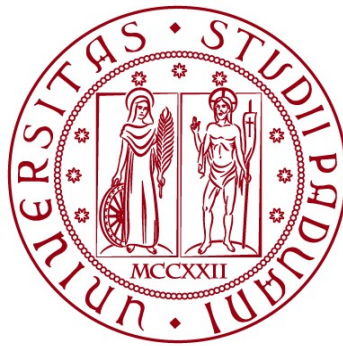


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**Il riciclaggio dei materiali stradali: progressi nelle
tecnologie per una maggiore sostenibilità ambientale ed
economica**

Relatore: Chiar.mo PROF. GIOVANNI GIACOMELLO

Laureanda: SABRINA SCHIEVENE

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

*Ai miei nonni,
che non hanno potuto vedermi raggiungere
questo traguardo.*

Indice

Elenco delle Abbreviazioni	7
Abstract	9
Introduzione	11
1 LA PAVIMENTAZIONE STRADALE	13
1.1 Funzione e struttura della pavimentazione stradale	13
1.1.1 Tipologie e composizione della pavimentazione	13
1.2 Degrado e manutenzione della pavimentazione	16
1.2.1 Fattori di decadimento prestazionale	16
1.2.2 Principali dissesti stradali	17
1.2.3 Manutenzione della pavimentazione	18
2 RICICLAGGIO DEI MATERIALI STRADALI	21
2.1 Introduzione al riciclaggio	21
2.2 Materiali riciclabili delle pavimentazioni	22
2.2.1 Influenza del degrado sulle caratteristiche del RAP . . .	23
2.3 Tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali	24
2.3.1 Riciclaggio a caldo	24
2.3.2 Riciclaggio a freddo	26
3 PROGRESSI TECNOLOGICI NEL RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI	27
3.1 Innovazioni nei materiali riciclati	27
3.1.1 Additivi rigeneranti (<i>Rejuvenators</i>)	28
3.1.2 Bitumi modificati	30
3.1.3 Materiali alternativi nel riciclaggio	35
3.2 Tecnologie innovative di produzione e lavorazione	41

3.2.1	Tecnologie a bassa temperatura (Warm Mix Asphalt, WMA)	41
3.2.2	Tecnologie di riscaldamento e rigenerazione	43
3.2.3	Tecnologie automatizzate e controllo digitale	45
4	ANALISI DEGLI ASPETTI AMBIENTALI ED ECONOMICI	49
4.1	Benefici ambientali delle tecnologie innovative	49
4.1.1	Riduzione del consumo di materie prime	49
4.1.2	Riduzione delle emissioni	50
4.1.3	Riduzione dei rifiuti in discarica e circolarità delle risorse	51
4.2	Benefici economici delle tecnologie innovative	53
4.2.1	Risparmio diretto sui materiali	53
4.2.2	Risparmio energetico di processo	54
4.2.3	Risparmio sui costi operativi	54
4.3	Limiti e criticità delle tecnologie innovative	55
4.3.1	Elevata variabilità del RAP	55
4.3.2	Instabilità e incompatibilità dei materiali	56
4.3.3	Investimenti iniziali	56
4.3.4	Rigidità dei capitolati d'appalto tradizionali	57
4.3.5	Necessità di validazione e monitoraggio sul campo	57
5	CASI STUDIO E APPLICAZIONI IN SITO	59
5.1	Applicazione di miscele bituminose modificate in ambito aeroportuale italiano	59
5.1.1	Inquadramento dell'intervento e obiettivi prestazionali .	59
5.1.2	Materiali impiegati e mix design	60
5.1.3	Posa in opera e valutazione delle prestazioni	61
5.2	Applicazione di plastiche riciclate in ambito stradale canadese .	62
5.2.1	Inquadramento dell'intervento e obiettivi sperimentali . .	62
5.2.2	Materiali impiegati e metodologia sperimentale	63
5.2.3	Valutazione delle prestazioni e risultati sperimentali . . .	65
	Conclusioni	67
	Bibliografia	69
	Ringraziamenti	73

Elenco delle Abbreviazioni

ABS	Acrilnitrile Butadiene Styrene
BAKFAA	Backcalculation - Federal Aviation Administration
BMB	Biochar Modified Bitumen
BTA	Bottom Ash
CR	Crumb Rubber
C&D	Construction and Demolition waste
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
EAPA	European Asphalt Pavement Association
ELT	End-of-Life Tires
EME	Enrobés à Module Élevé
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
HMA	Hot Mix Asphalt
HWD	Heavy Weight Deflectometer
HWT	Hamburg Wheel Tracking
IoT	Internet of Things
IT	Iron Tailings
LDPE	Low-Density Polyethylene
M2M	Machine to Machine
PC	Polymeric Compound

PE	Polietilene
PET	Polietilene Tereftalato
PMA	Polymer-Modified Asphalt
POFA-EA	Palm Oil Fatty Acid - Ethyl Acrylamide
PVC	Polivinilcloruro
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RAP C	Reclaimed Asphalt Pavement Convenzionale
RAP M	Reclaimed Asphalt Pavement Modificato
RPA	Recycled Pavement Aggregates
RSA	Rice Straw Ash
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene
SCB	Semi-Circular Bending
VOC	Volatile Organic Compounds
WEO	Waste Edible Oil
WMA	Warm Mix Asphalt

Abstract

La crescente necessità di ridurre l'impatto ambientale e i costi legati alla manutenzione delle infrastrutture stradali ha reso il riciclaggio delle pavimentazioni una pratica sempre più diffusa nel settore delle costruzioni viarie. Negli ultimi anni, lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali innovativi ha consentito di migliorare significativamente le prestazioni e la sostenibilità delle miscele riciclate. La tesi analizza le principali tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali, con particolare attenzione alle più recenti innovazioni tecnologiche finalizzate al recupero dei materiali bituminosi. In particolare, vengono approfonditi l'utilizzo di additivi rigeneranti, bitumi modificati, materiali alternativi derivanti da scarti industriali, e le tecnologie innovative di produzione come *Warm Mix Asphalt* e altri recenti sistemi avanzati di lavorazione. Lo studio evidenzia come tali innovazioni permettano di ridurre i consumi energetici, le emissioni e l'utilizzo di materie prime, migliorando allo stesso tempo la durabilità e le prestazioni delle pavimentazioni stradali riciclate.

Introduzione

Negli ultimi decenni, il settore delle infrastrutture stradali ha assunto un ruolo sempre più centrale nello sviluppo economico e sociale, garantendo la mobilità di persone e merci e contribuendo al funzionamento delle moderne reti di trasporto. Parallelamente, la crescente attenzione verso le problematiche ambientali e la progressiva riduzione delle risorse naturali disponibili hanno reso necessario ripensare i tradizionali processi produttivi e manutentivi adottati nel campo dell'ingegneria stradale, orientando la ricerca verso soluzioni più sostenibili dal punto di vista sia ambientale che economico.

La costruzione e la manutenzione delle pavimentazioni stradali richiedono infatti un impiego significativo di materie prime, elevate quantità di energia e processi produttivi che comportano importanti impatti ambientali, legati principalmente all'estrazione di aggregati naturali, alla produzione del legante bituminoso e alla gestione dei materiali di risulta derivanti dagli interventi manutentivi. In questo contesto, il riciclaggio dei materiali stradali rappresenta una delle strategie più promettenti per ridurre il consumo di nuove risorse, limitare la produzione di rifiuti e favorire un modello di sviluppo coerente con i principi dell'economia circolare.

Nel corso degli anni, le tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni si sono progressivamente evolute grazie allo sviluppo di nuove tecnologie capaci di migliorare le prestazioni meccaniche delle miscele riciclate e di aumentare l'efficienza dei processi produttivi. In particolare, l'introduzione di materiali innovativi, come additivi rigeneranti e bitumi modificati spesso di origine biologica, e nuove tecnologie di produzione a minore impatto energetico ha ampliato significativamente le potenzialità di riutilizzo dei materiali provenienti dalle pavimentazioni esistenti, rendendo il riciclaggio una soluzione sempre più competitiva rispetto alle tecniche tradizionali.

In questo contesto, la presente tesi analizza il tema del riciclaggio delle pavimentazioni stradali, approfondendo inizialmente la struttura e i principali meccanismi di degrado delle infrastrutture viarie, per poi esaminare le tecni-

che di recupero dei materiali e le più recenti innovazioni tecnologiche sviluppate nel settore. Successivamente vengono analizzati i principali benefici ambientali ed economici associati all'impiego di tali tecnologie, evidenziandone anche limiti e criticità ancora presenti. Infine, attraverso l'analisi di casi studio applicativi, lo studio intende dimostrare come l'integrazione di materiali innovativi nel processo costruttivo delle pavimentazioni stradali rappresenti la chiave di volta per la transizione del settore stradale verso la sostenibilità

Capitolo 1

LA PAVIMENTAZIONE STRADALE

1.1 Funzione e struttura della pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale è la struttura sovrastante il corpo stradale (che può essere in rilevato, trincea o mezzacosta) ed è progettata per garantire la transitabilità dei flussi veicolari ed assolvere diverse funzioni:

- Sopportare i carichi del traffico quotidiano e trasmettere gli sforzi al terreno senza causare cedimenti o deformazioni;
- Offrire regolarità del manto stradale e un'adeguata aderenza superficiale per garantire una guida sicura e confortevole;
- Proteggere il terreno sottostante e la pavimentazione stessa da agenti chimici ed atmosferici pericolosi.

