della prestazione

In alternativa alla riduzione della quantità di CO2 per tonnellata di calcestruzzo prodotto, un'altra opzione è quella di ridurre la quantità totale di calcestruzzo prodotto. Questa riduzione può avvenire aumentando la resistenza meccanica del materiale. Tuttavia, l'aumento della resistenza meccanica senza alcuna delle sostituzioni sopra descritte può essere, nella maggior parte dei casi, associata ad un aumento dell'emissione di CO_2 per metro cubo di prodotto. Ciò è mostrato in **Figura 16**, dove le resistenze meccaniche sono tracciate in funzione delle emissioni di CO_2 per unità di volume.

Il modo usuale per aumentare la resistenza è quello di aumentare il contenuto di cemento (e conseguentemente le emissioni di CO_2) nella miscela calcestruzzo. Ciò è particolarmente vero per conglomerati di classe inferiore a 70 MPa, poiché in essi la resistenza alla compressione è fortemente dipendente dalla qualità dello scheletro granulare. È noto che la resistenza meccanica del calcestruzzo è proporzionale al quadrato della quantità di cemento per metro cubo, con tutti gli altri parametri mantenuti costanti. Aumentando la resistenza meccanica, si aumentano da un lato le emissioni di CO_2 per metro cubo di calcestruzzo prodotto, ma si possono contestualmente diminuire in modo considerevole le quantità di calcestruzzo necessarie per costruire un determinato elemento strutturale..

L'incremento di resistenza meccanica del calcestruzzo può essere ottenuto tramite diverse tecnologie. Una di queste tecnologie prevede l'aggiunta di fibre di diversa forma e natura alla matrice di calcestruzzo, ottenendo così un calcestruzzo fibrorinforzato (FRC). Si tratta di fibre che consentono di aumentare l'energia di frattura mediante il meccanismo cosiddetto di "*bridging*": esse attraversano le fessure che si formano nella matrice cementizia, resistendo alla propagazione delle fessure stesse e migliorando le proprietà di trazione e flessione del materiale, soprattutto nella fase post-fessurazione.

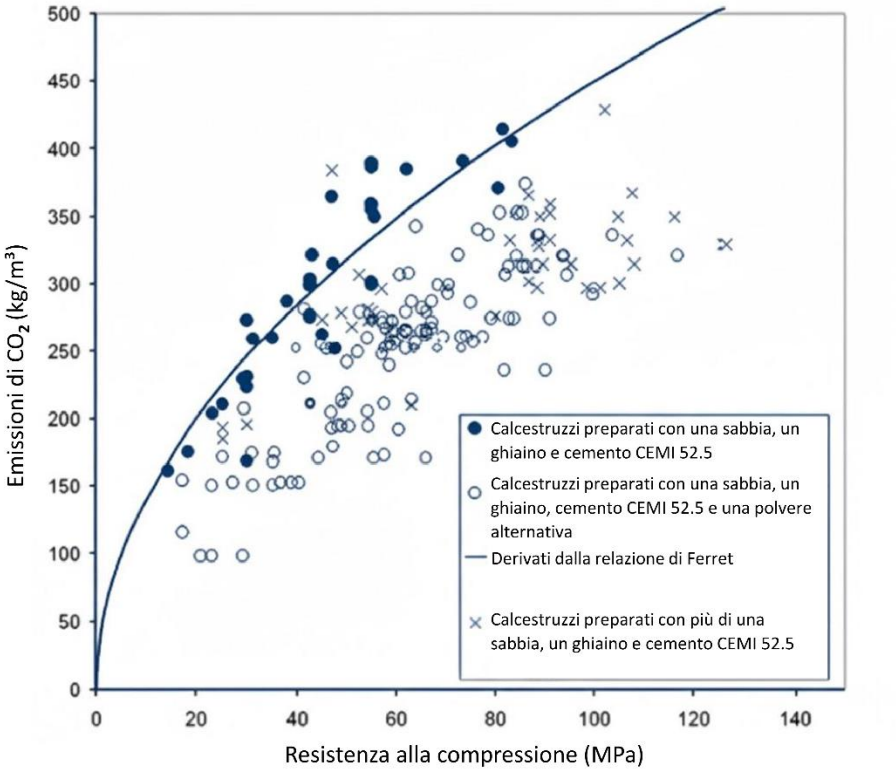


FIGURA 16. EMISSIONI DI CO2 PER M³ DI CALCESTRUZZO IN FUNZIONE DELLA RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE DOPO 28 GIORNI.

A seconda del tipo di meccanismo fessurativo, è possibile avere un FRC convenzionale o un calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRC), come mostrato in **Figura 17** (che riporta, a titolo di confronto, la risposta anche di un calcestruzzo ordinario). Sebbene sia l'FRC che l'HPFRC si basino sull'effetto "*bridging*" delle fibre, le differenti caratteristiche della matrice e del legame fibre-matrice portano a risposte meccaniche distinte. Nell'FRC convenzionale, le fibre si staccano principalmente dopo la rottura della matrice a causa di un legame più debole, mentre nell'HPFRC, l'adesione più forte della matrice può provocare una più lenta estrazione delle fibre dalla matrice. Inoltre, la lunghezza critica della fibra, ovvero la lunghezza minima richiesta per un efficace trasferimento delle sollecitazioni, è in genere più corta nell'HPFRC a causa della sua forza di aderenza superiore. L'influenza della forma delle fibre è anche più pronunciata nell'HPFRC, dove le fibre deformate (ad esempio, con estremità uncinata, o attorcigliate) forniscono un migliore ancoraggio meccanico e un maggiore assorbimento di energia.

La fibra presenta diverse proprietà e funzionalità, che influenzano in modo significativo le prestazioni del materiale. Le fibre di acciaio sono le più utilizzate in FRC e HPFRC grazie alla loro disponibilità commerciale e alle proprietà meccaniche superiori. Con un'elevata resistenza alla trazione, compresa tra 0,69 e 2,94 GPa, e un modulo di elasticità di circa 200 – 210 GPa, le fibre di acciaio migliorano significativamente la resistenza alla trazione, la duttilità, la tenacità nella fase post-fessurazione del calcestruzzo. Le fibre con estremità uncinate, a spirale e con geometrie deformate forniscono un migliore ancoraggio, con conseguente miglioramento della resistenza alla compressione e alla trazione, sia sotto carichi statici che dinamici.

La maggiore resistenza meccanica di FRC e HPFRC consente, come già detto, la costruzione di strutture più leggere e snelle, riducendo di conseguenza il volume di calcestruzzo impiegato nelle costruzioni, prolungando significativamente la durata delle strutture, portando a una riduzione dei rifiuti di demolizione e delle spese di trasporto.

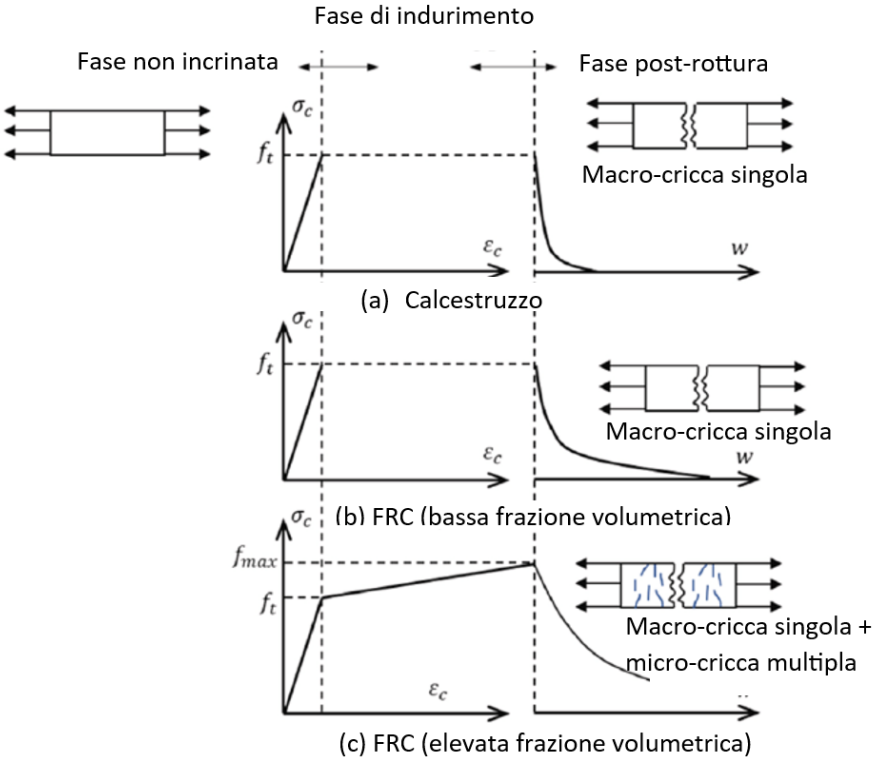


FIGURA 17. COMPORTAMENTO ALLA FESSURAZIONE DI DIVERSI TIPI DI CALCESTRUZZO (ORDINARIO, FRC, HPFRC).

5.3.2 Materiali compositi in vetroresina per armature (GFRP)

L'uso di armature non metalliche in sostituzione del comune acciaio per il rinforzo interno di strutture in calcestruzzo, o parti di esse, rappresenta una pratica molto diffusa e consolidata in molti Paesi del mondo. L'impiego di prodotti innovativi, quali i materiali compositi in vetroresina (*Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP), può ad oggi rappresentare

una valida alternativa all'acciaio comunemente usato per il rinforzo delle strutture in calcestruzzo armato, con i conseguenti vantaggi ambientali.

I materiali compositi combinano sistemi costituiti da due o più fasi (materiale multifasico creato artificialmente), progettati per avere proprietà e prestazioni superiori rispetto ai singoli materiali che li compongono. Questi materiali combinano fibre (di vetro o di carbonio, costituenti la fase dispersa, con la funzione principale di garantire resistenza alla barra) con una matrice di fondo (resina, costituente la fase continua, con la funzione di proteggere la fibra dagli attacchi ambientali e di distribuire gli sforzi alle varie fibre che avvolge).

Le proprietà meccaniche delle barre in composito dipendono dal tipo di matrice, dal tipo di fibra e, soprattutto, dalla frazione volumetrica di queste ultime.

Per quel che concerne le fibre di vetro, queste possono essere di diversa natura con proprietà che variano a seconda degli usi e del campo di applicazione per i quali è richiesto il loro utilizzo. Esse sono create a partire da materie prime naturali, come caolino, allumina e silice, che sono fuse a temperature elevate (1.300 – 1.600°C) in forni speciali. Il vetro fuso è quindi estruso o soffiato per ottenere filamenti sottili. I filamenti sono poi intrecciati o lavorati per formare tessuti, fasci o strati, mediante:

- pultrusione, ovvero impregnazione dei filamenti con resina termoindurente, con successivo passaggio attraverso una trafila che preforma il materiale e stabilisce il rapporto resina/fibra e, infine, attraverso uno stampo di polimerizzazione riscaldato (con indurimento della resina e formazione del composito);
- posizionamento manuale, adagiando i tessuti di fibra di vetro su un supporto e impregnandoli di resina epossidica, concludendo con polimerizzazione a temperatura ambiente o in forno;
- stampaggio a iniezione;
- spruzzatura di resine.

In particolare, le barre in GFRP ad uso strutturale sono prodotte attraverso il processo di pultrusione (**Figura 18**), utilizzando resine termoindurenti (generalmente vinilestere per le applicazioni permanenti) e frazioni volumetriche di fibre non inferiori al 50% (generalmente sino al 70%).

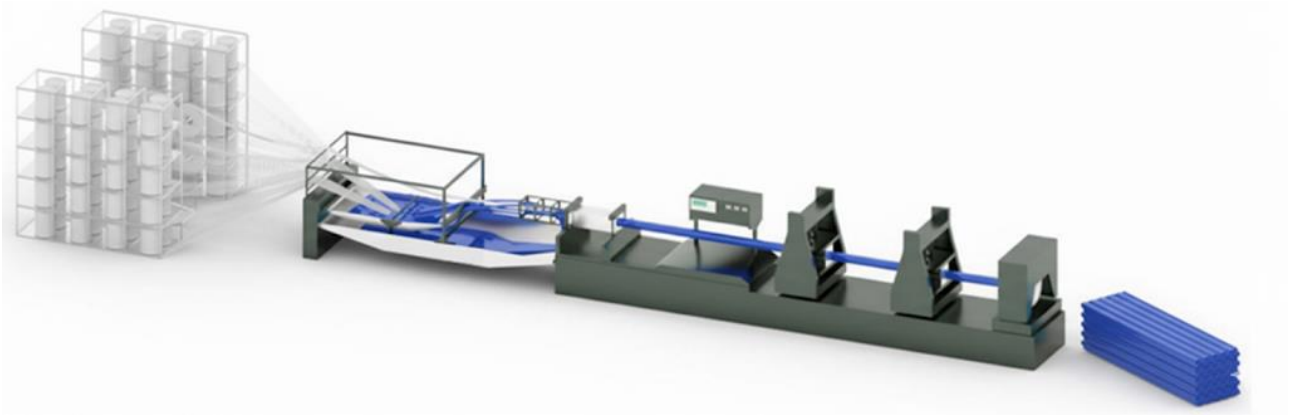


FIGURA 18. PROCESSO DI PULTRUSIONE PER BARRE IN GFRP.

Le proprietà meccaniche del GFRP sono dovute non solo al filamento, ma anche alla matrice polimerica e alla frazione volumetrica dei due componenti. La resistenza a compressione deve essere caratterizzata da ciascun Produttore in accordo alla ASTM D695. La loro resistenza caratteristica a trazione non deve essere inferiore a 400 MPa, mentre il modulo elastico a trazione in direzione longitudinale non deve risultare inferiore a 35 GPa. Da un punto di vista teorico, i concetti alla base della progettazione di strutture in cemento armato possono essere applicati, così come per il rinforzo in acciaio, anche per i nuovi rinforzi in GFRP. Da un punto di vista progettuale, invece, uno degli aspetti che deve essere preso in considerazione è legato al diverso comportamento meccanico che esibisce il GFRP rispetto all'acciaio. Infatti, differentemente dall'acciaio, per il quale il legame costitutivo risulta essere elasto-plastico, nel caso dei materiali compositi e quindi anche per il GFRP, il legame costitutivo è di tipo elastico lineare fino a rottura. Quindi, alla luce di

questo comportamento non possono essere applicati metodi per l’analisi strutturale che presuppongono una capacità di ridistribuzione plastica.

La diffusione di questi materiali compositi è favorita in primis dalla loro proprietà fondamentale, ovvero la maggiore durabilità dovuta al fatto di non essere conduttori e di non essere in alcun modo suscettibili ai fenomeni di corrosione. Questo fa sì che risultino particolarmente indicati in tutte quelle applicazioni dove l’opera o parte di essa, è esposta ad ambiente particolarmente aggressivo. Ciò riguarda appieno le strutture e sottostrutture in C.A. a servizio della rete stradale e autostradale nelle quali, per prevenire il formarsi del gelo durante i mesi invernali, vengono adottati sali disgelanti (cloruri) sul manto viabile. Adottare un’armatura non metallica consente una maggiore durata della struttura con conseguente riduzione degli impatti ambientali e socioeconomici derivanti dalla riduzione degli interventi di manutenzione necessari a garantire i livelli prestazionali richiesti.

Un altro vantaggio, non trascurabile, derivante dall’impiego di barre in GFRP con calcestruzzo tradizionale, è la rapidità di posa in opera. Quest’ultima è garantita dal peso ridotto delle barre in composito (circa un terzo rispetto a quello dell’acciaio), rendendole particolarmente agevoli nella loro movimentazione.