Dal punto di vista strutturale la pavimentazione è caratterizzata da una successione di strati distinti, ciascuno con materiali e proprietà meccaniche differenti per adempiere a funzioni specifiche.

1.1.1 Tipologie e composizione della pavimentazione

Sulla base dei materiali impiegati le pavimentazioni si suddividono principalmente in tre tipologie che presentano proprietà meccaniche distinte:

- Pavimentazioni flessibili, costituite da strati con presenza di conglomerato bituminoso che conferiscono un comportamento maggiormente elastico alla struttura;
- Pavimentazioni semirigide, realizzate con l'aggiunta di uno strato di sotto-base composto da inerti e leganti idraulici, che conferisce maggiore rigidità e resistenza ai carichi;
- Pavimentazioni rigide, realizzate con lastre di calcestruzzo nelle quali la capacità portante è affidata alla rigidità della lastra.

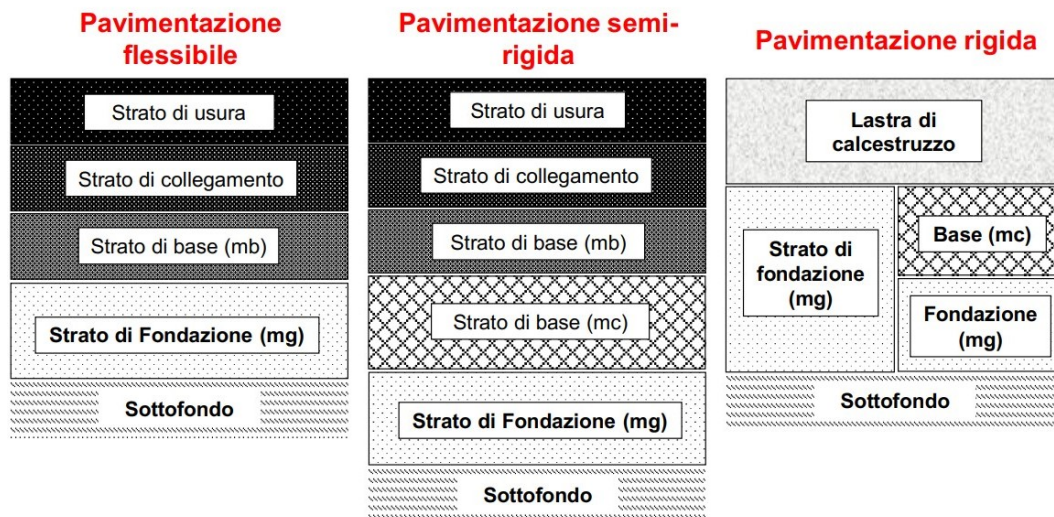


Figura 1.1: Tipologie costruttive di pavimentazione stradale [1]

Come sopra riportato e come illustrato nella Figura 1.1, la pavimentazione stradale è caratterizzata da una successione di strati distinti, ciascuno dei quali svolge una funzione specifica.

Partendo dall'estradosso della pavimentazione, la struttura si suddivide generalmente in:

1. Strato di usura (detto anche “manto di usura”): è lo strato superficiale a contatto con il traffico, deve garantire l'impermeabilità per proteggere gli strati inferiori, resistenza agli sforzi tangenziali, regolarità e aderenza dello pneumatico riducendo il fenomeno di aquaplaning e assicurando sicurezza e comfort di viaggio. Lo spessore dello strato va dai 3 ai 6 cm ed è composto da conglomerato bituminoso con inerti di frantumazione di granulometria 0-15 mm, filler al 6 - 11 % e bitume al 4,5 - 6,5 %.

2. Strato di collegamento (detto anche “*binder*”): è lo strato di transizione tra la base e lo strato di usura, ha il compito di regolarizzare lo strato inferiore conferendo planarità e la giusta pendenza alla strada e assorbire le tensioni residue per prevenire la propagazione delle fessurazioni. Lo spessore dello strato varia tra 5 - 8 cm ed è composto da conglomerato bituminoso con aggregati di granulometria maggiore rispetto al manto di usura, ovvero 0 - 25 mm, filler 4 - 8 % e bitume 4 - 5,5%.
3. Strato di base: è l'elemento portante principale della sovrastruttura che assorbe la maggior parte dei carichi verticali e tangenziali degli strati superiori. Lo spessore dello strato va da 10 a 20 cm e, in base alla tipologia della pavimentazione (flessibile o semi-rigida), è composto da conglomerato bituminoso (per pavimentazioni flessibili) o misto cementato (per pavimentazioni semi-rigide). Il misto bitumato è realizzato con inerti di frantumazione di pezzatura 0 - 40 mm, filler al 4 - 8 % e bitume al 3,5 - 4,5 %, mentre il misto cementato è realizzato con inerti di pezzatura 0 - 40 mm, cemento al 2 - 4 % e acqua al 5 - 7 %.
4. Strato di fondazione: ha la funzione di regolarizzare il sottofondo stradale e di redistribuire uniformemente i carichi al terreno. Lo spessore dello strato va dai 15 ai 30 cm ed è composto da aggregati di pezzatura 0 - 40 mm stabilizzato per via meccanica o chimica con legante idraulico tipo calce viva al 6 - 7 %, calce idrata ~10 %, cemento portland al 4 - 12 %, oppure con legante bituminoso non oltre il 3%.
5. Sottofondo: è il terreno naturale su cui poggia la sovrastruttura con il compito di assorbire i carichi dell'intera struttura evitando cedimenti o deformazioni della stessa.

STRATO	FUNZIONE	MATERIALE
Usura	Aderenza e Regolarità	Conglomerato Bituminoso
Binder	Collegamento	Agglomerato Bituminoso
Base	Ripartizione strutturale dei carichi	Conglomerato Bituminoso misto cementi
Fondazione	Trasmissione dei carichi al Sottofondo	Misto di granulari con terre stabilizzate
Sottofondo	Dissipazione ed assorbimento dei carichi	Terre Stabilizzate

Figura 1.2: Stratigrafia tipo della pavimentazione stradale [2]

1.2 Degradamento e manutenzione della pavimentazione

Le condizioni del manto stradale sono spesso influenzate da fattori naturali come condizioni climatiche e variazioni termiche, ma anche da fattori umani come il flusso veicolare o la qualità costruttiva della pavimentazione stradale. Questi fattori portano a tipi di degrado che interessano più strati della pavimentazione manifestandosi in forme differenti.

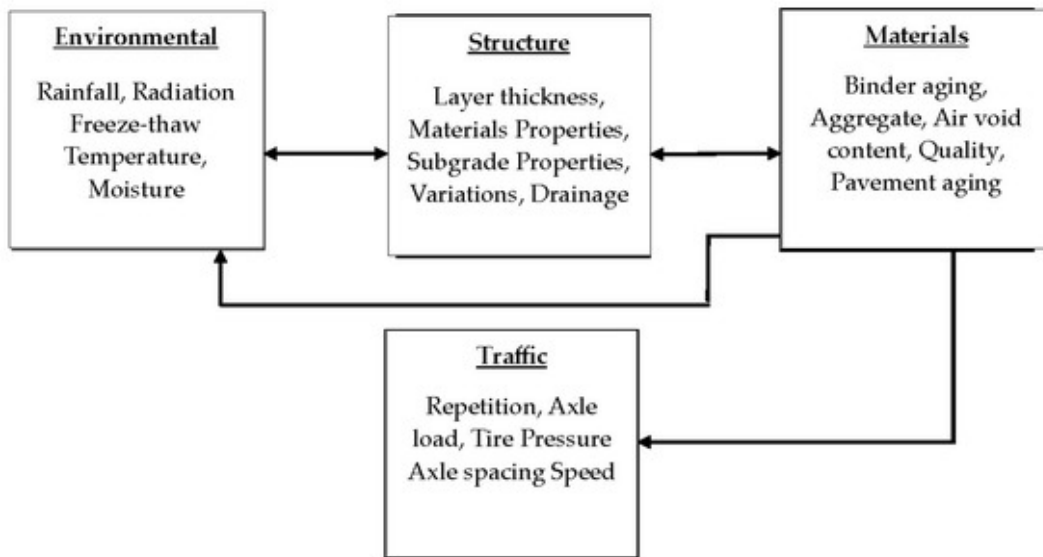


Figura 1.3: Categorizzazione schematica dei fattori di decadimento [3]

1.2.1 Fattori di decadimento prestazionale

In questo capitolo vengono analizzate le principali categorie di fattori che influenzano il decadimento prestazionale delle pavimentazioni stradali. In particolare, si esamina come traffico, condizioni ambientali e invecchiamento dei materiali contribuiscono al degrado della pavimentazione.

1. Affaticamento meccanico (“*fatigue*”)

Il traffico è il principale fattore di deterioramento della pavimentazione. Entrambe le tipologie di sforzo, statico e dinamico dovuto ai continui movimenti veicolari, contribuiscono alla variazione di tensioni nella struttura della pavimentazione, che portano alla formazione di microfessurazioni che si propagano tra gli strati fino a compromettere l'integrità strutturale. [3]

2. Invecchiamento del bitume (“*aging*”)

I cambiamenti chimici e fisici dell’ambiente degradano la qualità del binder portandolo a processi di ossidazione e volatilizzazione dei componenti. Tali fenomeni causano l’indurimento del materiale, ovvero la perdita di duttilità e quindi alla perdita delle proprietà leganti tra gli aggregati, rendendo lo strato fragile e suscettibile a rotture. Tale processo è particolarmente rilevante per lo strato superficiale maggiormente esposto all’ossigeno e alle radiazioni UV.