Altra proprietà che esalta questi tipi di rinforzi, rispetto alla tradizionale carpenteria metallica, è la capacità di essere trasparenti da un punto di vista elettromagnetico. Tale proprietà rende questi materiali adatti in tutte quelle situazioni in cui la struttura o parti di essa risultano esposte a fenomeni di correnti vaganti, con i problemi di corrosione ad esse associate.

Le armature in GFRP garantiscono inoltre l’utilizzo di innovativi leganti cementizi solfoalluminosi in sostituzione, totale o parziale, del più comune cemento Portland. Come già detto, la produzione dei cementi solfoalluminosi richiede meno energia per le più basse temperature di cottura e per la macinazione del clinker, con conseguente minore emissione di CO_2 rispetto al clinker Portland.

5.3.3 Riduzione delle emissioni nella produzione dell’acciaio

In termini di emissioni climalteranti, la CO_2 equivalente rilasciata durante la produzione di acciaio è quantificata attraverso dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) specifiche per ciascun impianto produttivo oppure mediante banche dati certificate che raccolgono misurazioni eseguite su numerosi impianti produttivi a livello globale. L’analisi di queste fonti, come già evidenziato in precedenza, conferma che la riduzione di CO_2 equivalente associata alla produzione di acciaio da forno elettrico è maggiore, a parità di unità funzionale, rispetto al ciclo produttivo ad alto forno.



FIGURA 19. PROCESSI CIRCOLARI RELATIVI ALL’ACCIAIO.

Focalizzando l’attenzione sulla produzione da forno elettrico, è possibile ridurre ulteriormente le emissioni e gli impatti ambientali complessivi implementando tecniche virtuose che valorizzino l’acciaio lungo tutta la catena produttiva, secondo i principi della circolarità (**Figura 19**).

Una delle strategie più efficaci per la riduzione delle emissioni legate alla produzione dell’acciaio consiste nel ricorso a fonti rinnovabili per la generazione di energia elettrica. Occorre considerare, a tal riguardo, che l’energia elettrica è una fonte secondaria di energia perché può essere derivata da qualunque forma primaria. Non essendo però ancora sviluppata su larga scala una efficiente tecnologia di stoccaggio per l’energia elettrica, vi è la necessità di produrne in continuazione in relazione alla quantità richiesta. L’equilibrio tra quanto richiesto e quanto prodotto non sempre si riesce a raggiungere con le rinovabili. Per far fronte a tale problematica, si deve associare la fonte elettrica rinnovabile ad una fonte elettrica non rinnovabile che possa garantire continuità di erogazione. Nell’ambito delle rinnovabili, un’acciaieria potrebbe avere una diversa disponibilità di fonti rinnovabili per generare energia elettrica in funzione della localizzazione geografica; per esempio, l’idroelettrico in zone montane, l’eolico in prossimità di zone costiere, il solare in zone poco abitate con elevata disponibilità di superficie per l’installazione di pannelli fotovoltaici. Incentivi all’utilizzo di fonti rinnovabili e uno sviluppo tecnologico nello stoccaggio dell’energia elettrica prodotta, potranno favorire una piena circolarità nella produzione e utilizzo di energia.

Un’altra pratica che può efficacemente contribuire alla riduzione delle emissioni è quella basata sul recupero delle scorie da forno elettrico. Pur con un’altissima ottimizzazione nel ciclo delle risorse rispetto alla produzione da altoforno, la tecnologia produttiva a forno elettrico non è esente dalla generazione di scarti di produzione. In particolare, durante il processo di fusione di rottami ferrosi nel forno elettrico si originano scorie di acciaieria composte prevalentemente da ossidi di ferro, calcio e silicio. A seguito di lavorazioni specifiche (frantumazione e inertizzazione), anche questi sottoprodotti possono essere indirizzati al ciclo di riutilizzo e trasformati in aggregati artificiali ad alte prestazioni, in sostituzione dei materiali di origine naturale (inerti di cava) perseguendo in tal modo la salvaguardia delle risorse naturali. Estendendo lo sviluppo ad impianti produttivi non necessariamente a forno elettrico, altri possibili approcci prevedono il recupero di calore e il ricircolo dell’acqua di raffreddamento.

6 Impianti e cantieri

6.1 Strategie per la riduzione delle emissioni in impianto

6.1.1 Conglomerati bituminosi

La produzione dei conglomerati bituminosi a caldo richiede ingenti quantità di combustibile ed energia elettrica, generando elevate emissioni di CO_2 che incidono sull'intero ciclo di vita della pavimentazione stradale. Il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità per questi materiali passa quindi attraverso un'evoluzione tecnologica verso impianti a minore intensità carbonica, fondati sui principi di riduzione dei consumi energetici, economia circolare ed efficienza complessiva dei sistemi.

In questa direzione si inserisce una recente pubblicazione della EAPA (*European Asphalt Pavement Association*), che definisce roadmap di decarbonizzazione articolate su diversi orizzonti temporali. Nel breve periodo è previsto un taglio delle emissioni di almeno il 50% di $kgCO_2$ per tonnellata di conglomerato prodotto, mentre nel medio-lungo termine l'obiettivo è la quasi completa neutralità carbonica.

Come mostrato nella **Figura 20**, tratta dalla suddetta pubblicazione, il conseguimento di tali target richiede il contributo di diversi fattori, alcuni dei quali direttamente connessi al funzionamento dell'impianto e caratterizzati da una rilevanza anche molto significativa.

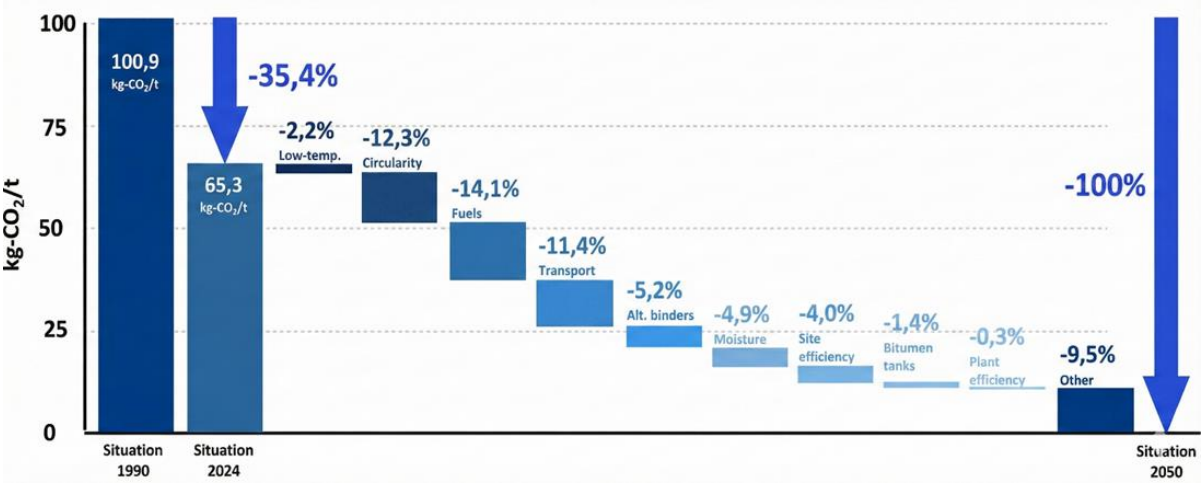


FIGURA 20. ROADMAP VERSO LA NEUTRALITÀ CARBONICA NELLA PRODUZIONE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI.

Tra gli ambiti di intervento potenzialmente più efficaci rientrano l'adozione di combustibili alternativi, il miglioramento dell'efficienza energetica attraverso l'impiego di fonti rinnovabili, la riduzione dell'umidità degli aggregati e del fresato (RAP), nonché la modernizzazione, automazione e digitalizzazione degli impianti.

Per quanto riguarda i combustibili, la tendenza attuale è sostituire quelli liquidi tradizionali (olio combustibile e gasolio) con soluzioni a minore impatto ambientale, quali gas metano o biometano, GPL, bio-GPL, *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO), biodiesel, bioetanolo e idrogeno, anche in forma combinata.

Studi statunitensi evidenziano che, tra i combustibili "tradizionali", il metano rappresenta oggi l'opzione più vantaggiosa, con riduzioni delle emissioni di CO_2 in impianto fino al 26% rispetto al gasolio (**Figura 21**).

L'idrogeno costituisce un combustibile pulito ed efficiente e, quando impiegato in celle a combustibile, ha come unico prodotto di scarto il vapore acqueo. Può essere ottenuto da varie fonti, tra cui gas naturale ed elettrolisi dell'acqua. Le potenzialità per sostituire i combustibili fossili anche nel settore delle costruzioni sono significative, ma l'adozione su larga scala è limitata da criticità quali stoccaggio, infrastrutture di approvvigionamento e costi di produzione, rendendo necessari ingenti investimenti. Va inoltre considerato che, per soddisfare le esigenze di un impianto di produzione di conglomerati bituminosi, il volume di idrogeno richiesto è circa sette volte superiore a quello del gas naturale attualmente distribuito. Oltre ai combustibili indicati nei CAM, possono essere impiegati anche oli usati, materiali riciclati e, più recentemente, polverino di legno.

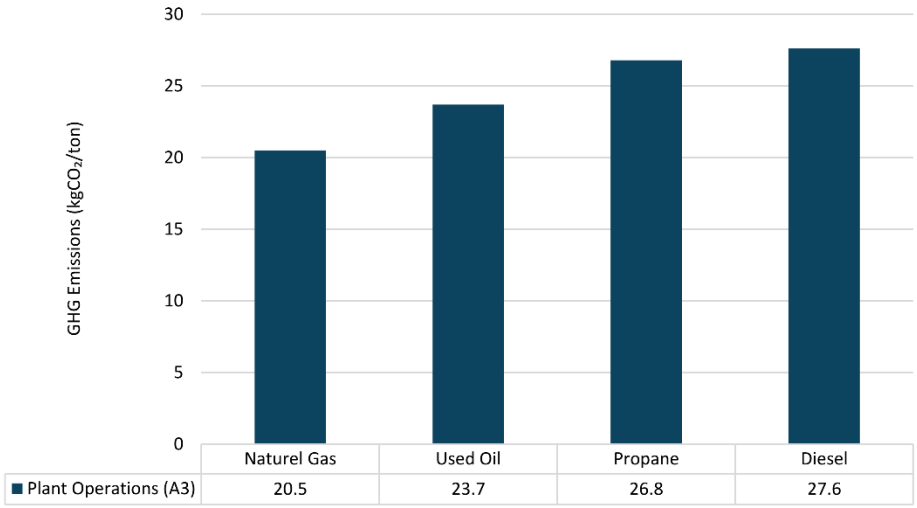


FIGURA 21. EMISSIONI GENERATE NELLE OPERAZIONI IN IMPIANTO CON UTILIZZO DI DIVERSI TIPI DI COMBUSTIBILE[9].

Le emissioni di CO_2 possono essere ridotte anche ottimizzando il consumo energetico tramite sistemi di controllo avanzati, capaci di migliorare l'efficienza in tutte le fasi del processo produttivo. Ciò comprende l'aggiornamento degli impianti, la regolazione ottimale dei bruciatori e una manutenzione accurata dei macchinari, finalizzata a limitare gli sprechi energetici. Ad esempio, l'impiego di palette interne agli essiccatori di nuova generazione, abbinate a software che ottimizzano la velocità di rotazione del tamburo, consente di massimizzare lo scambio termico tra aria calda e aggregati, con conseguente riduzione dei consumi ed emissioni. Gli impianti possono inoltre integrare fonti di energia rinnovabili per la produzione di elettricità, quali solare, eolico o geotermico, diminuendo così la dipendenza dai combustibili fossili. Possibili sistemi di recupero energetico nel processo produttivo potranno contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico e ragionevolmente delle emissioni. Un ulteriore ambito di intervento riguarda la protezione degli aggregati e del granulato di conglomerato mediante coperture: mantenerli al riparo dalle intemperie riduce l'umidità dell'1 – 2%, con un significativo risparmio di combustibile necessario al riscaldamento. Una riduzione del 2% di umidità può tradursi in una diminuzione rilevante delle emissioni, variabile in funzione della temperatura di miscelazione (**Figura 22**).

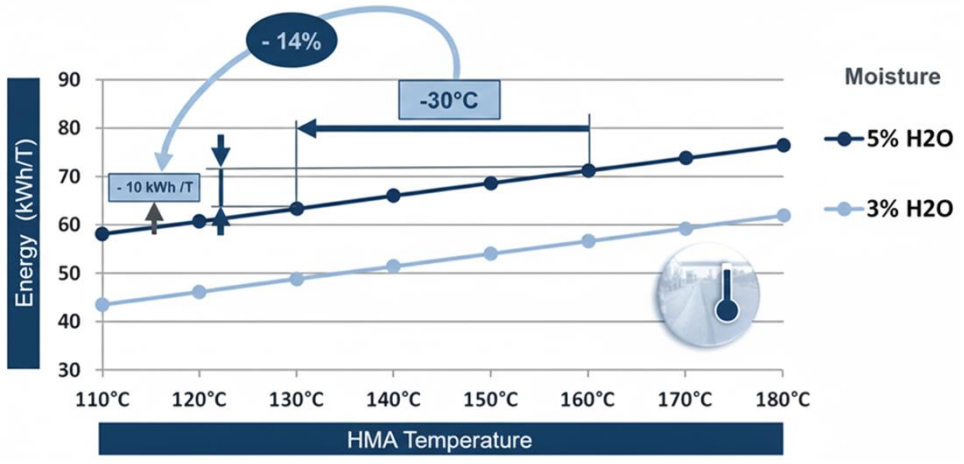


FIGURA 22. ENERGIA RICHIESTA PER LA PRODUZIONE AL VARIARE DELLA TEMPERATURA DI MISCELAZIONE E DEL GRADO DI UMIDITÀ DEGLI AGGREGATI.

Infine, l'efficienza operativa degli impianti può essere ulteriormente incrementata tramite sistemi di automazione e tecnologie digitali. L'adozione di sensori per il monitoraggio in tempo reale e la conseguente analisi dei dati consentono

[9] Fonte NAPA – National Asphalt Pavement Association

di ottimizzare i parametri di produzione, minimizzando consumi energetici superflui ed emissioni di CO_2 durante le lavorazioni.

6.1.2 Conglomerati cementizi

Le strategie di efficientamento riguardano innanzitutto l’impiego di combustibili alternativi, tra cui quelli derivati da biomasse, GNL, HVO ed energia elettrica da fonti rinnovabili. Le stime indicano che la quota di energia rinnovabile, attualmente pari al 6%, salirà al 22% entro il 2030 e raggiungerà il 43% nel 2050. Dopo il 2040 è previsto anche un contributo significativo da parte dell’idrogeno.

Le attività di ricerca sull’efficientamento si concentrano inoltre sulle materie prime, a partire dall’acqua. La riduzione dei consumi idrici può essere ottenuta aumentando l’impiego di acqua riciclata negli impianti di betonaggio e adottando contatori digitali per la misurazione e il monitoraggio continuo dei consumi. Ciò garantisce maggiore accuratezza dei dati e consente di analizzare i trend, definendo così obiettivi di riduzione e miglioramento dell’efficienza.

Dal punto di vista tecnologico, gli impianti di calcestruzzo di più recente concezione consentono l’integrazione di sistemi di recupero energetico finalizzati all’ottimizzazione dei consumi. Un esempio è rappresentato dai sistemi di cogenerazione, che permettono di riutilizzare il calore prodotto durante le lavorazioni per alimentare altre fasi del processo, riducendo la domanda di energia esterna.

Un'ulteriore innovazione già in fase di implementazione riguarda i sistemi di filtraggio e abbattimento delle emissioni. Gli impianti più avanzati stanno introducendo soluzioni tecnologiche in grado di catturare polveri e gas nocivi durante la produzione. L’impiego di filtri a maniche o depolveratori a umido consente un abbattimento efficace delle polveri sottili e contribuisce alla riduzione delle emissioni di CO_2.

Alcune tipologie di impianti di nuova concezione presentano inoltre una struttura modulare, progettata per essere più compatta e facilmente smontabile o riposizionabile. Questa configurazione riduce l’impiego di risorse nella fase costruttiva, accorcia i tempi di realizzazione e limita gli impatti associati all’installazione di cantieri mobili.

Nel quadro dell’efficientamento complessivo rientrano infine l’automazione e l’ottimizzazione dei processi. L’adozione di sistemi di automazione avanzata consente di modulare i consumi energetici e i flussi di materiale in funzione dei mix design e delle condizioni meteorologiche, contribuendo a incrementare l’efficienza operativa dell’impianto.

6.2 Mobilità di cantiere

La mobilità di cantiere, intesa come l'insieme dei mezzi, delle attrezzature e delle risorse utilizzate per lo spostamento di materiali, personale e macchinari all'interno e verso i siti di costruzione e manutenzione stradale, costituisce una componente significativa dell'impronta carbonica complessiva di questi processi.

La razionalizzazione e l’efficientamento della mobilità legata alle attività di costruzione non risponde solo a esigenze ambientali, ma genera anche significativi benefici economici e sociali legati alla riduzione dei costi operativi, all'ottimizzazione dei tempi di costruzione, al miglioramento delle condizioni di sicurezza e alla minimizzazione degli impatti sulle comunità locali.

Con riferimento alla mobilità di cantiere, si possono individuare tre ambiti principali.

Il primo riguarda il trasporto dei materiali, che rappresenta la componente più significativa della mobilità di cantiere, con un'incidenza stimata tra il 60% e il 70% dell'impronta carbonica complessiva degli spostamenti legati al progetto. Studi recenti condotti su progetti infrastrutturali europei di grande scala indicano che per ogni milione di euro di valore dell'opera, vengono generati mediamente tra i 3.000 e i 5.000 viaggi di mezzi pesanti per il trasporto di materiali. Questi flussi logistici generano non solo emissioni di gas serra (350-450 kg CO_2 e per viaggio medio), ma anche inquinanti locali come particolato, ossidi di azoto e rumore, con significativi impatti sulla qualità dell'aria e sulla vivibilità delle aree circostanti il cantiere.

In questo gioca un ruolo fondamentale la distribuzione geografica degli approvvigionamenti. Una recente indagine condotta su un campione di 50 progetti infrastrutturali europei rivela che il raggio medio di approvvigionamento dei materiali è aumentato del 35% nell'ultimo ventennio, raggiungendo oggi circa 120 km per i materiali di base e fino a

500-700 km per componenti specializzati. Questo allungamento delle catene logistiche, guidato principalmente da logiche di ottimizzazione dei costi diretti, ha amplificato significativamente l'impronta carbonica della fase costruttiva.

Il secondo ambito riguarda gli spostamenti quotidiani della manodopera. Tale componente è spesso sottovalutata ma la sua incidenza può raggiungere livelli compresi tra il 15% e il 25% dell'impronta carbonica complessiva. Nei grandi progetti infrastrutturali, la forza lavoro può raggiungere picchi di diverse migliaia di addetti, generando intense pressioni anche sulla rete di trasporto locale. In tale ambito si osserva generalmente un uso predominante di mezzi individuali, con un tasso di occupazione poco superiore all’unità. Ciò può essere determinato da diversi fattori, quali la limitata accessibilità mediante trasporto pubblico, orari di lavoro non allineati con i servizi di trasporto collettivo, necessità di trasportare attrezzature personali, abitudini e preferenze individuali consolidate.

Il terzo ambito riguarda i movimenti dei mezzi operativi all'interno dell'area di cantiere, con un'incidenza stimata tra il 10% e il 20% dell'impronta carbonica complessiva. Questa categoria include tutti gli spostamenti necessari per la movimentazione di materiali, lo scavo, il trasporto interno e le operazioni di costruzione.

Un cantiere infrastrutturale di medie dimensioni può contare su un parco mezzi di 20-50 unità, con consumi giornalieri che possono superare complessivamente i 1.000 litri di gasolio, generando emissioni dell'ordine di 2.5-3 tonnellate di CO_2. Oltre all'impatto climatico, questi mezzi sono responsabili di elevate emissioni di particolato e ossidi di azoto, con conseguenze negative sulla qualità dell'aria locale e sulla salute dei lavoratori e delle comunità circostanti.

Le strategie volte a ridurre gli impatti connessi alla mobilità di cantiere possono essere strutturate in diversi livelli di intervento.

Un primo livello attiene alla riduzione della domanda di mobilità, attraverso la progettazione orientata all'ottimizzazione dei flussi logistici, l’utilizzo e la valorizzazione di materiali locali e tecniche costruttive a basso fabbisogno di trasporto, la prefabbricazione e il preassemblaggio per ridurre le operazioni in cantiere.

Un secondo livello attiene alla ottimizzazione dei flussi, mediante la pianificazione integrata della logistica di cantiere, con la minimizzazione dei viaggi a vuoto, dei percorsi e delle tempistiche.

Un terzo livello attiene al miglioramento tecnologico dei mezzi, attraverso l’elettrificazione dei mezzi leggeri e progressivamente di quelli pesanti, l’utilizzo di carburanti alternativi (biocarburanti, idrogeno) per i mezzi non elettrificabili, l’ottimizzazione delle motorizzazioni e la riduzione del peso dei veicoli.

Nel segmento dei mezzi operativi, l'elettrificazione sta assumendo un ruolo sempre più prominente, con mini-escavatori, sollevatori telescopici e mezzi di cantiere compatti completamente elettrici che offrono già prestazioni paragonabili alle controparti diesel, eliminando emissioni locali e riducendo del 60-80% le emissioni di CO_2 nell’arco dell'intero ciclo di vita. Per i mezzi più pesanti, dove la completa elettrificazione presenta ancora sfide tecniche, le soluzioni ibride (diesel-elettrico) rappresentano un'alternativa consolidata, con riduzioni documentate dei consumi del 15 – 30% e significative diminuzioni delle emissioni sonore, particolarmente rilevanti nei contesti urbani sensibili.

I sistemi di stoccaggio e produzione energetica in cantiere costituiscono un elemento abilitante fondamentale per la mobilità elettrica, con batterie stazionarie di grande capacità (250 – 500 kWh) che fungono da buffer per la ricarica dei mezzi elettrici, spesso in combinazione con generazione fotovoltaica mobile (30 – 50 kWp) installabile temporaneamente nelle aree di cantiere.

Sul fronte dei carburanti alternativi, il biodiesel avanzato (HVO - *Hydrotreated Vegetable Oil*) si è affermato come soluzione immediatamente implementabile, compatibile con i motori diesel esistenti e capace di ridurre le emissioni di CO_2 fino all'85% rispetto al diesel fossile. Il biometano rappresenta un'opzione promettente per mezzi pesanti e macchine operatrici di grande potenza, mentre l'idrogeno, sebbene ancora in fase sperimentale per applicazioni di cantiere, offre prospettive interessanti per la decarbonizzazione completa dei mezzi più energivori, con diverse sperimentazioni in corso su escavatori e dumper di grandi dimensioni.

Anche per i mezzi tradizionali esistono margini significativi di efficienza, grazie all’utilizzo e implementazione di sistemi di gestione e controllo ottimizzati.

A titolo di esempio, le vibrofinitrici, che in condizioni operative tipiche hanno un consumo medio stimato tra i 18 e i 24 litri/ora, possono ridurre quasi della metà tali valori grazie a soluzioni innovative come software per l’ottimizzazione del

regime motore, sistemi di riscaldamento del banco più efficienti, adeguamenti degli impianti idraulici e miglioramento delle prestazioni termiche complessive. In questo modo i consumi possono scendere a un intervallo tra i 9 e i 14 litri/ora.

La medesima condizione può essere considerata per i rulli compattatori, che presentano consumi medi di tra i 12 e i 15 litri/ora a fronte di un massimo dichiarato di 20 – 24 litri/ora. Attraverso l’utilizzo di software di gestione della coppia a regimi intermedi, sistemi ibridi di conservazione delle inerzie e ottimizzazione dell’impianto idraulico, è possibile ridurre i consumi a circa 7 – 10 litri/ora.

Ulteriori benefici ambientali derivano dall’impiego di tecnologie di controllo del cantiere e della compattazione, come il monitoraggio della temperatura del conglomerato, la mappatura delle passate dei rulli e la regolazione dell’intensità di vibrazione in relazione allo stato di addensamento del materiale. Tali innovazioni consentirebbero di abbattere ulteriormente i consumi e le emissioni, migliorando al tempo stesso la qualità del processo costruttivo.

L'automazione e la robotica rappresentano la frontiera più avanzata, con sistemi di guida autonoma o semi-autonoma che stanno iniziando a trovare applicazione nei movimenti ripetitivi interni al cantiere (come il trasporto di materiali tra aree di stoccaggio e zone operative), ottimizzando i percorsi e riducendo i consumi energetici. I droni, dotati di sensori multispettrali e LiDAR, vengono sempre più impiegati per il monitoraggio volumetrico dei materiali e la pianificazione ottimizzata dei movimenti terra, riducendo significativamente il numero di viaggi necessari.

7 Casi Studio

7.1 Riqualificazione e messa in sicurezza della S.S. 337 "Val Vigezzo"

7.1.1 Descrizione sintetica del progetto

Il progetto, a cura di ANAS, dell'intervento infrastrutturale sulla Strada Statale 337 della Val Vigezzo riguarda l'adeguamento, la riqualificazione e la messa in sicurezza della S.S. 337 dal km 23+900 al km 29+668 per una lunghezza di circa 5 km interamente ricadenti nel Comune di Re, in Piemonte (**Tabella 17**). Il tracciato risulta particolarmente tortuoso in quanto si inserisce in un contesto tipicamente montano, caratterizzato dalla presenza di pareti rocciose molto acclivi e si sviluppa, in buona parte, in affiancamento alla ferrovia Vigezzina-Centovalli. L'infrastruttura stradale esistente, oggetto di riqualificazione e adeguamento, appartiene alla rete viaria nazionale di antica realizzazione e ne costituisce una delle direttrici internazionali di collegamento con la Svizzera. Il progetto di questo tratto di statale, infatti, ha inizio in prossimità del centro abitato di Re, in provincia di Verbano-Cusio-Ossola, per terminare poco prima del Confine di Stato con la Svizzera in località Ponte di Ribellasca.

L'approccio di ANAS alla progettazione dell'opera è stato sin da subito orientato alla sostenibilità, cercando di coniugare gli aspetti tipicamente tecnici e ingegneristici, a quelli sociali, economici e ambientali, nell'ottica della valorizzazione della sostenibilità a 360°.

Tenendo conto della valenza naturalistica del territorio interessato dall'intervento, il progetto esecutivo è stato sviluppato ed approfondito in modo da massimizzare gli aspetti di sostenibilità attraverso il corretto utilizzo delle risorse ambientali (minimizzando l'uso del suolo e rinaturalizzando alcuni tratti dismessi dell'attuale S.S. 337 riconvertiti in pista ciclabile), la riconnessione di itinerari della mobilità "dolce", la conservazione dell'identità e della qualità dell'ambiente locale (conservare l'aspetto percettivo e l'inserimento architettonico degli elementi tipologici dell'infrastruttura quali viadotti, imbocchi della galleria, barriere di sicurezza). Inoltre, sono stati previsti investimenti per la protezione e la valorizzazione dell'ambiente con particolare attenzione all'implementazione delle opere a verde e alla riqualificazione delle aree boscate.

TABELLA 17. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL PROGETTO ESECUTIVO.

Lunghezza dell'intervento	Categoria stradale di progetto	Livello progettuale Sottomesso a certificazione Envision	Tipo di intervento
5.768 m	Strada extraurbana secondaria tipo C2.	Progetto esecutivo	Adeguamento e messa in sicurezza

7.1.2 Elementi di sostenibilità relativamente alla decarbonizzazione del progetto

Il progetto ha previsto i seguenti elementi, in chiave di sostenibilità:

- Incremento della Vita Nominale. Per garantire una maggior durabilità di tutte le opere d'arte e conseguentemente ridurre anche i costi di manutenzione, la Vita Nominale dell'infrastruttura è stata incrementate da 50 a 100 anni.
- Utilizzo di bitume modificato Hard per la pavimentazione stradale. Al fine di ridurre le attività di manutenzione delle pavimentazioni, il progetto ha previsto l'utilizzo di bitumi modificati tipo "hard".

7.1.3 Elementi chiave di sostenibilità relativamente alla decarbonizzazione in fase di gara

Nella procedura di gara, sono stati adottati i criteri e requisiti indicati nella **Tabella 18**.

Il progetto di adeguamento della SS 337 "della Val Vigezzo" ha ottenuto, nell'assesment del progetto esecutivo, il massimo livello di certificazione Platinum da parte di ICM.

TABELLA 18. PRINCIPALI REQUISITI DELLA GARA.

Criteri premiali per l’offerta tecnica di gara	Integrazione agli interventi di Mitigazione degli impatti. Miglioramento della sostenibilità. Energia rinnovabile per il campo base: Pannelli fotovoltaici. Impianti di recupero per conferimento delle barriere di sicurezza rimosse. Approvvigionamento di acciaio riciclato.
Requisiti per la partecipazione alla gara	Possesso di certificazione/attestazione ISO 14001 per attività di “costruzione”, “manutenzione” e/o “progettazione” ovvero di “acquisizione e gestione di appalti con esecuzione affidata alle consorziate”, in corso di validità.
Oneri per l’appaltatore in fase di esecuzione	Approvvigionamento di acciaio e calcestruzzo da fornitori ricadenti nell’ambito EU/ETS, per le lavorazioni previste in determinate voci di prezzo. Utilizzo, per tutta la durata dei lavori, di Veicoli Euro 4 e mezzi pesanti Stage III per un minimo del 75% della flotta complessiva di autoveicoli e mezzi d’opera previsti per l’appalto. Stipula di un contratto di fornitura elettrica (necessaria alle attività del Campo Base e dei Cantieri Operativi), che preveda almeno il 30% di energia proveniente da fonti rinnovabili. Fornitura e posa in opera di n. 2 lampade con sensori crepuscolari fissi e n.26 lampade con sensori crepuscolari di movimento tali da gestire l’illuminazione del Campo Base.

7.2 Studio LCA per la SS 16 "Adriatica"

7.2.1 Obiettivo dello studio

L'obiettivo dello studio è stato quello di effettuare un confronto tra l'analisi LCA ed in particolar modo il parametro legato all'effetto serra (CO_2 eq) prodotto dalla realizzazione di un rilevato tradizionale ed un rilevato stabilizzato a calce. Tale confronto si è reso utile al fine di analizzare eventuali benefici dell'uno rispetto all'altro andando a ricercarne le motivazioni, in modo da indirizzare quanto più possibile la progettazione di una infrastruttura stradale verso i criteri di sostenibilità ambientale fin dalle prime scelte.

Il calcolo è stato condotto con specifico riferimento al caso studio del progetto definitivo "SS 16 "Adriatica" Variante tra il km 120+238 ed il km 147+420 - 2°strlcio – Variante di Alfonsine Loc. Taglio Corelli", suddiviso in lotti funzionali, nel tratto compreso tra il km 101+330 ed il km 147+420, nelle province di Ferrara e Ravenna (**Figura 23**).

La lunghezza del tratto relativo alla variante di Alfonsine risulta pari a circa 10 km, in cui sono previste tre opere d'arte maggiori (**Figura 24** e **Figura 25**).