3. Azione dell’acqua

Anche l’acqua è un fattore molto importante che contribuisce al deterioramento della pavimentazione. Infiltrandosi nelle discontinuità superficiali riduce l’adesione tra legante e aggregati portando all’indebolimento degli strati superficiali, fino a compromettere l’integrità dell’intera struttura attraverso l’erosione e cicli di gelo-disgelo. [3]

4. Variazioni termiche

Le escursioni termiche giornaliere, come quelle stagionali che portano ad una esposizione prolungata di caldo o freddo contribuiscono significativamente al decadimento delle prestazioni della pavimentazione. Alte temperature tendono ad ammorbidire il legante bituminoso rendendo la pavimentazione più soggetta all’ormaiamento (“*rutting*”), basse temperature, invece, rendono più fragile il bitume e la pavimentazione più suscettibile a fratture. [3]

1.2.2 Principali dissesti stradali

Si elencano di seguito alcuni dei tipi più comuni di dissesti della pavimentazione stradale:

- Fessurazioni (“*cracking*”)

Possono verificarsi nei vari strati e propagarsi verso l’alto o verso il basso. Causate principalmente dalle ripetute flessioni indotte dai carichi del traffico (“*fatigue cracking*”), variazioni termiche (“*thermal cracking*”), riflessione di fessure degli strati sottostanti (“*reflective cracking*”), sforzi longitudinali e tangenziali dovuti alla variazione del moto veicolare (“*slippage cracking*”) o invecchiamento del legante bituminoso.

- Ormaiamento (“*rutting*”)

Si manifesta come solchi longitudinali lungo la carreggiata causati dal

continuo passaggio dei veicoli che percorrono la stessa traiettoria. Se il solco è stretto e profondo, è dovuto allo scorrimento viscoso del bitume negli strati di usura e binder, se invece il solco è largo e superficiale, indica un cedimento della fondazione o del sottofondo. [4]

- “*Raveling*”

È la progressiva frantumazione e dislocamento degli aggregati dalla superficie del manto di usura dovuta alla perdita di adesione tra aggregati e legante bituminoso causata dall’invecchiamento del bitume e/o da cicli gelo-disgelo. [4]

- Buche (“*potholes*”)

Rappresentano lo stato avanzato del fenomeno di degrado di fessurazione degenerato dallo stress da fatica. Inizialmente lo strato interessato è quello di usura, ma in mancanza di manutenzione può estendersi agli strati inferiori.

1.2.3 Manutenzione della pavimentazione

Al fine di preservare nel tempo le prestazioni funzionali e strutturali della pavimentazione stradale, per garantire un’adeguata sicurezza, comfort di guida e durabilità della struttura, esistono diversi interventi di manutenzione stradale. In base al livello di degrado, si possono suddividere le operazioni di manutenzione in: manutenzione preventiva, manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria.

La manutenzione preventiva viene realizzata in modo programmato con l’obiettivo di rallentare i processi di decadimento su pavimentazioni ancora in buone condizioni prima che diventino veri e propri dissesti. Si interviene principalmente a livello superficiale con trattamenti sigillativi o microtappeti. Tali interventi consentono di impedire l’ingresso dell’acqua negli strati inferiori, proteggere il legante bituminoso dall’invecchiamento e mantenere le caratteristiche funzionali della pavimentazione contrastando i fenomeni di fessurazione e distacco degli aggregati (vedi §1.2.2).

La manutenzione ordinaria è fatta quando il degrado del manto stradale è evidente ma non tale da compromettere la capacità strutturale della pavimentazione. In questo caso le operazioni più comuni sono la fresatura e il rifacimento dello strato di usura, che permettono così di migliorare la regolarità del piano e quindi dell’aderenza del veicolo alla superficie stradale. Il materiale rimosso durante la fresatura può essere recuperato come “fresato d’asfalto” (“*Reclai-*

med Asphalt Pavement”, RAP) contribuendo alla riduzione del consumo di nuove materie prime.

Nel caso in cui, invece, il dissesto interessa anche gli strati sottostanti e quindi la capacità strutturale della pavimentazione è necessario eseguire la manutenzione straordinaria. Le operazioni sono più invasive, come il riciclaggio in situ a caldo o a freddo, la ricostruzione degli strati inferiori o il recupero completo della struttura attraverso tecniche di *“full-depth reclamation”*. Questi interventi permettono di riutilizzare i materiali asportati direttamente in sito con vantaggi economici e ambientali.

In conclusione, la scelta della strategia manutentiva viene fatta in base al livello di degrado e alle condizioni funzionali e strutturali della pavimentazione stradale, con particolare attenzione agli obiettivi economici e ambientali.

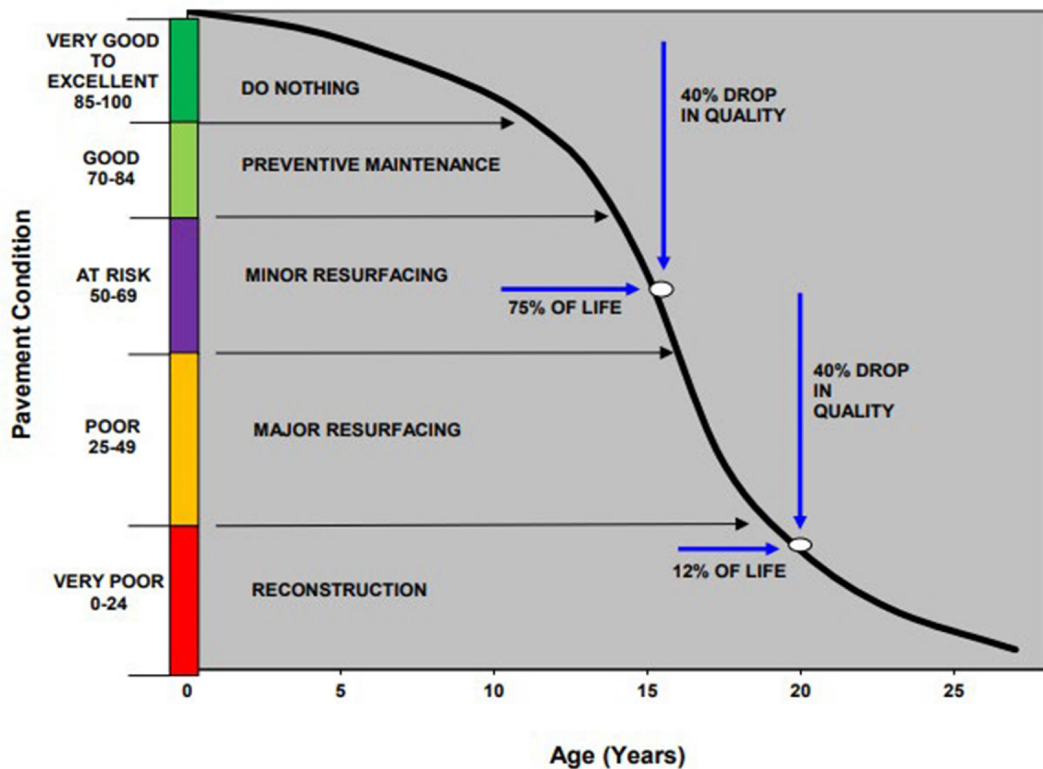


Figura 1.4: Curva di degrado della pavimentazione e interventi manutentivi associati [5]

Capitolo 2

RICICLAGGIO DEI MATERIALI STRADALI

2.1 Introduzione al riciclaggio

Con l'aumento della popolazione e la crescente domanda di infrastrutture per il trasporto, la costruzione e, soprattutto, la manutenzione delle reti stradali rappresentano una delle sfide principali nell'ingegneria civile.

Infatti, in Cina il ministro dei trasporti ha stimato che nel 2021 la rete stradale ha raggiunto circa 5,28 milioni di chilometri, di cui il 99,4 % necessitava di interventi di manutenzione, mentre negli Stati Uniti la Federal Highway Administration stima che, a partire dal 2030, saranno necessari tra 65 e 83 miliardi di dollari all'anno (circa il 40 % del budget a disposizione per le infrastrutture di trasporto) per la riparazione e la manutenzione di strade e ponti nel territorio statunitense. [5]

Tali dati evidenziano come la gestione sostenibile delle pavimentazioni stradali rappresenti una questione di primaria importanza, rendendo sempre più rilevante lo sviluppo e l'adozione di tecniche di riciclaggio dei materiali.

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali iniziò a diffondersi a partire dagli anni '70 negli Stati Uniti, a causa delle prime crisi energetiche in concomitanza con l'embargo petrolifero arabo, che determinò un significativo aumento del costo del petrolio greggio. In questo periodo emerse la necessità di ridurre i consumi energetici nei processi produttivi, inizialmente concentrandosi sulla diminuzione delle temperature di produzione nel settore dei conglomerati bituminosi, e successivamente, espandendosi verso ulteriori aspetti di rilievo come: la riduzione di consumo del legante bituminoso, il riutilizzo di inerti pregiati senza ricorso a nuove estrazioni, la riduzione dei trasporti su strade

già trafficate e la riduzione dei tempi di servizio.

Alla fine degli anni '70 quindi si assistette a uno sviluppo della ricerca e della sperimentazione nel settore delle costruzioni stradali che apportò le prime modifiche agli impianti fissi per la produzione di conglomerati bituminosi e lo sviluppo di nuove tecniche di riciclaggio in situ.

Nel corso degli anni, queste tecniche si sono progressivamente consolidate e sviluppate a livello internazionale con il sostegno delle autorità di governo, a fronte delle sempre più crescenti esigenze ambientali ed economiche che spingono il settore alla conservazione delle risorse, alla protezione e salvaguardia dell'ambiente e all'ottimizzazione dei costi di costruzione e manutenzione, consentendo il recupero dei materiali delle pavimentazioni esistenti e il loro riutilizzo per la produzione di nuovi conglomerati in grado di soddisfare i requisiti tecnici richiesti.

2.2 Materiali riciclabili delle pavimentazioni

Nel riciclaggio delle pavimentazioni stradali, i materiali riutilizzati derivano principalmente dalla fresatura degli strati bituminosi esistenti. Da tali materiali, con appositi trattamenti, si possono recuperare sia gli aggregati sia il legante bituminoso, costituendo una risorsa fondamentale per la produzione di nuove miscele riducendo il consumo di nuove materie prime.

Il principale materiale ottenuto dal riciclaggio è il fresato d'asfalto ("*Reclaimed Asphalt Pavement*", RAP), ottenuto mediante operazioni di fresatura della pavimentazione esistente. Il RAP è costituito quindi da una miscela di aggregati e legante bituminoso invecchiato, la cui composizione dipende dallo stato e dalla tipologia della pavimentazione originaria. Infatti, nelle vecchie pavimentazioni possono essere presenti dei materiali granulari, terreni o detriti oppure essere costituita da una pavimentazione a sua volta realizzata con materiali di riciclo. Questi fattori possono incidere sulla qualità finale del fresato d'asfalto e per questo motivo è necessario effettuare un approfondito controllo di qualità. La sua diffusione è dovuta all'elevata disponibilità e alla possibilità di riutilizzare materiali già selezionati e lavorati, con conseguente riduzione del consumo di risorse naturali.

Nel RAP gli aggregati rappresentano la componente predominante che nella maggior parte dei casi mantengono caratteristiche meccaniche adeguate, tuttavia, la presenza del legante bituminoso ossidato sulla superficie può com-

promettere l'efficienza adesiva del nuovo bitume.

Nel RAP inoltre è presente anche il legante bituminoso come materiale da riciclo. Il bitume, come già detto, subisce fenomeni di ossidazione e perdita di componenti più leggeri con conseguente aumento della rigidità e riduzione della duttilità. Nei processi di riciclaggio il legante non viene separato dagli aggregati, ma viene riattivato con additivi rigeneranti (*rejuvenators*) e integrato con bitume vergine, al fine di ripristinare le sue proprietà e garantire adeguate prestazioni meccaniche alla miscela finale. Oltre agli strati superficiali e di collegamento, anche gli strati di base in misto bitumato possono essere oggetto di recupero e riciclo. Il materiale recuperato in questione ha granulometria più ampia e può essere impiegato nella realizzazione di nuovi strati strutturali.

2.2.1 Influenza del degrado sulle caratteristiche del RAP

Le caratteristiche del materiale riciclato proveniente da pavimentazioni esistenti sono fortemente influenzate dai meccanismi di degrado a cui la pavimentazione è stata sottoposta durante la sua vita. In particolare, i fenomeni precedentemente descritti nel §1.2.2, quali affaticamento meccanico, invecchiamento del legante e azione dell'acqua determinano modifiche significative sia nella composizione sia nelle proprietà del fresato d'asfalto, influenzandone il successivo riutilizzo.

Le pavimentazioni soggette ad affaticamento meccanico (*fatigue*) e a fessurazione (*cracking*) producono un fresato molto frammentato e spesso contaminato da materiali provenienti dagli strati inferiori. Questo aspetto può influenzare la granulometria della miscela riciclata e richiede un'attenta progettazione.

Nel caso di ormaimento (*rutting*) il RAP può contenere un quantitativo di bitume maggiore di altre tipologie di RAP, e per evitare che la nuova pavimentazione presenti lo stesso difetto il bitume viene integrato sia con un ringiovanente che con bitumi duri o additivi irrigidenti.

L'azione dell'acqua, come nei fenomeni di *stripping*, può produrre un materiale con superfici lisce e di scarsa coesione, compromettendo l'adesione tra legante e aggregati. In questo caso il RAP richiede di additivi attivatori di coesione per garantire una miscela con proprietà adeguate.

L'invecchiamento del legante bituminoso (*aging*), invece, rappresenta uno dei fattori più rilevanti nel processo di riciclaggio. A seguito di fenomeni di ossidazione e perdita delle componenti più leggere, il bitume diventa più rigido e fragile. Per questo motivo, nei processi di riciclaggio è necessario l'impiego di additivi rigeneranti e di bitume vergine, al fine di ripristinare le proprietà

originarie.

2.3 Tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Le tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali possono essere classificate in funzione della temperatura di lavorazione e del luogo in cui avviene il processo. Si distinguono il riciclaggio a caldo e il riciclaggio a freddo, entrambi realizzabili sia in situ sia in impianto. La scelta della tecnica più idonea dipende dalle condizioni della pavimentazione esistente, disponibilità dei materiali e aspetti economici.

2.3.1 Riciclaggio a caldo

Il riciclaggio a caldo si utilizza esclusivamente per la riparazione di strati d'usura d'asfalto danneggiati, è pertanto necessario che la sottostruttura sia intatta. Il riciclaggio a caldo consiste nel recuperare e riutilizzare il RAP mediante processi che prevedono il riscaldamento del materiale al fine di rendere lavorabile il legante bituminoso. Questo processo assicura la preservazione delle proprietà fisiche e chimiche dell'asfalto, con conseguente risultato di un prodotto riciclato di alta qualità.

- In impianto

Il riciclaggio a caldo in impianto è la tecnologia più diffusa in Italia per l'elevato numero di impianti fissi esistenti nel territorio, tuttavia, il limite principale è costituito dalla quantità ridotta di RAP introducibile, al fine di non compromettere le prestazioni del conglomerato finale. Il processo, inoltre, richiede consumi energetici significativi e costi legati al trasporto del materiale.

Negli impianti tradizionali discontinui, il fresato può essere introdotto a valle del riscaldamento degli inerti vergini oppure nel cilindro essiccatore, ma dietro la fiamma per evitare fenomeni di degradazione del legante bituminoso presente nel fresato. In quest'ultimo caso la percentuale di impiego è più alta e circa del 20%. Soluzioni impiantistiche più moderne con cilindri doppi, consentono di riscaldare il RAP senza contatto diretto

con la fiamma e miscelarlo con gli inerti vergini essiccati nel cilindro tradizionale, permettendo percentuali di impiego del 40 – 45 %. [6]

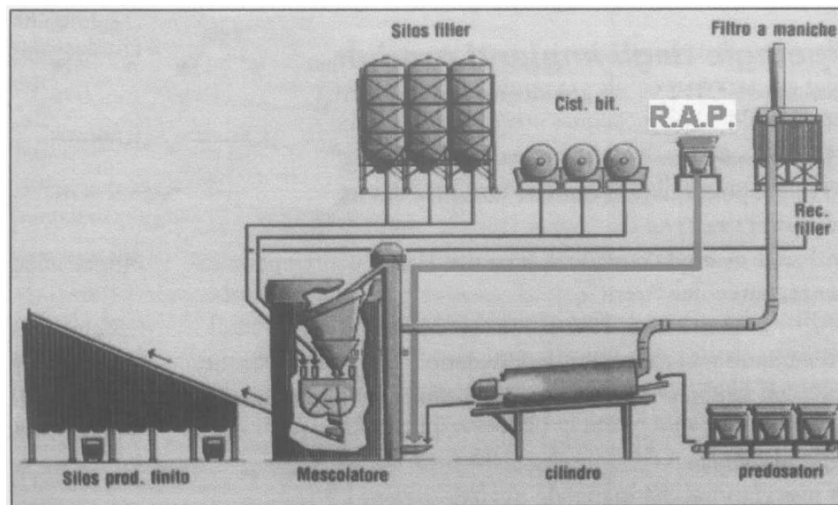


Figura 2.1: Impianto tradizionale discontinuo con dispositivi per il riciclaggio a caldo del fresato [6]

- In situ

Il riciclaggio a caldo in situ viene effettuato direttamente sulla pavimentazione esistente, mediante il riscaldamento dello strato superficiale e la sua successiva lavorazione e riprofilatura. La superficie esistente è riscaldata fino a 150°C da pannelli infrarossi alimentati da un bruciatore a gas. In questo modo il conglomerato esistente viene plasticizzato, scarificato e nuovamente steso. L'impiego di questa tecnica permette di ottenere una diminuzione fino all'85% della movimentazione dei materiali e una riduzione di circa il 70% del consumo di nuovo conglomerato bituminoso. [7]

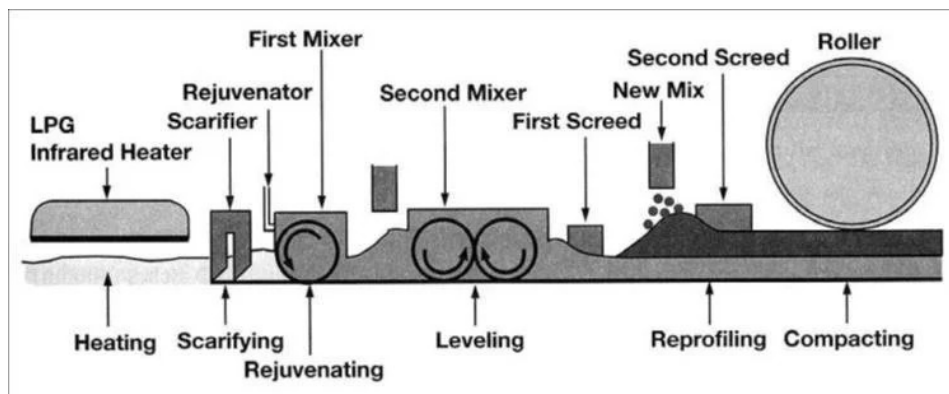


Figura 2.2: Schema del processo di riciclaggio a caldo in situ [8]

2.3.2 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo si utilizza non appena la portata della sovrastruttura stradale risulta compromessa e si basa sul riutilizzo del materiale esistente senza il ricorso a elevate temperature, mediante l'impiego di leganti bituminosi schiumati o emulsioni bituminose. Questa tecnica presenta un minore impatto ambientale rispetto al riciclaggio a caldo, grazie alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni, ma richiede una maggiore attenzione nella progettazione per garantire adeguate prestazioni meccaniche.