Il progetto di ammodernamento consiste nell'adeguamento della sezione stradale attuale ad una sezione caratterizzata da un'unica carreggiata a due corsie per senso di marcia (**Figura 26**).

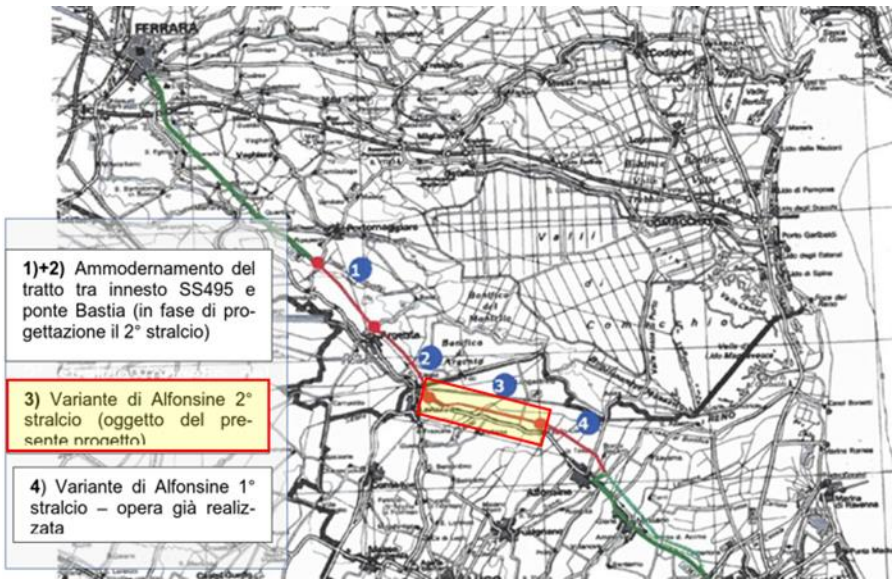


FIGURA 23. STRALCIO PLANIMETRICO DEL PROGETTO DI AMMODERNAMENTO DELLA S.S. 16 "ADRIATICA", SUDDIVISO IN LOTTI FUNZIONALI.



FIGURA 24. STRALCIO PLANIMETRICO DEL PROGETTO DI AMMODERNAMENTO DELLA S.S. 16 "ADRIATICA" CON RIPORTATE LE OPERE D'ARTE MAGGIORI.



FIGURA 25. FOTO SIMULAZIONI DELLE OPERE D'ARTE MAGGIORI PRESENTI NEL PROGETTO.

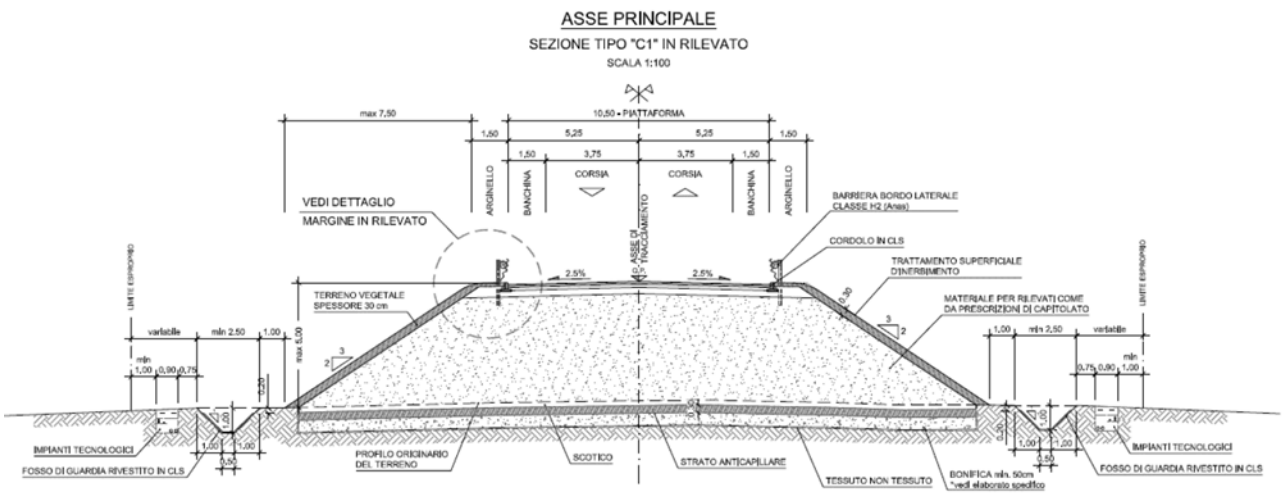


FIGURA 26. SEZIONE TIPOLOGICA IN RILEVATO DEL PROGETTO DI AMMODERNAMENTO DELLA S.S. 16 "ADRIATICA – VARIANTE DI ALFONSINE".

7.2.2 La metodologia di analisi e le scelte di base

Il documento progettuale a cui si è fatto riferimento è il Computo Metrico Estimativo (CME) del progetto in esame, all'interno del quale sono state individuate e prese in considerazione le voci relative alla realizzazione del rilevato tradizionale, così come previsto da progetto in esame. Si è fatto quindi riferimento ai seguenti codici del Computo (**Tabella 19**), considerando il primo tratto del corpo stradale (denominato AP.01).

TABELLA 19. DESCRIZIONE DELLE LAVORAZIONI NECESSARIE ALLA REALIZZAZIONE DEL RILEVATO STRADALE.

LAVORAZIONE	VOCE PREZZO DA CME	DESCRIZIONE
PIANO DI POSA E RILEVATO	**A.02.001.a**	Preparazione del piano di posa e rilevato - con materiali da cava a1/a3
FORNITURA MATERIALE PER RILEVATO	**A.02.003.a**	Fornitura materiali per rilevati stradali
BONIFICA	**A.02.009**	Materiali aridi con funzione anticapillare o filtro
	A.02.015.c	Materiali aridi - aventi pezzatura compresa tra cm 0,2 e cm 20 se provenienti da cave di prestito
	E.01.030.b	Fornitura e stesa di teli di geotessile con funzione di separazione e filtrazione
	E.01.040.b	Fornitura e stesa di geogriglia con marcatura ce - con resistenza nella direzione di maggior resistenza
TERRENO VEGETALE	**A.02.004.a**	Fornitura di terreno vegetale per rivestimento delle scarpate- fornito dall'impresa
	A.02.004.b	Fornitura di terreno vegetale per rivestimento delle carpate - da depositi dell'amministrazione
	A.02.005	Carico e scarico di materiale di proprietà dell'amministrazione

In base alle specifiche di ogni articolo, ricavate da "Analisi prezzi 2024" di ANAS (di seguito riportato come Analisi Prezzi), dei fattori di emissione e dei quantitativi previsti per il progetto della Variante di Alfonsine, è stato possibile calcolare la CO_2eq per la realizzazione del rilevato tradizionale.

7.2.3 Le modalità di calcolo

Entrando nel merito dei calcoli numerici effettuati, in **Tabella 20** si riporta uno stralcio di esempio che riassume il procedimento condotto per ogni articolo, portando alla determinazione delle emissioni unitarie e delle emissioni totali di CO_2eq. Il procedimento di calcolo si sviluppa in tre passaggi successivi.

TABELLA 20. ESEMPIO DEI CALCOLI RELATIVI ALLA DETERMINAZIONE DELLE EMISSIONI DI CO2 EQ E DEI COEFFICIENTI DI EMISSIONE.

Da tabella analisi prezzi				da software *One click LCA*			*Valore con quantità da tabella Computo metrico estimativo*	*Valore con quantità da tabella analisi prezzi*	**Emissioni a m²**
Articolo	*Descrizione*	*U.M.*	*Quantità*	*Fattore emissione*		*Mezzo/materiale associato*	*Emissioni kg CO_2 eq*		
	PREPARAZIONE DEL PIANO DI POSA E RILEVATO - CON MATERIALI DA CAVA A1/A3	*m²*	*1,00*						
A.02.001.a	**a) ASPORTAZIONE TERRENO:** - APRIPISTA DELLA POTENZA FINO AD HP 180 (135 kw)	h	0,001	0,16	kg CO2 eq /m3	Wheel loader operation per 1 m3 of moved earth mass, rated power: 120 kW, operating weight: 26t, material class 2 (compact soil, hard clay, gravel)	2.933	0,032	0,032
	b) COMPATTAZIONE DEL SOTTOFONDO: - RULLO SEMOVENTE DEL PESO DI TONN 8	h	0,001	0,057	kg CO2 eq /m2	Asphalt compaction with asphalt roller compactor, per m2, P=55 kW, operating weight: 7t, roller width: 1.45m, effective rolling capacity: 690 m2/h	5.179	0,057	0,057

Il primo passaggio consiste nel considerare, per ogni articolo del "Prezziario ANAS" (es. A.02.001.a: Preparazione del piano di posa), le diverse voci presenti nell'Analisi Prezzi, per ognuna delle quali è associato un valore unitario di riferimento. Nell'esempio riportato nella tabella precedente, si ha che per la preparazione del piano di posa saranno necessarie come prime due attività l'asportazione del terreno per mezzo dell'apripista e la compattazione del sottofondo per mezzo del rullo semovente. I due mezzi di lavoro, come indicato dalle tabelle di Analisi Prezzi hanno entrambi una produttività di 0,001 h/m²;

Il secondo passaggio consiste nella determinazione dei fattori di emissione relativi ai mezzi d'opera, ricavati, nel caso di studio, sulla base di database associati a "One Click LCA" e pari rispettivamente a 0,16 kg CO2 eq/m³ e 0,0565 kg CO2 eq/m² nel caso dell'esempio sopra riportato.

Il terzo passaggio consiste nella determinazione delle emissioni unitarie e totali per ogni voce dell'articolo. Considerate le diverse unità di misura che legano la stessa voce dell'articolo, ai fini del calcolo delle emissioni è stato necessario omogenizzare le unità di misura tra loro. In particolare, per l'attività di asportazione del terreno, il valore di CO_2 eq unitario è espresso in CO_2 eq/m² (si considera al m² così come l'unità di misura considerata nell'analisi prezzi e nel CME) ed è stato ricavato trasformando il fattore di emissione da kg CO_2 eq/m³ a kg CO_2 eq/m² moltiplicandolo per 0,2 m (spessore di asportazione del terreno per la realizzazione del piano di posa). In questo modo è stata determinata l'emissione unitaria relativa all'asportazione del terreno, pari a 0,032 kg CO_2 eq/m². Le emissioni complessive per la stessa voce dell'articolo sono successivamente state calcolate moltiplicando l'emissione unitaria per il quantitativo presente nel CME relativo all'articolo A.02.001.a e pari a 91.662,45 mq (superficie del piano di posa del rilevato); attraverso tale calcolo l'emissione complessiva è stata stimata in 2.933 kg CO_2 eq.

Seguendo lo stesso procedimento sono state calcolate le emissioni di tutte le voci dei diversi articoli considerati per la realizzazione del rilevato tradizionale e per la realizzazione del rilevato stabilizzato a calce del tratto AP.01 della Variante di Alfonsine.

Successivamente, per ogni articolo sono state calcolate le emissioni di CO_2 eq come somma dei valori di emissioni di CO_2 eq calcolate per ogni voce dell'analisi prezzi dell'articolo.

Le emissioni unitarie associate a ciascun articolo sono state calcolate dividendo le emissioni totali prodotte dall'articolo per il quantitativo previsto da CME. A titolo esemplificativo, la CO_2 eq associata dall'articolo A.02.001.a, pari a 271 t, è stata divisa per i 91.662,45 mq ottenendo 0,003 t CO_2 eq/mq come emissione unitaria. Tale valore risulta quindi ricavato indirettamente una volta stimate le emissioni totali, in quanto non è possibile, e non avrebbe senso, ottenere un valore unitario complessivo relativo all'articolo a partire dai valori unitari calcolati per le singole voci dell'analisi prezzi, ognuno dei quali ha una propria unità di misura.

L'emissione totale calcolata sulla tratta AP.01 è quindi stata ottenuta dalla somma delle emissioni di CO_2 eq prodotta per gli articoli considerati da CME, sia per la realizzazione del rilevato tradizionale che del rilevato stabilizzato a calce.

Nello schema di **Figura 27** si riporta il processo logico che ha portato alla determinazione delle emissioni.

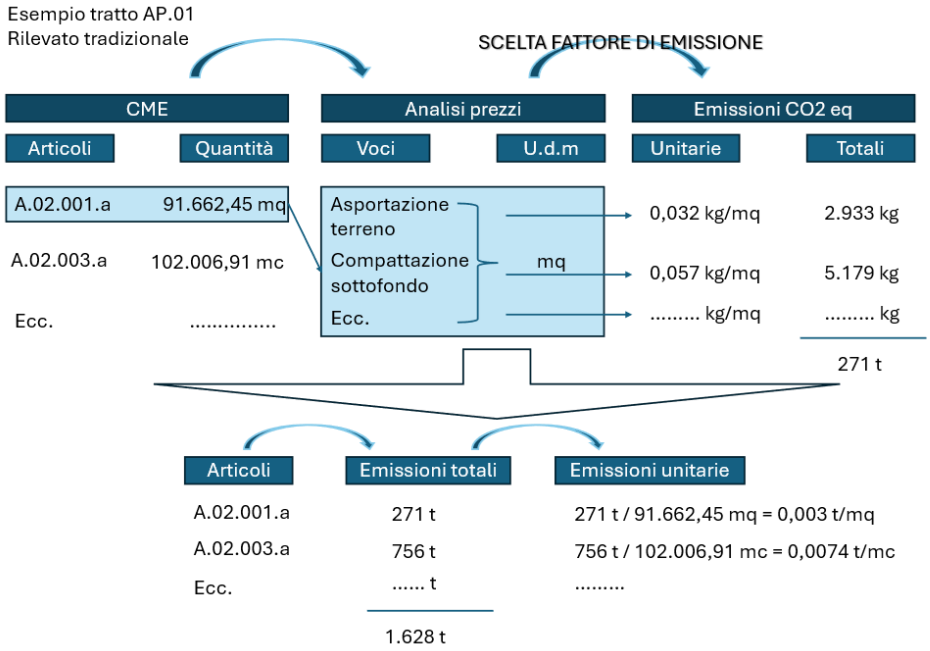


FIGURA 27. SCHEMA ILLUSTRATIVO DELLA DETERMINAZIONE DELLA CO_2 PER IL RILEVATO STRADALE.

Si specifica che il calcolo appena descritto, a partire dalle voci dei CME, è stato effettuato solamente per la tratta AP.01. Per avere contezza delle emissioni complessive prodotte dalla realizzazione dei rilevati sull'intero tracciato sono state effettuate le seguenti semplificazioni:

- Il valore di emissione unitario stimato per ogni articolo sulla tratta AP.01 è stato moltiplicato per i quantitativi complessivi desunti dal CME relativi alla realizzazione del rilevato sull'asse principale e sulle rampe di svincolo e dei cavalcavia, ottenendo le emissioni per articolo sull'intero tracciato.
- L'emissione totale per la Variante di Alfonsine è stata poi calcolata come la somma delle emissioni di CO2 eq prodotta dagli articoli considerati da CME sia per la realizzazione del rilevato tradizionale che del rilevato stabilizzato a calce.

7.2.4 I risultati del calcolo

Dai calcoli effettuati emerge come la produzione di calce, il trasporto della stessa e l'attività di compattazione del materiale comporti una maggiore produzione di CO_2 eq nella fase di realizzazione del piano di posa e del rilevato. Di contro l'assenza di fornitura del materiale da cava riduce notevolmente le emissioni di CO_2 eq generate dal trasporto.