- In impianto

Nel riciclaggio a freddo in impianto, il materiale fresato viene lavorato in un impianto dedicato, dove viene miscelato con leganti e additivi a temperatura ambiente. Tale processo, operando senza riscaldamento dei materiali e potendo reimpiegare fino al 100% di materiali di recupero, offre i maggiori benefici economici ed ambientali e consente un alto controllo sulla composizione della miscela garantendo buoni livelli prestazionali.

- In situ

Il riciclaggio a freddo in situ è un'altra tecnologia molto usata in Italia per il basso consumo energetico necessario, tuttavia, non è applicabile in ogni ambito stradale per l'ingombro del treno di riciclaggio. Questo macchinario è in grado di fresare la pavimentazione esistente e allo stesso tempo miscelare il prodotto ottenuto con il bitume schiumato o l'emulsione bituminosa lasciando alle sue spalle la miscela pronta per essere compattata senza nessuna necessità di trasporto. Al contempo però non permette di avere lo stesso livello di controllo sulla miscela come nel riciclaggio in impianto, aggiungendo aggregati per integrare classi granulometriche che dovessero risultare scarse.

In conclusione, le tecniche di riciclaggio a caldo e a freddo presentano caratteristiche differenti in termini di prestazioni, consumi e impatto ambientale. La scelta della soluzione più appropriata dipende quindi dalle condizioni della pavimentazione stradale, dal contesto operativo e dalla disponibilità di risorse tecniche ed economiche. In tale ambito, lo sviluppo di tecnologie innovative rappresenta un elemento chiave per migliorare ulteriormente l'efficienza e la sostenibilità dei processi di riciclaggio.

Capitolo 3

PROGRESSI TECNOLOGICI NEL RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI

Nonostante l'efficacia delle tecniche di riciclaggio tradizionali, esse presentano ancora alcune criticità e limitazioni legate alle prestazioni dei materiali e ai processi produttivi. Per questo motivo, negli ultimi anni si è assistito allo sviluppo di tecnologie innovative volte a migliorare le prestazioni e la sostenibilità del riciclaggio delle pavimentazioni.

3.1 Innovazioni nei materiali riciclati

L'aumento delle percentuali di RAP utilizzabili, unito alla necessità di migliorare le prestazioni meccaniche e la durabilità delle pavimentazioni, ha portato allo sviluppo di soluzioni innovative in grado di superare alcune delle principali criticità associate al riutilizzo dei materiali invecchiati.

L'invecchiamento del legante bituminoso presente nel RAP determina un aumento della rigidità e una riduzione della duttilità della miscela, rendendo le pavimentazioni più suscettibili a fessurazione e degrado precoce. Per questo motivo, la ricerca si è concentrata sullo sviluppo di additivi rigeneranti e bitumi modificati in grado di ripristinare le proprietà reologiche del materiale riciclato.

L'introduzione di materiali innovativi e sostenibili, come rigeneranti di origine biologica, ha contribuito ad incrementare ulteriormente le prestazioni delle pavimentazioni e al contempo a ridurre l'impatto ambientale dei processi pro-

duttivi. Tali innovazioni rappresentano oggi uno degli aspetti più rilevanti nello sviluppo delle moderne tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali.

3.1.1 Additivi rigeneranti (*Rejuvenators*)

Gli additivi rigeneranti, o *rejuvenators*, sono sostanze impiegate per ripristinare le proprietà del legante bituminoso invecchiato e migliorare le prestazioni complessive delle miscele di asfalto riciclato, consentendo l'utilizzo di una maggiore percentuale di RAP nelle miscele. Essi agiscono reintegrando le frazioni leggere perse durante l'invecchiamento (malteni), migliorando la duttilità e riducendo la rigidità del materiale. Tuttavia, la maggior parte dei rigeneranti a basso peso molecolare derivati da oli minerali presenta limitata sostenibilità e stabilità, mentre quelli ottenuti da oli lubrificanti esausti risultano ulteriormente limitati in termini di compatibilità a causa del loro elevato contenuto di composti saturi, rendendoli poco adatti alle miscele con elevate percentuali di RAP.

Per questo motivo, negli ultimi anni la ricerca si è concentrata sullo sviluppo di rigeneranti più efficienti, ma soprattutto più sostenibili di origine biologica, ottenuti da oli vegetali, biomasse di scarto e derivati organici. Gli oli derivati da fonti biologiche sono emersi come candidati promettenti a causa della loro abbondanza, bioattività ed elevata concentrazione di composti polari ossigenati come i gruppi idrossilici, carbossilici e carbonilici che migliorano l'adesione tra i leganti bituminosi e gli aggregati minerali aumentando l'energia libera superficiale e migliorando il lavoro termodinamico di adesione. Tuttavia, gli stessi gruppi polari che migliorano l'adesione possono anche favorire le reazioni responsabili dell'indurimento ossidativo, o portare all'emulsione in presenza di umidità in eccesso, specialmente quando il valore di acidità dell'olio è elevato. In questi casi, il danno indotto dall'umidità, come lo stripping e la perdita di coesione, può persino peggiorare se i componenti acidi non vengono neutralizzati efficacemente. Per questo vengono incorporati nei bio-oli dei nanomateriali alcalini, come l'ossido di calcio nanometrico (nano-CaO), fornendo una soluzione efficace per migliorare la compatibilità tra i componenti della miscela. [9]

Diversi rigeneranti a base di oli vegetali hanno dimostrato di migliorare la resistenza alle fessurazioni termiche riducendo la rigidità a scorrimento viscoso (*"creep stiffness"*) del conglomerato bituminoso alle basse temperature. Ad esempio, lo studio condotto da Hassanjani et al. (2025) ha dimostrato come l'olio alimentare esausto (*"Waste Edible Oil"*, WEO) è in grado di ri-

generare l'asfalto invecchiato riducendo il contenuto di asfalteni fino al 23% e aumentando le frazioni sature e aromatiche, con conseguente miglioramento dell'omogeneità molecolare e maggiore resistenza alle fessurazioni termiche [10]. Questo studio sperimentale propone l'impiego di ossido di calcio nanometrico (nano-CaO) associato al WEO per ridurre l'acidità dell'olio e migliorare l'adesione tra legante e aggregati. I risultati sperimentali mostrano una significativa riduzione della suscettibilità all'umidità, una maggiore resistenza allo *stripping* e all'ormaiamento, oltre a un miglioramento della stabilità chimica e della durabilità della miscela riciclata.

La diffusione commerciale su larga scala dei *rejuvenators* a base di oli vegetali, tuttavia, è stata limitata a causa della tipica struttura a trigliceridi, non polare e caratterizzata da scarsa compatibilità con l'asfalto. Per superare questo limite si possono introdurre modifiche fisiche e chimiche finalizzate ad arricchire gli oli vegetali con gruppi polari, migliorandone la capacità di disperdere gli asfalteni e aumentare la compatibilità con il bitume.

Un altro esempio significativo è rappresentato dal bio-olio ottenuto dai fondi di caffè esausti mediante liquefazione idrotermale. Questo bio-olio è caratterizzato da un'elevata concentrazione di gruppi polari ossigenati e da una struttura molecolare lineare con ridotta ramificazione. Tale configurazione strutturale favorisce direttamente la dispersione degli asfalteni e il ripristino della compatibilità con l'asfalto invecchiato, determinando significativi miglioramenti nella duttilità e nella resistenza alla fessurazione.

Tra le soluzioni più recenti, Fei et al. (2026) hanno sviluppato un rigenerante derivato dall'olio di palma, denominato *palm oil fatty acid-ethyl acrylamide* (POFA-EA), caratterizzato da una struttura molecolare che favorisce una buona miscibilità con saturi, aromatici, resine oleose e monomeri polari, garantendo un'elevata compatibilità con il materiale bituminoso invecchiato. L'olio di palma, derivato dal frutto della palma da olio, rappresenta l'olio vegetale più prodotto, consumato e commercializzato al mondo, costituendo una materia prima abbondante, ecologica e rinnovabile per la rigenerazione dell'asfalto. Lo studio dimostra come l'aggiunta del 9 wt% di POFA-EA ripristina le proprietà fisiche dell'asfalto invecchiato: la miscela riciclata ha registrato un incremento della stabilità Marshall del 7,3% e della resistenza indiretta a trazione del 13,2 % rispetto alla miscela di controllo. L'utilizzo del rigenerante POFA-EA ha inoltre mostrato un moderato miglioramento della resistenza all'umidità delle miscele riciclate. [10]

3.1.2 Bitumi modificati

L'impiego di bitumi modificati rappresenta una delle principali innovazioni nel settore delle pavimentazioni riciclate, in quanto consente di migliorare le prestazioni meccaniche e la durabilità delle miscele contenenti elevate percentuali di RAP. Infatti, la presenza di legante bituminoso invecchiato tende ad aumentare la rigidità della miscela, rendendola più suscettibile a fenomeni di fessurazione e perdita di duttilità. Per compensare tali effetti vengono utilizzati bitumi modificati in grado di migliorare il comportamento reologico e meccanico della miscela riciclata.

Tra i più diffusi vi sono i bitumi modificati con polimeri, come SBS (“*Styrene-Butadiene-Styrene*”) ed EVA (“*Ethylene-Vinyl Acetate*”), che consentono di aumentare l'elasticità del legante e la resistenza a fatica, migliorando al contempo la resistenza all'ormaiamento alle alte temperature.

Tuttavia, l'elevato costo e la dipendenza da materiali di origine petrolchimica hanno spinto la ricerca verso soluzioni più sostenibili e compatibili con i principi dell'economia circolare.

L'impiego di materiali innovativi come biochar, lignina, bio-bitumi e gomma riciclata consente non solo di valorizzare rifiuti e residui industriali, ma anche di migliorare alcune proprietà prestazionali delle pavimentazioni, tra cui resistenza a fatica, stabilità alle alte temperature e durabilità.

La biomassa è la quarta fonte di energia più grande dopo il carbone, il petrolio e il gas naturale, ed è una risorsa a bilancio neutro di carbonio nel suo ciclo di vita. La maggior parte della produzione di energia da biomassa deriva dalla pirolisi, durante la quale la biomassa viene decomposta in biochar ad alte temperature e in atmosfera inerte. Il biochar possiede molte proprietà eccellenti: elevata porosità, vasta area superficiale, forte capacità di adsorbimento e i numerosi gruppi funzionali. Rispetto ai modificatori tradizionali a base di petrolio, come lo SBS e l'EVA, il biochar presenta vantaggi significativi in termini di rinnovabilità ed economia, di conseguenza, ha attirato l'attenzione di molti ricercatori.

- Paglia

Una delle principali risorse di biomassa al mondo è rappresentata dalla paglia delle colture, includendo riso, mais, grano e altre. Secondo i dati più recenti (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura), la produzione mondiale di riso nel 2022 è stata di 776,5 milioni di tonnellate, e prodotte circa 1,5 tonnellate di paglia per ton-

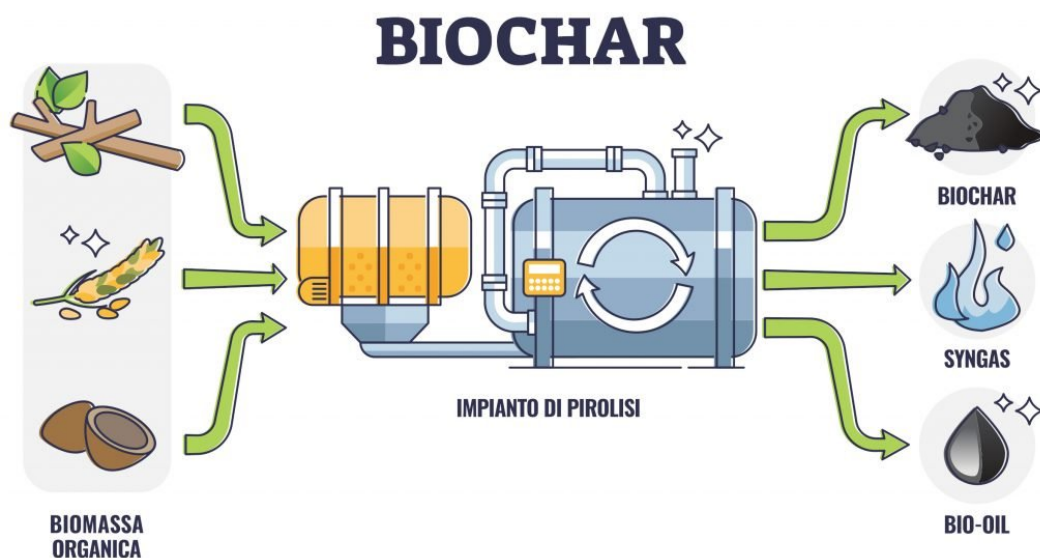


Figura 3.1: Processo di produzione del biochar, syngas e bio-oil tramite pirolisi di biomasse vegetali [11]

nellata di riso. Di conseguenza, la disponibilità globale di paglia di riso è stata stimata di oltre 1,1 miliardi di tonnellate. Tuttavia, il suo tasso di utilizzo è molto basso e oltre la metà di essa che viene bruciata in campo. [12]

L'uso della paglia di riso nell'ingegneria stradale è considerato una pratica vantaggiosa sia per la gestione sostenibile della paglia di riso, sia per lo sviluppo verde dell'industria autostradale. Nel 2020 Pandey et al. con la loro ricerca hanno dimostrato come, nelle pavimentazioni rigide, il cemento poteva essere sostituito fino al 10% con cenere di paglia di riso ("*Rice Straw Ash*", RSA) senza compromettere la resistenza a compressione, e nel 2023 Singh et al., sostituendo parzialmente il filler minerale con l'RSA, hanno ottenuto una miscela bituminosa con le stesse proprietà Marshall della miscela convenzionale.

La paglia di riso può essere anche convertita in biochar attraverso la pirolisi, che è un materiale a zero emissioni di carbonio ed ecocompatibile derivato dalla biomassa, e può considerarsi come un nuovo promettente modificatore del bitume a causa delle sue proprietà fisico-chimiche uniche.

In uno studio recente, Zhou et al. (2025) hanno prodotto mediante pirolisi un biochar dalla paglia di riso per la creazione di un bitume modificato

più sostenibile e performante. La ricerca dimostra che rispetto al bitume base, il bitume modificato con biochar (BMB) presenta una migliore resistenza all'ormaiamento, all'invecchiamento a breve e a lungo termine, e alla suscettibilità termica, in particolare, le prestazioni ad alta temperatura migliorano del 222,7%, mentre le prestazioni a bassa temperatura si indeboliscono solo del 25,9%. [12]

- Lignina

Un altro tipo di biomassa usata nelle miscele bituminose la cui ricerca è progredita significativamente è la lignina. La lignina può essere incorporata tramite due metodi principali: il processo a secco ("*dry*"), in cui viene aggiunta direttamente alle miscele di asfalto con modifiche minime alla produzione, e il processo a umido ("*wet*"), in cui la lignina viene premiscelata con il bitume per migliorare le proprietà del legante. Nel processo a umido la lignina ha migliorato la viscosità, la resistenza all'ormaiamento e le prestazioni di fessurazione termica, insieme a una migliore resistenza all'invecchiamento e stabilità termica. Lo studio di Kamratowsky et al. (2026) dimostra che il bitume modificato con lignina presenta un minor aumento dell'*Aging-Index* AI_{FTIR} , indicando una migliore resistenza all'invecchiamento a breve termine rispetto al bitume convenzionale. Inoltre, ha provato come il bitume modificato seppur comportandosi come un filler, dimostri un miglioramento della rigidità senza alterare in modo significativo la risposta viscoelastica complessiva. [13]

- Bio-olio

Parallelamente all'impiego di materiali organici fibrosi, negli ultimi anni anche i bio-oli stanno guadagnando crescente attenzione come modificanti sostenibili a causa della loro somiglianza chimica con il bitume petrolifero e favorevoli proprietà viscoelastiche e adesive. Gli oli vegetali influenzano la penetrazione, il punto di rammollimento, il modulo, la duttilità, il *creep* e la resistenza alla fatica del legante. Sebbene manchino di asfalteni, gli oli presentano frazioni resiniche, aromatiche e saturate paragonabili a quelle del bitume, che hanno una buona miscibilità e un migliore rilassamento degli sforzi in condizioni termiche. Sempre Kamratowsky et al. (2026) hanno mostrato come il bitume organico (bio-bitume) si comporti in maniera più elastica, suggerendo interazioni molecolari più forti su un intervallo di temperatura più ampio rispetto

al bitume tradizionale, offrendo una migliore resistenza all'ormaiamento ma anche ad una ridotta impronta di carbonio. [13]