I risultati evidenziano un valore totale pari a circa 8.874 tCO_2eq/mc per il rilevato tradizionale, a fronte di un valore pari a circa 4.000 tCO_2eq/mc per il rilevato stabilizzato a calce. Ne consegue, a favore di quest'ultimo, una riduzione di oltre il 50% ci CO_2 prodotta.

È importante evidenziare come tale dato tenga conto soltanto della fase realizzativa degli interventi considerati, senza prendere in considerazione l'eventuale diversa durata degli stessi.

7.2.5 Possibili sviluppi futuri

Il calcolo sviluppato ed applicato al caso studio della Variante di Alfonsine ha proposto un approccio diverso per l'analisi LCA, che potrebbe avere successivi sviluppi, ottimizzazioni ed eventuali affinamenti.

Uno dei temi da studiare ed approfondire riguarda sicuramente la scelta del fattore di emissione, valore che influenza notevolmente il risultato finale. Per questo è fondamentale comprendere a fondo le caratteristiche del mezzo o del materiale da impiegare per scegliere al meglio il relativo fattore di emissione dalle banche dati a disposizione. Altra tematica da approfondire riguarda le emissioni unitarie e la loro possibile omogenizzazione delle unità di misura.

Inoltre, considerate le semplificazioni effettuate per passare dalle emissioni sulla tratta AP.01 al calcolo delle emissioni complessive sull’intero tracciato, sarebbe utile verificare l’incertezza di tale semplificazione andando ad effettuare il calcolo vero e proprio su tutti i tratti.

Per dare maggiore validità alla metodologia proposta ed affinare gli input previsti si potrebbe verificare in cantiere la produzione effettiva di CO_2eq per la realizzazione del rilevato, confrontando le due modalità di realizzazione (tradizionale e stabilizzato a calce) al fine di validare i benefici stimati dal presente approccio di calcolo con un caso reale.

7.3 La piattaforma Evolutive-Pavement Management System (E-PMS) e l'indice Environmental Asphalt Rating (EAR)

Negli ultimi anni, la società Movyon SpA, del Gruppo Autostrade per l'Italia (ASPI), ha sviluppato un sistema di *Pavement Management System* di ultima generazione denominato E-PMS, sigla che sta per *Evolutive-Pavement Management System*, impiegato a supporto della definizione dei piani di manutenzione delle pavimentazioni stradali.

L'E-PMS è concepito infatti per elaborare i dati ricavati dalle campagne di monitoraggio delle condizioni del manto stradale, fornire un'indicazione della vita utile delle pavimentazioni e strutturare proposte ottimizzate di interventi manutentivi (**Figura 28**).

Gli algoritmi implementati nella piattaforma mettono in relazione molteplici parametri rappresentativi della condizione stradale quali portanza, aderenza e regolarità superficiale. Questi vengono valutati con l'impiego di mezzi ad alto rendimento, i quali consentono di effettuare ogni anno screening completi degli oltre 6.000 km stradali gestiti da ASPI senza impattare sul traffico.

Il processo di analisi dei dati raccolti restituisce un'indicazione chiara sulla vita utile della pavimentazione nelle diverse sezioni stradali della rete, individuando per ciascuna l'attività manutentiva più adeguata al mantenimento degli standard qualitativi prefissati[10].

L'elaborazione dei dati prevede molteplici operazioni quali l'aggiornamento degli spettri di traffico, la determinazione delle sezioni stradali omogenee in termini di materiali e condizioni prestazionali, l'impostazione e la verifica delle curve di decadimento e la definizione dei setting d'analisi, differenziabili per ciascuna sezione di traffico. La piattaforma fornisce infatti la possibilità di modificare una molteplicità di impostazioni di elaborazione e ottimizzazione, relative sia alle opzioni di manutenzione per la personalizzazione degli interventi, sia quelle di carattere finanziario per la definizione dei budget in un orizzonte ventennale.



FIGURA 28. DIAGRAMMA DI FLUSSO DELL'E-PMS.

Il sistema ha come obiettivo l'ottimizzazione delle attività di manutenzione preventiva ai fini del mantenimento dei massimi standard prestazionali delle pavimentazioni, pianificando l'insieme degli interventi nel lungo periodo in funzione dei criteri di ottimizzazione personalizzati e del budget allocato. Nel complesso, la piattaforma diventa così funzionale ad assistere gli operatori specializzati nella formulazione dei piani annuali di manutenzione.

Una funzionalità particolarmente innovativa dell'E-PMS è rappresentata dalla possibilità di valutare l'impatto ambientale associato alle attività manutentive delle pavimentazioni stradali, per mezzo dell'implementazione dell'indice EAR (*Environmental Asphalt Rating*). L'introduzione dell'indice EAR è avvenuta con molteplici obiettivi. Innanzitutto, la prima e principale applicazione è quella di stimare l'impatto ambientale associato ai piani di manutenzione, risultando utile a definire strategie manutentive orientate al migliore compromesso tra prestazioni, impatto ambientale ed esigenze operative. In secondo luogo, l'EAR può rappresentare uno strumento utile

[10] La procedura è stata sviluppata in collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche

all’introduzione di requisiti premiali negli iter di gara, fornendo alle autorità aggiudicatrici un metodo per la valutazione delle offerte tecniche e l'assegnazione dei punteggi durante la fase di gara. Infine, un tale indice può fornire una base per valutare gli effetti benefici delle nuove tecnologie di intervento in termini di economia circolare e sostenibilità ambientale, in confronto alle metodologie più tradizionali.

L'indice EAR è stato concepito come un valore adimensionale basato sulle informazioni che possono essere estratte dalle certificazioni EPD delle miscele bituminose, capace di raccogliere e sintetizzare i diversi contributi di impatto ambientale relativi sia alla fase di produzione sia a quella di stesa delle miscele di conglomerato bituminoso.

La procedura di calcolo (**Figura 29**) prevede l’adozione di un set di fattori di normalizzazione e di ponderazione utili a sintetizzare in un unico indice numerico tutti gli indicatori ambientali delle certificazioni EPD, rendendoli confrontabili in termini numerici, congruenti da un punto di vista fisico-matematico e tenendo conto della loro importanza relativa in relazione allo specifico contesto oggetto di studio.

Il processo di normalizzazione e ponderazione dei diversi indicatori ambientali fornisce quindi un numero adimensionale, l'indice EAR, che sintetizza i diversi impatti di un determinato processo di manutenzione della pavimentazione stradale.

Infine, sono anche stati definiti degli indicatori prestazionali da applicare come coefficienti moltiplicativi all'indice EAR, al fine di ottenere un indice complessivo, denominato EARc, che tenga conto anche delle proprietà strutturali e funzionali di una pavimentazione flessibile. Tenendo conto anche delle prestazioni meccaniche delle miscele, l'indice EARc è in grado di valutare quantitativamente qualsiasi proposta di manutenzione nell'intero ciclo di vita dell’infrastruttura.

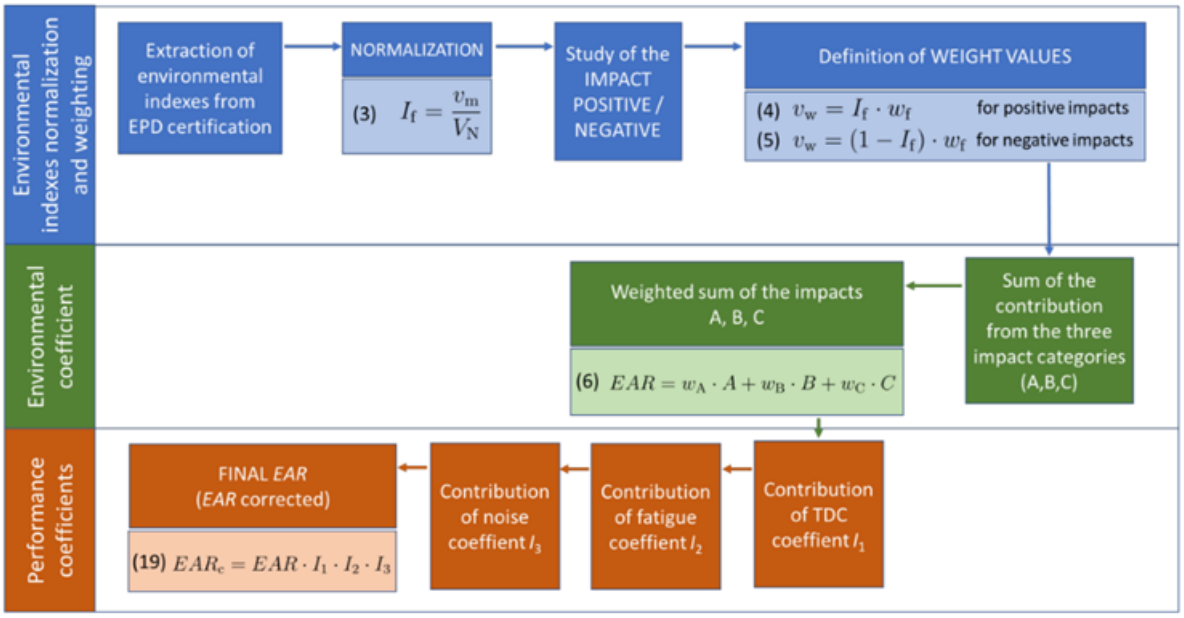


FIGURA 29. PROCEDURA DI CALCOLO DEGLI INDICI EAR E EARC.

Recentemente, sono stati proposti ulteriori miglioramenti del metodo di calcolo degli indici EAR e dell'EARc, aggiornando l'insieme degli indicatori ambientali, dei fattori di normalizzazione e di ponderazione in base ai più recenti sviluppi dei metodi, delle pratiche e degli standard di *Life Cycle Assessment* (LCA). Inoltre, è stata proposta un'estensione dell’indice per le pavimentazioni rigide, attraverso la definizione dell'indice ECR (*Environmental Rate for Concrete Pavements*) che, come l'indice EARc, combina indicatori ambientali e indicatori prestazionali definiti sulla base delle teorie e dei metodi attualmente adottati nel campo dell'ingegneria delle pavimentazioni.

7.4 Innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica sull'autostrada A4 Torino-Milano

7.4.1 Contesto e obiettivi

ASTM (Autostrada Torino-Milano) è stato, nel 2021, il primo operatore autostradale europeo, e il più grande in termini di chilometri gestiti, a stabilire obiettivi di riduzione delle emissioni su base scientifica al 2030, validati da *Science Based Targets initiative* (SBTi) e quindi in linea con le traiettorie di riduzione previste dall'Accordo di Parigi. Inoltre, tali impegni sono stati integrati nella strategia finanziaria del Gruppo attraverso la pubblicazione del primo *Sustainability Linked Financing Framework* che collega i risultati ambientali a specifici indicatori finanziari, garantendo così un approccio coerente e misurabile della sostenibilità.

In linea con gli obiettivi di Gruppo, SATAP (società concessionaria responsabile della gestione della tratta autostradale A4 che collega i capoluoghi di Piemonte e Lombardia) ha elaborato un piano economico finanziario per il periodo 2023-2026 ("EFP 2023-26") finalizzato a trasformare l'autostrada A4 Torino-Milano in una infrastruttura digitale, resiliente e sostenibile.



FIGURA 30. VISIONE DI INSIEME DEL PROGETTO DI "INNOVAZIONI TECNOLOGICHE PER LA TRANSIZIONE ECOLOGICA" DELL'AUTOSTRADA A4 TORINO-MILANO.

La visione di insieme del progetto è fondata su 3 principali obiettivi che raccolgono le iniziative progettuali allineate ai principi di trasformazione di ASTM:

- Infrastrutture Digitali – implementazione di soluzione innovative di Smart Road e controllo digitale dell'infrastruttura.
- Infrastrutture Resilienti – implementazione di sistemi di monitoraggi dell'infrastruttura, utilizzo Intelligenza Artificiale e rafforzamento impianti tecnologici
- Infrastrutture Sostenibili – sistemi innovativi di raccolta vasche di prima pioggia, pavimentazioni ecologiche, stazioni di ricarica elettrica, impianti fotovoltaici, sistemi di efficientamento energetico

L'A4 Torino-Milano intende rappresentare dunque un laboratorio di "transizione ecologica e digitale" finalizzato a produrre benefici per ambiente (riduzione delle emissioni, ridotto impiego di materiali per i conglomerati bituminosi, mitigazione acustica, valorizzazione territoriale, energie rinnovabili), utenti (sicurezza, comfort di guida, fluidità, adattamento alle condizioni del traffico) e concessionaria (gestione ottimale, controllo della mobilità, resilienza dell'infrastruttura, risparmio del tempo di intervento, riduzione dei costi di gestione).

Il progetto ha previsto una fase iniziale di applicazione su un tratto di 30 km tra Novara Est e Milano Ghisolfa. A seguito dei positivi risultati ottenuti nella fase pilota, le soluzioni innovative si stanno estendendo all'intera tratta Torino - Milano, consolidando l'impegno verso la transizione ecologica e digitale dell'infrastruttura autostradale.

Nel seguito della presentazione del caso studio verranno evidenziati principalmente gli elementi progettuali che hanno contribuito alla decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi.

7.4.2 Innovazioni Tecnologiche

7.4.2.1 Pavimentazioni ecologiche

Nell'ambito del progetto di Innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica dell'A4 Torino-Milano è stata sperimentata una nuova miscela per le pavimentazioni.



FIGURA 31. A SINISTRA: PAVIMENTAZIONE IN PROGETTO DI TRASFORMAZIONE AUTOSTRADA A4 TORINO-MILANO, A DESTRA: LA FASE DI FRESATURA DEL MANTO STRADALE ESISTENTE PRESSO IL CAMPO PROVE DELL'AUTOSTRADA A4 A OTTOBRE 2022.

La miscela bituminosa è stata progettata da SINA con l'obiettivo finale di sviluppare le migliori soluzioni tecnologiche, garantendo al contempo la tutela dell'ambiente e l'uso razionale delle risorse non rinnovabili. E'stato condotto uno studio [11] con lo scopo di valutare i possibili impatti ambientali ed economici della produzione impiantistica di conglomerato bituminoso contenente percentuali significative di RAP (fino al 70%) e uno specifico Compound Polimerico (PC). Lo studio illustra gli impatti ambientali ed economici, valutati mediante approcci di *Life Cycle Analysis* (LCA) e *Life Cycle Costing* (LCC), della produzione e manutenzione di un pacchetto autostradale, confrontando diverse soluzioni produttive.

Nello specifico, sono state comparate miscele tradizionali contenenti il 30% di granulato di conglomerato bituminoso e bitume modificato (formulazione diffusamente adottata per la produzione di conglomerato bituminoso per gli strati di base e binder nella maggior parte delle autostrade ASTM) con miscele di riciclo che prevedono l'impiego di granulato in quantità pari al 70% in peso, bitume tal quale e il 6% di un compound polimerico (PC) per la modifica dei conglomerati bituminosi. Il compound è prodotto con materiali plastici di recupero selezionati e grafene. Al fine di valutare come le scelte produttive possano influenzare sia l'impatto ambientale sia quello economico nel ciclo di vita dell'infrastruttura, lo studio è stato esteso al km di corsia autostradale (larga 4 metri), proiettando l'impiego delle due soluzioni su due archi temporali di 20 e 35 anni.

Il nuovo manto stradale innovativo realizzato in A4 è composto da un compound contenente grafene, additivi polimerici e plastiche dure da recupero, appositamente selezionate e altrimenti destinate a termovalorizzazione, e dal 70% di fresato proveniente dalla pavimentazione esistente, riducendo così al solo 30% l'utilizzo di nuovi aggregati naturali rispetto ad una manutenzione tradizionale. Dagli studi eseguiti è stato stimato che, rispetto ad una pavimentazione realizzata con metodologia tradizionale, la nuova pavimentazione consentirà di riutilizzare circa 1,5 milioni di kg di plastiche dure (pari circa al peso di oltre 1.200 automobili), risparmiando quasi 23 milioni di kg di bitume e circa 480 milioni di kg di materie prime estratte da cave (-40% di materiali non rinnovabili impiegati rispetto alle tecnologie tradizionali).