- Gomma riciclata

Un'ulteriore soluzione sostenibile per la modifica dei leganti bituminosi è rappresentata dall'impiego di gomma riciclata derivante da pneumatici fuori uso ("*End-of-Life Tires*", ELT). Gli pneumatici esausti costituiscono infatti una delle principali categorie di rifiuti a livello mondiale in termini di volume prodotto annualmente, rendendo necessario lo sviluppo di tecnologie efficaci per il loro recupero. Una delle applicazioni più diffuse consiste nell'utilizzo della gomma di recupero nelle miscele bituminose, sia come additivo sia come sostituzione parziale dei tradizionali polimeri modificanti, come lo SBS ("*Styrene-Butadiene-Styrene*"). Il conglomerato bituminoso con gomma di scarto può migliorare significativamente la vita utile della pavimentazione attraverso una maggiore resistenza alla fatica, così come la resistenza alla deformazione permanente. Allo stesso tempo, esso può ridurre al minimo il rumore di rotolamento, i costi di costruzione delle pavimentazioni stradali, e specialmente ridurre l'impatto ambientale attraverso il consumo di materiali di scarto. I processi di produzione principali per introdurre la gomma di scarto nelle miscele bituminose sono due: il processo a secco e il processo a umido. Nel metodo a secco, le particelle di gomma vengono aggiunte a freddo agli aggregati e poi miscelate con il bitume, mentre nel processo a umido la gomma viene miscelata con il bitume in impianti adeguati prima della produzione del conglomerato. Per migliorare la compatibilità tra bitume e gomma, e quindi la sua stabilità allo stoccaggio, la gomma viene pretrattata attraverso metodi fisici o chimici. Uno dei principali limiti del metodo a umido è l'instabilità del legante durante lo stoccaggio a temperature elevate. L'incompatibilità tra bitume e gomma è legata alla natura reticolata e immiscibile della gomma vulcanizzata e alla differenza di densità tra i due materiali, che può portare alla sedimentazione delle particelle di gomma nel serbatoio nel tempo. Questo fenomeno compromette la qualità del legante e può causare ostruzioni nelle apparecchiature di pompaggio, con conseguenti inefficienze produttive e costi aggiuntivi. Per tale motivo è spesso necessario l'impiego di sistemi di agitazione continua e attrezzature dedicate. Per superare queste criticità, la ricerca si è concentrata su tecniche di pretrattamento della gomma finalizzate a migliorarne la compatibilità con il bitume. Tra queste, i processi di devulcanizzazione

mirano alla parziale rottura selettiva dei legami reticolari della gomma, mantenendo invariata la struttura principale e riducendo la tendenza al rigonfiamento.

Le principali tecniche di trattamento includono metodi fisici, come trattamenti termo-meccanici, a microonde, a ultrasuoni e processi biotecnologici, e metodi chimici basati su agenti modificanti o attivatori. Tra i trattamenti fisici più diffusi vi è il cosiddetto “*terminal blend*”, che prevede lavorazioni ad alta temperatura e forte energia di taglio per ottenere un legante più omogeneo. I trattamenti chimici, invece, includono l’impiego di additivi quali acido polifosforico, zolfo e bio-oli, con l’obiettivo di migliorare la dispersione della gomma e la stabilità del legante.

Oltre alle criticità legate alla stabilità allo stoccaggio, un ulteriore limite dei bitumi modificati con polverino di gomma (CR) riguarda le prestazioni meccaniche. In generale, tali sistemi mostrano performance inferiori rispetto ai bitumi modificati con polimeri tradizionali, come lo SBS, a meno di utilizzare contenuti elevati di gomma. Per superare questa limitazione, la ricerca ha proposto l’impiego di sistemi ibridi costituiti da CR e SBS, che consentono da un lato il riutilizzo di materiali di scarto e dall’altro il raggiungimento di prestazioni comparabili a quelle dei leganti modificati convenzionali, con una contestuale riduzione dei costi di produzione. Diversi studi hanno analizzato questa combinazione evidenziando miglioramenti significativi delle proprietà del conglomerato bituminoso. In particolare, è stato osservato che l’aumento del contenuto di CR contribuisce a migliorare la resistenza a fatica delle miscele. Altri autori hanno inoltre evidenziato che l’impiego congiunto di SBS e CR migliora la resistenza alla deformazione permanente e riduce la suscettibilità alla fessurazione termica, anche in condizioni ambientali severe come i cicli di gelo-disgelo.

Il recente studio italiano di Carpani et al. (2025) ha valutato la possibilità di una sostituzione parziale o totale dello stirene-butadiene-stirene con un composto a base di polverino di gomma, senza compromettere le prestazioni meccaniche del conglomerato bituminoso. I risultati ottenuti da prove su campioni sia di laboratorio sia prodotti in impianto hanno mostrato che le miscele contenenti il composto di CR (circa 6 wt%) presentano proprietà volumetriche, rigidezza e resistenza alla trazione indiretta comparabili a quelle di miscele di riferimento modificate con SBS (4,8-5%).

Le prove a fatica hanno inoltre evidenziato prestazioni superiori per le miscele contenenti il composto di CR, attribuite a una minore suscettibilità all'invecchiamento del legante e a differenze nella natura del modificatore. La combinazione SBS-CR ha mostrato un incremento della rigidità complessiva, mentre la soluzione con sola gomma si è dimostrata efficace anche in termini di sostenibilità economica, con una riduzione stimata dei costi del modificatore pari a circa il 30%.

Dal punto di vista applicativo, la tecnologia consente il riutilizzo di gomma proveniente da pneumatici fuori uso senza necessità di attrezzature particolarmente complesse e permette un significativo recupero di materiale di scarto, con benefici ambientali diretti.[14]

3.1.3 Materiali alternativi nel riciclaggio

La rapida urbanizzazione e industrializzazione globale hanno determinato negli ultimi decenni un incremento significativo della produzione di rifiuti solidi, rendendo sempre più critica la gestione sostenibile delle risorse e dei materiali di scarto. Secondo recenti stime, la produzione mondiale di rifiuti urbani supera i due miliardi di tonnellate all'anno, con prospettive di ulteriore crescita nei prossimi decenni. Parallelamente, è aumentata l'attenzione verso l'impatto ambientale derivante anche dall'accumulo di rifiuti plastici: solo nel 2017 la produzione globale di rifiuti plastici ha raggiunto circa 348 milioni di tonnellate, con previsioni che indicano un possibile quadruplicamento entro il 2050. [15]

In questo contesto, il settore delle infrastrutture stradali riveste un ruolo particolarmente rilevante, poiché la costruzione e la manutenzione delle pavimentazioni comportano un elevato consumo di risorse naturali ed energia. Le pavimentazioni di tipo flessibile, largamente diffuse a livello mondiale, dipendono infatti dall'impiego di aggregati minerali non rinnovabili, la cui estrazione comporta impatti ambientali significativi, tra cui degrado ecosistemico ed erosione del suolo.

Alla luce degli obiettivi internazionali di decarbonizzazione e riduzione delle emissioni, la ricerca si sta orientando verso soluzioni innovative in grado di coniugare la gestione dei rifiuti con la sostenibilità delle infrastrutture. In tale ambito, l'impiego di materiali alternativi derivanti da scarti industriali, materiali da demolizione e rifiuti plastici nelle miscele bituminose rappresenta una soluzione promettente per favorire il recupero di materia, ridurre il consumo di risorse vergini e limitare l'impatto ambientale associato alla costruzione delle

pavimentazioni stradali. [16]

Tuttavia, nonostante i potenziali benefici ambientali ed economici, l'introduzione di tali materiali richiede un'attenta valutazione della compatibilità con il bitume, della durabilità nel tempo e delle prestazioni meccaniche delle miscele prodotte, aspetti che rappresentano ancora oggi uno dei principali ambiti di ricerca nel settore delle pavimentazioni sostenibili.

- Rifiuti industriali

Negli ultimi anni, diversi studi hanno approfondito la possibilità di impiegare rifiuti solidi come filler alternativi nelle miscele bituminose, con l'obiettivo di ridurre il consumo di materiali vergini e migliorare la sostenibilità delle pavimentazioni.

Alcuni ricercatori hanno analizzato l'utilizzo di polveri derivanti da sottoprodotti dell'industria del gas naturale e da scorie industriali come sostituti del filler calcareo tradizionale, evidenziando un miglioramento della resistenza all'ormaiamento e al danno da umidità, mantenendo comunque le prestazioni a bassa temperatura entro i limiti richiesti. In particolare, l'impiego di residui ferrosi (*"Iron Tailings"*, IT) ha mostrato anche un potenziale beneficio nelle tecnologie di autoriparazione attivate tramite microonde (vedi §3.2.2), migliorando la capacità di recupero delle miscele dopo cicli ripetuti di danneggiamento, con un rapporto di sostituzione ottimale individuato intorno al 40% per bilanciare le prestazioni stradali e l'efficienza economica.

Ulteriori ricerche hanno inoltre evidenziato come l'utilizzo di ceneri derivanti dall'incenerimento dei rifiuti solidi urbani come sostituti parziali degli aggregati possa migliorare la resistenza all'umidità e alle basse temperature, presentando al contempo livelli trascurabili di lisciviazione di metalli pesanti, confermando la sostenibilità ambientale della soluzione. Uno studio più ampio di Xu et al. (2026) ha infine analizzato diversi tipi di filler da rifiuti solidi, tra cui scoria d'acciaieria, gesso di desolforazione, scoria d'altoforno, cemento di scarto e residui ferrosi, evidenziando che l'impiego di tali materiali può migliorare significativamente le prestazioni meccaniche a lungo termine delle pavimentazioni. In particolare, scoria d'acciaieria, residui ferrosi e cemento di scarto hanno mostrato incrementi della resistenza a fatica, all'ormaiamento e all'umidità, sebbene con una lieve riduzione della resistenza alle basse temperature per alcuni materiali.