7.4.2.2 Sistemi innovativi di raccolta e stoccaggio delle acque di piattaforma

Il progetto di "Innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica" prevede inoltre sistemi ausiliari quali il recupero e l'accumulo delle acque di piattaforma, permettendo alla Concessionaria SATAP il riutilizzo per scopi manutentivi delle acque piovane riducendo il consumo di risorsa idrica.

[11] Studio condotto in collaborazione con l'Università di Bologna

7.4.2.3 Impianti fotovoltaici

È prevista la realizzazione di campi fotovoltaici per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili mediante l’installazione di moduli fotovoltaici in aree residuali di proprietà della concessionaria SATAP lungo il tronco A4 Torino-Milano. L’obiettivo sarà quello di alimentare i caselli e gli svincoli limitrofi della Concessionaria riducendo l’approvvigionamento energetico da rete pubblica. Nella maggior parte, i siti di progetto abbinano nella medesima area i sistemi di stoccaggio delle acque e gli impianti fotovoltaici al fine di sfruttare e ottimizzare quanto più possibile le aree a disposizione.

7.4.3 Risultati principali

Dagli studi eseguiti, si è stimato che le nuove miscele per pavimentazioni ecologiche garantiscano una riduzione delle emissioni di CO_2eq fino al 35 % rispetto a quelle tradizionali. Il positivo effetto dovuto all’impiego di maggiori quantità di materiali di riciclo e/o recupero sia all’interno dello scheletro litico, sia nella produzione del compound polimerico speciale, è confermato anche nello scenario a lungo termine di 35 anni sulla base degli studi eseguiti sulla tratta pilota di 1 Km. In base alle prestazioni di durabilità dei conglomerati bituminosi con compound polimerici speciali che costituiscono gli strati di base e binder, le emissioni di CO_2 eq in atmosfera si ridurrebbero notevolmente considerando sia l’incremento di vita utile potenzialmente connesso al compound polimerico, sia i benefici dovuti all’uso di aggregati riciclati in un impianto di nuova generazione. Le produzioni dei conglomerati per realizzare 1 m^2 di pacchetto autostradale nel caso di vita utile di 20 anni comportano una riduzione percentuale delle emissioni (kg di CO_2 eq.) pari a circa il 13% e il 23% quando il granulato è modellato rispettivamente come prodotto interno o rifiuto evitato. L’incremento della vita utile a 35 anni comporta un minor numero di rifacimenti lungo la vita nominale della pavimentazione permettendo una riduzione dei gas climalteranti da circa il -19% al -35% quando il granulato è modellato rispettivamente come prodotto interno o rifiuto evitato.

Lo studio esteso a 35 anni, validato dall’azienda produttrice, ha dimostrato che l’impiego del compound sia in grado di prolungare la vita utile degli strati legati a bitume del 75%. Si osservi infatti che l’incremento della vita utile comporta un minor numero di rifacimenti nell’arco temporale di 35 anni.

Nell’ambito dei progetti sugli impianti fotovoltaici, le valutazioni di impatto ambientale con metodologia LCA hanno stimato che, con una produzione annua di circa 130 Kwh al metro quadro per una vita nominale di 25 anni, si garantisce una riduzione di circa il 93% di emissioni di gas climalteranti rispetto al mix energetico nazionale italiano.

Il progetto rappresenta un esempio concreto di transizione ecologica e di decarbonizzazione del settore autostradale, con risultati misurabili in termini di sostenibilità ambientale, efficienza energetica e innovazione tecnologica. I dati raccolti negli studi confermano l’efficacia delle soluzioni proposte.

Tra i principali vantaggi ed aspetti individuati dagli studi condotti si evidenziano i seguenti.

- Vantaggi ambientali – sulla base di uno studio LCA, l’applicazione del conglomerato bituminoso altamente modificato, contenente grafene e granulato di asfalto e specifica tipologia di plastica da recupero appositamente selezionata (che ad oggi non rientra nella filiera standard del riciclo ma è generalmente destinata agli impianti di termovalorizzazione), permetterebbe una notevole riduzione delle emissioni di gas climalteranti rispetto alle miscele tradizionali e una riduzione sulle principali categorie di impatto ambientale quali i danni alla salute umana (riduzione del 24÷40%), all’ecosistema (riduzione del 19÷36%) e alla disponibilità delle risorse (riduzione del 34÷37%). La valutazione sull’analisi del ciclo di vita dei campi fotovoltaici ha evidenziato una notevole riduzione delle emissioni di gas climalteranti che è stata misurata tramite metodologia LCA. Gli impianti di recupero e accumulo delle acque permettono alla Concessionaria di attuare soluzioni organizzative e gestionali in grado di tutelare la risorsa idrica.
- Vantaggi economici – il gruppo ASTM si è focalizzato su una ricerca di materiali e tecniche di decarbonizzazione. Le soluzioni valutate, a fronte degli importanti investimenti economici iniziali, comportano vantaggi anche dal punto di vista economico. Infatti, dagli studi condotti su un orizzonte temporale di 35 anni si è dimostrato che l’impiego del compound polimerico speciale aumenta la vita utile del 75%. Questo comporta una netta diminuzione dei costi totali di produzione e manutenzione sull’intera vita utile del pacchetto stradale. L’analisi economica della soluzione proposta dal Gruppo ASTM per la modifica dei conglomerati bituminosi in un

impianto di nuova generazione risulta sempre più economica della soluzione che impiega miscele tradizionali e il 30% di granulato di conglomerato bituminoso in impianto discontinuo. L’investimento per la realizzazione dei campi fotovoltaici, nelle aree residuali del tronco autostradale A4 Torino-Milano, comporterà una riduzione dei consumi energetici e quindi minori costi di gestione della Concessionaria. Anche l’investimento sulla realizzazione degli impianti di recupero e accumulo delle acque piovane ed il loro riutilizzo per scopi manutentivi comporterà una riduzione degli approvvigionamenti idrici con conseguenti minori costi di gestione.

Conclusioni e sviluppi futuri

La decarbonizzazione dei processi costruttivi e manutentivi rappresenta oggi una priorità strategica per l’intero settore delle infrastrutture stradali, sostenuta da un quadro normativo in rapida evoluzione e da aspettative crescenti in tema di sostenibilità ambientale. Tutti gli attori coinvolti – enti gestori, amministrazioni pubbliche, produttori di materiali, progettisti e imprese esecutrici – sono chiamati a ripensare le proprie pratiche verso modelli di progettazione, realizzazione e gestione in grado di ridurre in maniera significativa l’impronta carbonica associata alle opere infrastrutturali.

Il presente report è stato elaborato con l’obiettivo di fornire un quadro di riferimento esaustivo e aggiornato sul tema della decarbonizzazione, utile come base per la definizione di strategie e politiche di comparto efficaci e coerenti con le evoluzioni regolatorie e tecnologiche in atto.

All’interno del documento vengono individuati tre principali ambiti strategici di intervento per la riduzione delle emissioni nei processi costruttivi e manutentivi delle infrastrutture stradali, con indicazione delle priorità di azione:

- **Governance e progettazione**
  - Necessità di integrare in modo sistematico criteri ambientali, parametri emissivi e indicatori di performance già nelle prime fasi decisionali del progetto.
  - Allineamento ai riferimenti normativi multilivello – europei, nazionali e locali – e alle migliori pratiche internazionali in materia di sostenibilità e transizione ecologica.
- **Materiali e tecnologie low carbon**
  - Sviluppo e impiego di soluzioni a ridotta intensità emissiva e promozione di processi industriali innovativi.
  - Adozione di politiche finalizzate alla trasformazione della supply chain, favorendo disponibilità, qualità, tracciabilità e certificazione dei materiali low carbon attraverso standard condivisi e strumenti di qualificazione tecnica.
- **Impianti e cantieri**
  - Promozione e progressiva diffusione di mezzi d’opera e macchinari a basse emissioni, incluse soluzioni elettriche, ibride o alimentate da combustibili alternativi.
  - Ottimizzazione energetica dei cicli produttivi attraverso sistemi digitali, automazione avanzata e monitoraggi continui dei parametri operativi.
  - Pianificazione logistica del cantiere orientata alla riduzione degli spostamenti, all’impiego di risorse locali e alla massimizzazione dell’efficienza complessiva, con effetti diretti sulla diminuzione delle emissioni operative.

I prossimi step individuati dalla Task Force 4.5 riguardano lo sviluppo di strumenti operativi a supporto della decarbonizzazione del settore. Un’azione prioritaria, in tal senso, concerne l’implementazione di procedure LCA per la valutazione dell’impatto ambientale applicate a specifiche componenti dell’infrastruttura (es. pavimentazioni stradali), atte a consentire lo svolgimento di analisi comparate e decisionali basate su elementi quantitativi nell’ambito della progettazione.

Un’ulteriore azione individuata dalla Task Force consiste nel censimento delle strategie, iniziative e misure di decarbonizzazione adottate dai diversi attori del comparto, attraverso un sondaggio conoscitivo strutturato finalizzato a mappare la situazione attuale nel nostro Paese.

Il lavoro di raccolta e analisi delle informazioni potrà inoltre costituire la base per la redazione di linee guida condivise con tutti i soggetti coinvolti, promuovendo un approccio coordinato e sinergico tra enti pubblici, operatori privati e stakeholder tecnici.

L’obiettivo generale è quello di definire un percorso comune, credibile e attuabile per la progressiva decarbonizzazione delle infrastrutture stradali nel medio-lungo periodo.

Considerazioni per i Decision Makers

Il percorso verso infrastrutture *low carbon* offre, oltre ai benefici di natura ambientale, grandi opportunità per la modernizzazione del settore, con impatti positivi su sicurezza, qualità ed efficienza delle opere.

La decarbonizzazione richiede il coordinamento di tutti gli attori della filiera, dagli enti gestori ai progettisti, dalle imprese di costruzione ai produttori di materiali, fino ai fabbricanti delle macchine e degli impianti.

In tale contesto, la collaborazione con il mondo accademico e della ricerca è fondamentale per accelerare innovazione, validazione tecnica e trasferimento tecnologico.

Glossario

Aderenza	Qualità del contatto della superficie stradale che consente al guidatore di accelerare, di dirigere e di frenare il suo veicolo (contrario di scivolosità della strada che indica una insufficienza di questa aderenza)
AI	Artificial Intelligence (Intelligenza Artificiale). Ramo dell’informatica che sviluppa sistemi in grado di svolgere compiti tipici dell’intelligenza umana, come apprendere, ragionare, riconoscere pattern e prendere decisioni.
ARAN	Automatic Road Analyser. Mezzo ad alto rendimento per la rilevazione di parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali, legati in particolare alla proprietà della regolarità.
Asset	Risorsa di valore, fisica o funzionale, posseduta o controllata da un’organizzazione. Esempi di asset sono le opere infrastrutturali quali strade, ponti, gallerie, reti idriche, ferrovie, impianti, segnaletica, corpi illuminanti e altre componenti che richiedono monitoraggio, manutenzione e gestione lungo il loro ciclo di vita.
Asset Management	Processo strategico e operativo volto a gestire in modo efficace e sostenibile gli asset durante tutto il loro ciclo di vita, con l’obiettivo di massimizzarne il valore, ottimizzare le prestazioni e minimizzare i costi e i rischi. Nel campo delle infrastrutture civili, l’asset management include attività come l’inventario, il monitoraggio dello stato, la manutenzione programmata, la pianificazione degli investimenti e la valutazione del rischio.
BIM	Building Information Modeling. Metodologia digitale per la progettazione, costruzione e gestione di edifici e infrastrutture, basata sulla creazione di modelli 3D integrati con informazioni tecniche, logistiche e gestionali, utili a tutte le fasi del ciclo di vita dell’opera.
BMS	Bridge Management System. Piattaforma di Asset Management per la gestione di ponti e viadotti.
BREEAM	Sitema di valutazione e premiazione per la sostenibilità dei progetti di ingegneria civile, infrastrutturale, paesaggistica e del demanio pubblico. La sua funzione è incoraggiare l'eccellenza ambientale e migliorare la performance ambientale e sociale dei progetti fin dalla fase di specifica e progettazione.
CAT	Coefficiente di Aderenza Trasversale. Indice prestazionale standardizzato che descrive l’aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale in direzione trasversale. In lingua inglese, chiamato SFC (Sideway Force Coefficient).
CBR	Il California Bearing Ratio è un test utilizzato per valutare la capacità portante di terreni e materiali granulari impiegati nella costruzione di strade e pavimentazioni. Consiste nel misurare la resistenza alla penetrazione di un pistone standard nel materiale confrontandola con quella di una terra californiana di riferimento.
Cradle to gate	Approccio all’analisi LCA che prevede di definire i confini del sistema-prodotto analizzato in modo da comprendere tutte le attività che intercorrono tra l’acquisizione, trasformazione delle materie prime e il confezionamento del prodotto.
Cradle to grave	Approccio all’analisi LCA che prevede di definire i confini del sistema-prodotto analizzato in modo da comprendere tutte le attività che intercorrono tra l’acquisizione, trasformazione delle materie prime e il conferimento del prodotto a fine vita.
Data-driven	Approccio, strategia o processo decisionale basato sull’analisi e sull’interpretazione di dati, piuttosto che su intuizioni, opinioni o esperienze soggettive.
Digital Twin	Rappresentazione digitale dinamica e interattiva di un oggetto, sistema o processo fisico (ad esempio, di un asset infrastrutturale) che ne replica il comportamento e le

	caratteristiche, anche in tempo reale, attraverso l’integrazione di dati, modelli e sensori.
DoP	Declaration of Performance (Dichiarazione di Prestazione). Documento obbligatorio per i prodotti da costruzione immessi sul mercato europeo, redatto dal fabbricante in conformità al Regolamento Europeo sui Prodotti da Costruzione (CPR), in cui vengono dichiarate le prestazioni del prodotto in relazione alle sue caratteristiche essenziali previste dalle norme tecniche vigenti.
EAR	Environmental Asphalt Rating. Indice utile a valutare l’impatto ambientale associato alle attività manutentive delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso.
ECR	Environmental Rate for Concrete Pavements. Indice utile a valutare l’impatto ambientale associato alle attività manutentive delle pavimentazioni stradali in conglomerato cementizio.
ENVISION	Protocollo per valutare la sostenibilità delle infrastrutture, che misura l'impatto ambientale, sociale ed economico attraverso un framework di 64 criteri (crediti) divisi in cinque categorie.
EPD	Environmental Product Declaration (Dichiarazione Ambientale di Prodotto). Documento standardizzato che riporta in modo oggettivo e verificato gli impatti ambientali di un prodotto nelle diverse fasi del suo ciclo di vita. È redatto secondo norme ISO e/o EN e consente il confronto trasparente tra prodotti simili in termini di sostenibilità.
ETS	Emission Trading System. Schema europeo per lo scambio di quote di emissione volto a ridurre le emissioni di gas serra.
ERMES	Equipment for Routine evaluation of Macrotexture Evenness and Skid resistance. Mezzo ad alto rendimento per la rilevazione di parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali legati a proprietà quali aderenza, regolarità e tessitura.
GHG	Greenhouse Gases (in italiano, gas a effetto serra). Gas naturali o artificiali presenti nell'atmosfera capaci di assorbire e intrappolare il calore (radiazione infrarossa).
GWP-Total	Total Global Warming Potential (in italiano, Potenziale di Riscaldamento Globale Totale). Indica il contributo di un insieme di gas serra (inclusi tutti i gas) al riscaldamento globale, rispetto a quello dell'anidride carbonica (CO2), che ha un valore di riferimento di 1.
IoT	Internet of Things. Rete di dispositivi intelligenti connessi a Internet che comunicano tra loro e con sistemi centrali, permettendo il monitoraggio, l’analisi dei dati e l’automazione di processi in tempo reale in diversi settori applicativi.
IRI	International Roughness Index. Indice prestazionale standardizzato che descrive la regolarità della pavimentazione stradale.
IRR	Il Tasso di Rendimento dell’Investimento (Investment Return Rate) è un indicatore economico che misura la redditività di un progetto o investimento.
LCA	Life Cycle Assessment. Metodologia finalizzata alla raccolta degli input (materia ed energia) ed output (emissioni) di un sistema prodotto e alla valutazione dei loro potenziali impatti ambientali attraverso il ciclo vita del prodotto. Il ciclo vita è inteso come la successione causale di fasi di un sistema prodotto, dall’acquisizione e trasformazione delle materie prime, attraverso la produzione di materiali ed energia, fino all’utilizzo, i trattamenti di fine vita e il conferimento finale.
LCC	Life Cycle Costing. Metodologia che calcola e valuta tutti i costi di un prodotto, processo o servizio durante l'intero suo ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento. Si analizzano i costi di investimento (acquisto, installazione), operativi (energia, manutenzione) e di fine vita (smaltimento, valore residuo) per prendere decisioni economicamente vantaggiose.

Macrotessitura	Irregolarità superficiali di una pavimentazione di dimensioni orizzontali comprese fra 0,5 e 50 mm e di dimensioni verticali comprese fra 0,2 e 10 mm. La macrotessitura è legata alla dimensione degli aggregati, alla formulazione della miscela, alla posa in opera (costipamento) come pure all'eventuale trattamento superficiale. Essa comporta delle lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza dei singoli elementi che costituiscono il battistrada.
Manutenzione Reattiva	Tipo di manutenzione che viene eseguita solo dopo il presentarsi di una condizione di degrado, con l’obiettivo di ripristinare la funzionalità originaria. Comporta generalmente tempi di fermo e costi imprevisti.
Manutenzione Preventiva	Attività di manutenzione programmata a intervalli regolari o in base al tempo/uso, con lo scopo di anticipare l’insorgere di ammaloramenti e prolungare la vita utile. Si basa su piani prestabiliti piuttosto che sulle condizioni effettive.
Manutenzione Predittiva	Strategia di manutenzione basata sul monitoraggio continuo delle condizioni operative e sull’analisi dei dati prestazionali per prevedere l’avanzamento delle condizioni di degrado e intervenire solo quando necessario.
Megatessitura	Irregolarità della superficie di una pavimentazione di dimensioni orizzontali comprese fra 50 e 500 mm e di dimensioni verticali comprese fra 10 e 50 mm. Questo tipo di tessitura presenta delle lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza dell'area di contatto tra pneumatico e pavimentazione.
Mezzo ad alto rendimento	Veicolo strumentato e altamente specializzato che consente rilievi non distruttivi e in movimento, effettuati a velocità comparabili al traffico veicolare, atti a misurare i parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali quali, ad esempio, regolarità, aderenza, macrotessitura, ormaiamento, portanza.
Microtessitura	Irregolarità superficiali di una pavimentazione di dimensioni orizzontali comprese fra 0 e 0,5 mm e di dimensioni verticali comprese fra 0 e 0,2 mm. La microtessitura è legata alle asperità superficiali dell'aggregato grosso e della sabbia. Dà luogo ad una sensazione ruvida più o meno pronunciata ma è normalmente troppo piccola per essere visibile.
MPD	Mean Profile Depth. Indice prestazionale standardizzato che descrive la macrotessitura della pavimentazione stradale.
Ormaiamento	Deformazione permanente della pavimentazione stradale creata dal passaggio delle ruote dei veicoli, che si presenta sottoforma di depressione superficiale lungo la traiettoria degli pneumatici.
PCI	Pavement Condition Index. Indicatore numerico che fornisce una misura delle condizioni della pavimentazione stradale sulla base dei danni osservati sulla superficie della stessa.
Piattaforma digitale di asset management	Sistema software integrato che permette di ottimizzare la gestione degli asset (asset management) lungo il loro ciclo di vita, raccogliendo e analizzando dati provenienti da sensori, modelli digitali e fonti operative.
PMS	Pavement Management System. Piattaforma di Asset Management per la gestione delle pavimentazioni stradali.
Portanza (o anche Capacità portante)	Caratteristica dello stato strutturale di una pavimentazione legata all'attitudine a sopportare i carichi del traffico.
Regolarità	Caratteristica dello stato funzionale di una pavimentazione che fa riferimento alle deviazioni verticali rispetto alla forma prevista della pavimentazione.

RWD	Rolling Weight Deflectometer. Mezzo ad alto rendimento per la rilevazione di parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali, legati in particolare alla proprietà della portanza.
SCRIM	Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine. Mezzo ad alto rendimento per la rilevazione di parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali quali l’SFC, legati in particolare alla proprietà dell’aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale in direzione trasversale.
SFC	Sideway Force Coefficient. Indice prestazionale standardizzato che descrive l’aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale in direzione trasversale. In lingua italiana, chiamato CAT (Coefficiente di Aderenza Trasversale).
SUMMS	Survey Machine for Macrotexture and Skid. Mezzo ad alto rendimento per la rilevazione di parametri prestazionali delle pavimentazioni stradali legati a proprietà quali aderenza, regolarità e tessitura.
TCO	Total Cost of Ownership. Metodologia finanziaria per calcolare il costo totale di proprietà di un bene o servizio lungo l'intero suo ciclo di vita, includendo sia i costi diretti che quelli indiretti.
TMS	Tunnel Management System. Piattaforma di Asset Management per la gestione di gallerie.
Veicolo connesso	Veicolo dotato di tecnologie digitali e di comunicazione che gli permettono di scambiare dati in tempo reale con altri veicoli, infrastrutture stradali, centri di controllo o servizi cloud. Questo scambio di informazioni può riguardare posizione, velocità, condizioni del traffico, stato del veicolo o dell’infrastruttura percorsa o segnalazioni di sicurezza, consentendo una guida più sicura, efficiente e integrata.

Riferimenti bibliografici

Articoli di rivista e atti di conferenza

Ahmad, K. A., Abdullah, M. E., Hassan, N. A., Usman, N., Hassan, M. R. M., Bilema, M. a. M., Saeed, S. M., & Batari, A. (2018). Effect of Bio based rejuvenator on mix design, Energy consumption and GHG Emission of High RAP Mixture. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, *140*, 012086. https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012086

Alghrafy, Y. M., Alla, E. M. A., & El-Badawy, S. M. (2020). Rheological properties and aging performance of sulfur extended asphalt modified with recycled polyethylene waste. *Construction and Building Materials*, *273*, 121771. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121771

Ameur, A. B., Valentin, J., & Baldo, N. (2025). A review on the use of plastic waste as a modifier of asphalt mixtures for road constructions. *CivilEng*, *6*(2), 17. https://doi.org/10.3390/civileng6020017

Andersen, R., Ravn, A. S., & Ryberg, M. W. (2022b). Environmental benefits of applying selective demolition to buildings: A case study of the reuse of façade steel cladding. *Resources Conservation and Recycling*, *184*, 106430. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106430

Ardalan, N., Wilson, D., Larkin, T. Laboratory performance of recycled concrete aggregate as base-course material. Australasian Transport Research Forum 2017 Proceedings, 27 – 29 November, Auckland, New Zealand, 2017.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M. M. Y., & Bo, M. W. (2012b). Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement Sub-Base applications. *Geotechnical Testing Journal*, *35*(5), 743–751. https://doi.org/10.1520/gtj103402

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., & Bo, M. W. (2012b). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *25*(8), 1077–1088. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000652

Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Ai, A. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, *25*(5), 2764–2770. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037

Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2013). Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Materials & Design (1980-2015)*, *53*, 317–324. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015

Moghaddam, T. B., Soltani, M., Karim, M. R., Shamshirband, S., Petković, D., & Baaj, H. (2015). Estimation of the rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures by adaptive neuro-fuzzy methodology. *Construction and Building Materials*, *96*, 550-555. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2015.08.043

Belc, A. L., Ciutina, A., Buzatu, R., Belc, F., & Costescu, C. (2021b). Environmental impact assessment of different warm mix asphalts. *Sustainability*, *13*(21), 11869. https://doi.org/10.3390/su132111869

Bestgen, J. O., Hatipoglu, M., Cetin, B., & Aydilek, A. H. (2016b). Mechanical and environmental suitability of recycled concrete aggregate as highway base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(9). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001564

Bozyurt, O., Tinjum, J. M., Son, Y., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2012b). Resilient Modulus of Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate. *GeoCongress 2012*, 3901–3910. https://doi.org/10.1061/9780784412121.400

Bueche, N., Probst, S., & Eskandarsefat, S. (2024). Warm-Mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement: a case study in Switzerland. *Infrastructures*, *9*(5), 79. https://doi.org/10.3390/infrastructures9050079

Caimmi, S., Ingrassia, L. P., Canavesi, E., Gasbarro, N., Sabbatini, S., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2025). Investigation of polymer-modified bitumen containing renewable components. *Road Materials and Pavement Design*, *26*(sup1), 20–38. https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2482880

Chiola, D., Cirimele, V., & Tozzo, C. (2023). An index for assessing the environmental impact of pavement maintenance operations on the motorway network: the Environmental Asphalt Rating. *Construction Materials*, *3*(1), 62–80. https://doi.org/10.3390/constrmater3010005

Coelho, A., & De Brito, J. (2010b). Economic analysis of conventional versus selective demolition – A case study. *Resources Conservation and Recycling*, *55*(3), 382–392. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.003

Costa, J. O., Borges, P. H., Santos, F. a. D., Bezerra, A. C. S., Van Den Bergh, W., & Blom, J. (2020b). Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs. *Construction and Building Materials*, *265*, 120325. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120325

Da Conceição Leite, F., Motta, R. D. S., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011b). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, *25*(6), 2972–2979. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105

Dalhat, M. A., & Wahhab, H. I. A. (2015). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, *18*(4), 349–357. https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150

Diagne, M., Tinjum, J. M., & Nokkaew, K. (2015b). The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled concrete aggregate. *Transportation Geotechnics*, *3*, 15–23. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.12.003

El-Tahan, D., Gabr, A., Dessouky, S., & El-Badawy, S. (2025b). Comparative life cycle assessment of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate in Egypt. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *27*(3), 1462–1477. https://doi.org/10.1007/s10163-025-02191-x

Elwardany, M., Habbouche, J., Andriescu, A., Mensching, D. J., Hajj, E. Y., & Piratheepan, M. (2022). Comprehensive performance evaluation of high polymer-modified asphalt binders beyond linear viscoelastic rheological surrogates. *Construction and Building Materials*, *351*, 128902. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128902

Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2022b). Recent advances in the construction of sustainable asphalt roads with recycled plastic. Polymer International, 71(12), 1376–1383. https://doi.org/10.1002/pi.6405

Masri, T. D. K. A., Ferdaus, N. R., & Ramadhansyah, N. P. (2022b). Sustainable use of Polymer in asphalt mixture: A review. *CONSTRUCTION*, *2*(2), 12–21. https://doi.org/10.15282/construction.v2i2.7744

Fini, E. H., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H., & Aurangzeb, Q. (2011b). Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(11), 1506–1513. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000237

Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2022). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Construction and Building Materials*, *362*, 129773. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773

Gillespie, T. D., Queiroz, C. A. V, Sayers, M. W. (1986). The International Road Roughness Experiment (IRRE): Establishing correlation and a calibration standard for measurements. World Bank Technical Paper Number 45 (WTP-45). Washington, D.C., U.S.A.: The World Bank.

Habbouche, J., Boz, I., Hajj, E. Y., & Morian, N. E. (2021). Influence of aging on rheology- and chemistry-based properties of high polymer-modified asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(10), 3285–3303. https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1890727

Habbouche, J., Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., Piratheepan, M., Habbouche, J., Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Piratheepan, M. (2018). A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, *21*(6), 686–702. https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1503273

Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*, *23*(4), 322–327. https://doi.org/10.1177/0734242x05056739

Hernández, G., Medina, E. M., Sánchez, R., & Mendoza, A. M. (2006). Thermomechanical and Rheological Asphalt Modification Using Styrene−Butadiene Triblock Copolymers with Different Microstructure. *Energy & Fuels*, *20*(6), 2623–2626. https://doi.org/10.1021/ef050393t

Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2019). Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? *Resources Conservation and Recycling*, *144*, 209–222. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034

Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2019b). Chemical and rheological investigation on the short- and long-term aging properties of bio-binders for road pavements. *Construction and Building Materials*, *217*, 518–529. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.103

Islam, S. S., Ransinchung, G. D. R. N., Singh, B., & Singh, S. K. (2022). Effect of short-term and long-term ageing on the elastic and creep behaviour of modified binder containing different SBS copolymer. *Materials and Structures*, *55*(5). https://doi.org/10.1617/s11527-022-01902-2

Islam, S. S., Singh, S. K., Ransinchung, G. D. R. N., & Ravindranath, S. S. (2022). Performance Degradation during Elevated Storage Temperature of SBS-Modified Binders and Asphalt Mixes: Impact of SBS Molecular Structure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *35*(3). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004622

Islam, S. S., Singh, S. K., Ransinchung, G. D. R. N., & Ravindranath, S. S. (2023). Imperative role of SBS molecular structure on the performance properties of modified binders and asphalt mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, *24*(1). https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2226290

Jasim, Z. M., Hilal, M. M., Hasan, S. S., & Fattah, M. Y. (2024). Warm mix asphalt (WMA)Techniques: Advantages and disadvantages - A review. *AIP Conference Proceedings*, *3219*, 020028. https://doi.org/10.1063/5.0243769

Khan, Z. A., Balunaini, U., Costa, S., & Nguyen, N. H. (2024b). A review on sustainable use of recycled construction and demolition waste aggregates in pavement base and subbase layers. *Cleaner Materials*, *13*, 100266. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100266

Kluttz, R. (2012). Considerations for Use of Alternative Binders in Asphalt Pavements: Material Characteristics. *Transportation Research Circular*. https://trid.trb.org/view/1212377

Kumar, Y., Pandey, A., Kumar, P., Ravindranath, S. S., Kumar, Y., Pandey, A., Kumar, P., & Ravindranath, S. S. (2022). Elevated Temperature Rheological Properties of Styrene-Butadiene-Modified binders: Role of Molecular structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *16*(6), 1599–1617. https://doi.org/10.1007/s42947-022-00215-5

La Macchia, J. N., Baglieri, O., Dalmazzo, D., & Santagata, E. (2024). Engineering Properties of Road Paving Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt and Recycled Waste Plastics. *Materials*, *17*(23), 5681. https://doi.org/10.3390/ma17235681

Lu, W., Lee, W. M., Xue, F., Xu, J., Lu, W., Lee, W. M., Xue, F., & Xu, J. (2021b). Revisiting the effects of prefabrication on construction waste minimization: A quantitative study using bigger data. *Resources Conservation and Recycling*, *170*, 105579. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105579

Lu, X., Robertus, C., Ostlund, J.-A., (2020). Bituminous binders extended with a renewable plant-based oil: towards a carbon neutral bitumen. Proceedings of the 2020 LJMU Annual International Conference on Highways and Airport Pavement Engineering, Asphalt Technology, and Infrastructure, Liverpool, UK.

Luksha, O. V., Opanasenko, O. N., Krut’ko, N. P., & Loboda, Y. V. (2006). Modification of oxidized bitumen with styrene-butadiene-styrene copolymers of various structures. *Russian Journal of Applied Chemistry*, *79*(6), 1021–1024. https://doi.org/10.1134/s1070427206060280

Maharaj, R., Maharaj, C., & Mahase, M. (2018). The performance and durability of polyethylene terephthalate and crumb rubber–modified road pavement surfaces. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, *35*(1), 3–22. https://doi.org/10.1177/1477760618798425

Manfro, A. L., De Melo, J. V. S., & Barra, B. S. (2024). Phase Stability Evaluation of Highly Modified Asphalt with High Vinyl Content Copolymer. *Journal of Testing and Evaluation*, *52*(4), 2306–2334. https://doi.org/10.1520/jte20230407

Mashaan, N.S., & Dassanayake, C. (2025). Rutting and aging properties of recycled Polymer-Modified pavement materials. *Recycling*, *10*(2), 60. https://doi.org/10.3390/recycling10020060

Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. H., & Lee, S. (2016b). Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA). *International Journal of Pavement Research and Technology*, *9*(3), 190–201. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001

Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaeei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(22), 14863. https://doi.org/10.3390/ijerph192214863

Minde, P., Kulkarni, M., Patil, J., & Shelake, A. (2024). Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction. *Discover Materials*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s43939-024-00126-1

Modarres, A., & Hamedi, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design (1980-2015)*, *61*, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046

Mália, M., De Brito, J., Pinheiro, M. D., & Bravo, M. (2013b). Construction and demolition waste indicators. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*, *31*(3), 241–255. https://doi.org/10.1177/0734242x12471707

Kalali, E. N., Lotfian, S., Shabestari, M. E., Khayatzadeh, S., Zhao, C., & Nezhad, H. Y. (2023). A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *40*, 100763. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100763

Nataatmadja, A., & Tan, Y. L. (2001b). Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, *127*(5), 450–453. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2001)127:5(450

Nisar, J., Mir, M. S., & Vivek, N. (2024). Exploring the potential of waste plastic–modified asphalt: a systematic review of blending ratios, mixing conditions, and rheological properties. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(8), 11507–11528. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31806-9

Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2020). Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, *266*, 121988. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121988

Ok, B., Sarici, T., Demir, A., Talaslioglu, T., & Yildiz, A. (2023b). Investigation of construction and demolition materials reinforced by geosynthetics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, *176*(5), 285–298. https://doi.org/10.1680/jensu.22.00077

Oreto, C., Veropalumbo, R., D’Addio, G., Viscione, N., & Russo, F. (2025b). Mechanical investigation and environmental life cycle assessment of warm mix asphalts. *Road Materials and Pavement Design*, *26*(sup1), 290–310. https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2486528

Oreto, C., Russo, F., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Dell’Acqua, G. (2021). Life cycle assessment of sustainable asphalt pavement solutions involving recycled aggregates and polymers. *Materials*, *14*(14), 3867. https://doi.org/10.3390/ma14143867

Osorto, M. R. R., & Casagrande, M. D. T. (2023). Environmental Impact Comparison Analysis between a Traditional Hot Mixed Asphalt (HMA) and with the Addition of Recycled Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (RPET) through the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology. *Sustainability*, *15*(2), 1102. https://doi.org/10.3390/su15021102

Ossa, A., García, J., & Botero, E. (2016b). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 379–386. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088

Peralta, J., Williams, R. C., Da Silva, H. M. R. D., & Machado, A. V. (2014). Recombination of Asphalt with Bio-Asphalt Binder Formulation and Asphalt Mixes Application. *Iowa State University Digital Repository (Iowa State University)*, *83*(83), 1–25. https://lib.dr.iastate.edu/ccee_conf/77

Pilapitiya, P. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024b). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, *11*, 100220. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220

Polo-Mendoza, R., Peñabaena-Niebles, R., Giustozzi, F., & Martinez-Arguelles, G. (2022b). Eco-friendly design of Warm mix asphalt (WMA) with recycled concrete aggregate (RCA): A case study from a developing country. *Construction and Building Materials*, *326*, 126890. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126890

Poon, C., Qiao, X., & Chan, D. (2006b). The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management*, *26*(10), 1166–1172. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.12.013

Poon, C. S., & Chan, D. (2005b). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, *20*(8), 578–585. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045

Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Rossi, C. O. (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Applied Sciences*, *9*(4), 742. https://doi.org/10.3390/app9040742

Pourkhorshidi, S., Sangiorgi, C., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2020b). Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. *Sustainability*, *12*(22), 9386. https://doi.org/10.3390/su12229386

Rangelov, M., Dylla, H., & Sivaneswaran, N. (2021). Life-Cycle Assessment of Asphalt Pavements with Recycled Post-Consumer Polyethylene. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, *2675*(12), 1393–1407. https://doi.org/10.1177/03611981211033862

Samieadel, A., Schimmel, K., Fini, E. H. (2017). Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *20*(1), 191–200. https://doi.org/10.1007/s10098-017-1467-1

Scholten, E. J., Vonk, W., & Korenstra, J. (2010). Towards Green Pavements with Novel Class of SBS Polymers for Enhanced Effectiveness in Bitumen and Pavement Performance. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *3*(4), 216–222. https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2010.3(4).216

Seidel, J. C., & Haddock, J. E. (2012). Soy fatty acids as sustainable modifier for asphalt binders. *Transportation Research Circular*. https://trid.trb.org/view/1212381

Sengoz, B., Topal, A., & Isikyakar, G. (2008). Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, *23*(5), 1986–1992. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.020

Simion, I. M., Fortuna, M. E., Bonoli, A., & Gavrilescu, M. (2013b). Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *21*(4), 273–287. https://doi.org/10.3846/16486897.2013.852558

Singh, S. K., Kumar, Y., & Ravindranath, S. S. (2017). Thermal degradation of SBS in bitumen during storage: Influence of temperature, SBS concentration, polymer type and base bitumen. *Polymer Degradation and Stability*, *147*, 64–75. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.008

Singh, S. K., Pandey, A., & Ravindranath, S. S. (2021). Effect of additives on the thermal stability of SBS modified binders during storage at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *314*, 125609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125609

Soleimanbeigi, A., & Edil, T. B. (2015b). Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(5). https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001285

Strieder, H. L., Schreinert, G. G., Matuella, M. F., Fedrigo, W., Delongui, L., Rutzen, D., & Núñez, W. P. (2023b). Mechanical behavior of construction and demolition waste as pavement materials: Influence of mix composition and compaction conditions. *Construction and Building Materials*, *408*, 133698. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133698

Taherkhani, H., & Valizadeh, M. (2015b). An investigation on the effects of aggregates properties on the performance of unbound aggregate base layer. *International Journal of Transportation Engineering*, *3*(2), 151–164. https://doi.org/10.22119/ijte.2015.13846

Taherkhani, H. (2015b). Evaluation of the physical properties of unbound base layer containing recycled aggregates. *International Journal of Environmental Science and Development*, *6*(4), 279–285. https://doi.org/10.7763/ijesd.2015.v6.604

Tefa, L., Bianco, I., Blengini, G., & Bassani, M. (2022b). Integrated and comparative Structural-LCA analysis of unbound and cement-stabilized construction and demolition waste aggregate for subbase road pavement layers formation. *Journal of Cleaner Production*, *352*, 131599. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131599

Tozzo, C., Chiola, D., Pierani, M., Urbano, L., Ricci, R., & Susani, S. (2024). Improving the EAR Index for flexible pavement and a preliminary definition of an Environmental Index (ECR) for rigid pavement. *Construction Materials*, *4*(1), 110–127. https://doi.org/10.3390/constrmater4010007

Vasudevan, R., Sekar, A. R. C., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2011). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 311–320. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031

Vegas, I., Ibañez, J., Lisbona, A., De Cortazar, A. S., & Frías, M. (2011b). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, *25*(5), 2674–2682. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018

Wen, H., Bhusal, S., & Wen, B. (2012b). Laboratory evaluation of waste cooking Oil-Based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *25*(10), 1432–1437. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000713

Wu, W., Cavalli, M. C., Jiang, W., & Kringos, N. (2023). Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, *411*, 134433. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134433

Yaghoubi, E., Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Kodikara, J. (2017b). Impact of compaction method on mechanical characteristics of unbound granular recycled materials. *Road Materials and Pavement Design*, *19*(4), 912–934. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283354

Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, *12*, 100255. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100255

Yang, X., You, Z., & Mills-Beale, J. (2014). Asphalt Binders Blended with a High Percentage of Biobinders: Aging Mechanism Using FTIR and Rheology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(4). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001117

You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., Hashemi, M., Diab, A., You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., Hashemi, M., & Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *9*(5), 742–764. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002

You, Z., Mills-Beale, J., Yang, X., Dai, Q., (2012). Alternative Materials for Sustainable Transportation. Report RC-1591. Michigan Technological University, 1400 Townsend Drive Houghton, Michigan 49931

Zeiada, W., Al-Khateeb, G., Hajj, E. Y., & Ezzat, H. (2024b). Rheological properties of plastic-modified asphalt binders using diverse plastic wastes for enhanced pavement performance in the UAE. *Construction and Building Materials*, *452*, 138922. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138922

Zhang, J., Ding, L., Li, F., & Peng, J. (2020b). Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China. *Journal of Cleaner Production*, *255*, 120223. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223

Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, *54*, 18–38. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005

Report tecnici e manuali

Aydilek, A.H., Haider, I., Cetin, A., Kaya, Z., & Hatipoglu, M. (2015). Development of design guidelines for proper selection of graded aggregate base in Maryland state highways. Report No. MD-15-SP109B4G-1. Maryland State Highway Administration, Baltimore, MD.

Cooley, L.A., & Hornsby, H. (2012). Evaluation of crushed concrete base strength. Report No. MS-DOT-RD-12-238, 2012. Mississippi Department of Transportation, Jackson, MS.

Correira, E.C.N.S., et al (2019). Reducing the Life Cycle Carbon Footprint of Pavements: A PIARC high impact summary (Technical Committee 4.1 Pavements). Report No. 2019R33. World Road Association.

Dénarié, A., Fattori, F., Motta, M., Cirillo, V. F., Spirito, G., Macchi, S., Pozzi, M., Montrucchio, M., & Verda, V. (2020). Valutazione del potenziale di diffusione del teleriscaldamento efficiente sul territorio nazionale: Focus su sistemi di nuova generazione con fonti di calore di scarto e rinnovabile. Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia – RELAB; Politecnico di Torino, Dipartimento Energia “Galileo Ferraris”. Milano, IT.

European Asphalt Pavement Association (2022). Technical Aspects of the use of Warm Mix Asphalt. EAPA Technical Review. European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels, Belgium.

European Commission, Directorate-General for Environment (2011). Service contract on management of construction and demolition waste – SR1: Final report Task 2 (Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112). European Commission, Brussels, Belgium.

European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (2016). EU Construction & Demolition Waste Management Protocol. European Commission, Brussels, Belgium.

OECD (2022), Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/de747aef-en.

Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The Shell Bitumen Handbook – Fifth Edition. Thomas Telford Ltd, London.

Shacat, J., Willis, R., & Ciavola, B. (2024). The carbon footprint of asphalt pavements: A reference document for decarbonization. Report No. SIP-109. National Asphalt Pavement Association (NAPA), Greenbelt, MD.

Williams, B.A., J.R. Willis, & Shacat, J. (2024). Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2022, 13th Annual Survey. Report No. NAPA-IS-138. National Asphalt Pavement Association (NAPA), Greenbelt, MD. DOI:10.13140/RG.2.2.22994.16328

Willis, R., Yin, F., & Moraes, R. (2020). Recycled plastics in asphalt Part A: State of the knowledge. Report No. NAPA-IS-142. National Asphalt Pavement Association (NAPA), Greenbelt, MD.

You, Z., Mills-Beale, J., Yang, X., & Dai, Q. (2012). Alternative materials for sustainable transportation: Final report. Report No. RC-1591. Michigan Technological University. Michigan Department of Transportation. Lansing, MI.

Zimmerman, K., & Peshkin, D (2003). The Seven Stallers. Pavement Preservation Compendium II (2006). Publication No. FHWA-IF-06-049, 59-64. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Tansportation, Washington D.C., USA.

Standard internazionali

American Association of State Highway and Transportation Officials (2017). Standard specification for performance-graded asphalt binder (AASHTO M 320). AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2019). Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test (AASHTO M 332). AASHTO.

American Society for Testing and Materials International (2020). Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys (ASTM D6433-20). ASTM International.

American Society for Testing and Materials International (2021). Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements (ASTM E1926-08(2021)). ASTM International.

European Committee for Standardization (2009). Road and airfield surface characteristics – Part 6: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface by measurement of the sideway force coefficient (SFCS): SCRIM (CEN/TS 15901-6:2009). CEN.

European Committee for Standardization (2019). Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices (EN 13036-5:2019). CEN.

Sitografia

AIRU – Associazione Italiana Riscaldamento Urbano (n.d.). A Brescia il teleriscaldamento è sempre più efficiente. Disponibile a: https://www.airu.it/a-brescia-il-teleriscaldamento-e-sempre-piu-efficiente/

Alfacciai - sottoprodotti Alfa SINSTONE® GRIPSTONE® e SICILYSTONE. Disponibile a: https://www.alfaacciai.it/acciaio-per-cemento-armato/sinstone-gripstone-sicilystone

Envision Italia. Disponibile a: https://www.envisionitalia.it/

EPD International. Disponibile a: https://www.environdec.com/home

Eurostat, Statistics Explained. Disponibile a: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Main_Page

Export europeo di rottame: Rottame europeo export | Siderweb - La community dell'acciaio. Disponibile a: https://www.siderweb.com/articoli/prezzi-siderweb/721179-europa-piu-export-di-rottame

Feralpi - sottoprodotto Greenstone. Disponibile a: https://www.feralpigroup.com/it/verde-feralpi/2021-05-21/dieci-sfumature-di-greenstone

Gruppo ENGIE (2024). Inaugurato insieme a Cogne Acciai Speciali il recupero di calore a servizio della rete di teleriscaldamento di Aosta. Disponibile a: https://www.engie.it/media/comunicati-stampa/recupero-calore-aosta/

Gruppo Pittini. L’innovativo progetto WHAM per una gestione sostenibile dell’acqua. Disponibile a: https://www.pittini.it/innovazione/steelahead/gestione-sostenibile-acqua-progetto-wham/

Italcementi S.p.A. (2021). I vantaggi dei cementi solfoalluminosi per un'edilizia sostenibile. Ingenio Web. https://www.ingenio-web.it/articoli/i-vantaggi-dei-cementi-solfoalluminosi-per-un-edilizia-sostenibile/

Movyon: E-PMS. Disponibile a: https://www.movyon.com/soluzione/infrastructure-management/e-pms/

Vision Journal. (2023). Ingegneria digitale per le pavimentazioni. Disponibile a: https://visionjournal.it/ingegneria-digitale-per-le-pavimentazioni/

Vision Journal. (2024). Intelligenza evolutiva per le pavimentazioni. Collection 2024 Movyon, pp. 10-11. Disponibile a: https://visionjournal.it/wp-content/uploads/2024/09/VJCOLLECTION-24-MOVYON.pdf

PIARC - Associazione Mondiale della Strada

PIARC, Associazione Mondiale della Strada, è la più antica associazione Internazionale che si occupa di ingegneria stradale, di politica stradale e di gestione delle reti stradali ed ha lo scopo di favorire il progresso in campo stradale in tutti i suoi aspetti, con l'obbiettivo di promuovere lo sviluppo delle reti stradali, e di studiare i problemi della sicurezza stradale e rappresentare il punto focale di interscambio delle tecnologie stradali nel mondo. Questo obbiettivo viene perseguito mediante il confronto e la diffusione dei risultati conseguiti dalle ricerche effettuate dai vari Paesi.

Guarda come operiamo su www.piarc-italia.it.