Dal punto di vista ambientale, tutti i filler analizzati presentano concentrazioni di metalli pesanti inferiori ai limiti normativi e contribuiscono a una riduzione significativa degli impatti ambientali, soprattutto grazie alla minore estrazione di materie prime e alla riduzione degli interventi di manutenzione nel ciclo di vita della pavimentazione. [16]

- Plastiche riciclate

L'utilizzo di plastiche riciclate nelle pavimentazioni bituminose rappresenta un'altra delle soluzioni più studiate negli ultimi anni nell'ambito delle infrastrutture sostenibili. Le plastiche riciclate possono essere introdotte nelle miscele bituminose principalmente attraverso due metodologie: il metodo a secco e il metodo a umido. Nel metodo a secco, la plastica sotto forma di granuli, fibre o pellet viene aggiunta agli aggregati prima della miscelazione con il bitume, sostituendo parzialmente gli aggregati tradizionali. Questa tecnica è generalmente utilizzata per plastiche ad alta densità come PVC, ABS e policarbonato. Nel metodo a umido, invece, la plastica viene incorporata direttamente nel legante bituminoso prima della miscelazione con gli aggregati, risultando particolarmente adatta per materiali plastici con temperature di fusione inferiori o granulometria più fine.

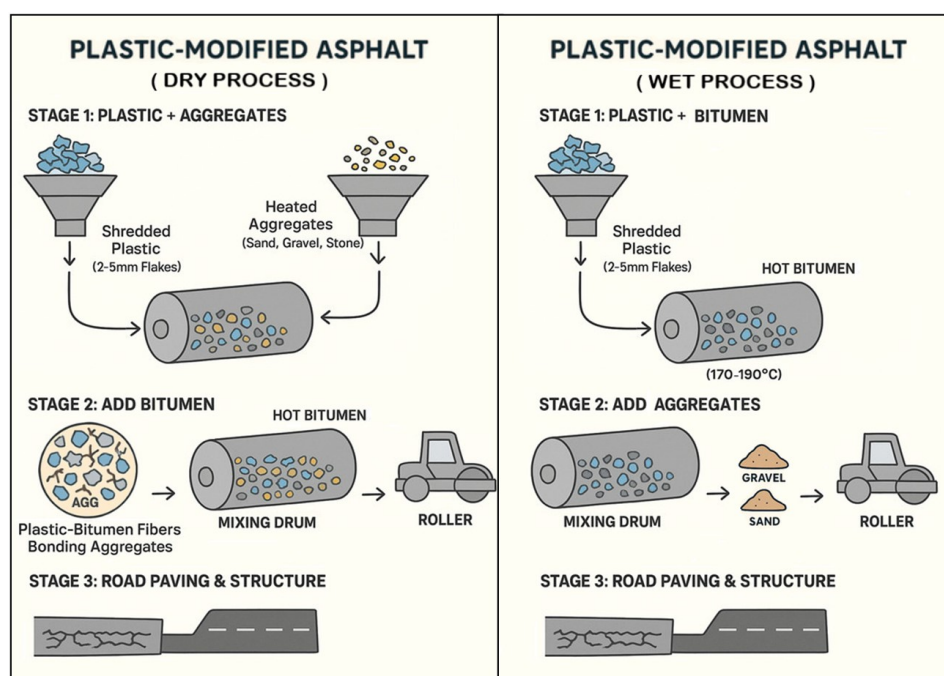


Figura 3.2: Schematizzazione della produzione di miscele asfaltiche modificate con plastica attraverso metodo a secco a sinistra e metodo a umido a destra. (fonte [17] su rielaborazione dell'autore)

Diversi studi hanno evidenziato come l'aggiunta di plastiche riciclate possa migliorare le proprietà meccaniche delle miscele bituminose. In particolare, il polietilene tereftalato (PET) contribuisce ad aumentare elasticità e capacità di recupero del legante, migliorando la resistenza alla deformazione permanente. Analogamente, il polietilene (PE), soprattutto se polverizzato in particelle fini prima della miscelazione, consente di incrementare significativamente la resistenza all'ormaiamento, raggiungendo in alcuni casi prestazioni superiori rispetto ai bitumi modificati con SBS alle stesse concentrazioni.

Tuttavia, uno degli aspetti più critici di questa tecnologia è rappresentato dalla stabilità allo stoccaggio dei bitumi modificati con plastica. Tra le principali strategie adottate vi sono la riduzione della dimensione delle particelle plastiche per favorire una dispersione più omogenea all'interno della matrice bituminosa e trattamenti chimici preliminari finalizzati ad aumentare la compatibilità tra plastica e bitume. Ad esempio, il conglomerato bituminoso con l'aggiunta di PET depolimerizzato chimicamente sotto forma di liquido viscoso ha mostrato miglioramenti nella stabilità allo stoccaggio, nella resistenza alla fatica, nella resistenza alle basse temperature e nell'adesione agli aggregati. Nonostante i vantaggi prestazionali e ambientali, l'impiego di plastiche riciclate comporta anche alcune criticità, tra cui l'aumento dei vuoti d'aria, la riduzione della densità delle miscele bituminose, e la possibile presenza di fumi tossici derivanti dalla fusione delle plastiche (soprattutto quelle contenenti cloro), aspetti che richiedono un'attenta progettazione della miscela per garantire adeguate prestazioni nel lungo periodo. [15]

- Rifiuti da costruzione e demolizione

Con l'accelerazione dell'urbanizzazione e dello sviluppo infrastrutturale, la produzione di rifiuti da costruzione e demolizione (*"Construction and Demolition waste"*, C&D) è aumentata significativamente negli ultimi decenni. Secondo il *World Green Building Council*, tali rifiuti rappresentano circa il 35% del materiale conferito annualmente in discarica a livello globale. I rifiuti C&D comprendono materiali molto eterogenei, tra cui calcestruzzo, laterizi, malte, ceramiche, metalli, plastiche, e altri residui derivanti da attività di costruzione, ristrutturazione e demolizione.

In questo contesto, il riutilizzo dei rifiuti CD nelle pavimentazioni stradali rappresenta una soluzione particolarmente promettente sia dal punto

di vista ambientale sia economico. La costruzione delle infrastrutture stradali richiede infatti enormi quantità di aggregati naturali, rendendo il settore stradale uno sbocco ideale per il recupero di materiali riciclati. Negli ultimi anni numerosi studi hanno analizzato la possibilità di impiegare aggregati riciclati (*“Recycled Pavement Aggregates”*, RPA) derivanti da rifiuti C&D nelle miscele bituminose.

Tuttavia, gli aggregati riciclati presentano spesso proprietà inferiori rispetto agli aggregati naturali, soprattutto nel caso di rifiuti ad elevato contenuto di laterizi. Le principali criticità riguardano l'elevato assorbimento d'acqua, la ridotta densità, la minore resistenza meccanica e la maggiore suscettibilità all'abrasione. Per questo motivo, molte ricerche recenti si sono concentrate sul miglioramento delle proprietà degli aggregati riciclati attraverso l'impiego di additivi o trattamenti specifici.

Tra le soluzioni investigate figurano l'utilizzo di plastiche PET, geogriglie, particelle di gomma riciclata, vetro frantumato e residui di cartongesso, che hanno mostrato miglioramenti delle proprietà fisiche e meccaniche degli aggregati riciclati, contribuendo contemporaneamente alla riduzione dei costi e dell'impatto ambientale. [18]

Parallelamente, sono stati sviluppati metodi innovativi di rinforzo fisico e chimico degli aggregati riciclati. I trattamenti fisici comprendono processi di macinazione meccanica o cicli gelo-disgelo per eliminare le parti più fragili del materiale, mentre i trattamenti chimici mirano a migliorare la struttura superficiale degli aggregati mediante rivestimenti o processi di sigillatura dei pori.

Tra le tecnologie più innovative recentemente proposte rientrano i processi di mineralizzazione biomimetica. Lo studio condotto da Wen et al. (2026) ha sviluppato una tecnica ispirata ai meccanismi naturali di rinforzo delle strutture vegetali, mediante la formazione di compositi biomimetici ad elevata tenacità ottenuti tramite mineralizzazione della silice e matrici idrogel. I risultati hanno mostrato che i laterizi di scarto trattati con tale tecnica presentano proprietà fisiche e meccaniche significativamente migliorate, consentendo il loro utilizzo come aggregati riciclati nelle pavimentazioni stradali. Le miscele bituminose prodotte con questi materiali hanno inoltre soddisfatto i requisiti prestazionali relativi alla resistenza all'acqua, alla stabilità termica e alle prestazioni a bassa temperatura previste dagli standard nazionali. [19]

- Ceneri pesanti

L'industria delle costruzioni dipende da lungo tempo da risorse naturali come la sabbia per lo sviluppo delle infrastrutture, in particolare nella costruzione di pavimentazioni stradali, ma la crescente domanda di materiali sostenibili ha incentivato l'utilizzo di rifiuti industriali come possibili sostituti. Tra i materiali alternativi impiegabili nelle pavimentazioni stradali, un'attenzione crescente è rivolta ai sottoprodotti della combustione del carbone, in particolare le ceneri pesanti (*"Bottom Ash"*, BTA).

La combustione del carbone nelle centrali termoelettriche produce principalmente ceneri volanti e ceneri pesanti, di cui queste ultime rappresentano una quota minore e risultano ancora oggi spesso destinate a discarica, con conseguenti problematiche ambientali e di gestione. Le BTA presentano caratteristiche granulometriche e morfologiche simili alla sabbia naturale, con particelle angolari e struttura porosa, che ne rendono potenzialmente interessante l'utilizzo come filler o sostituto parziale degli aggregati fini nelle miscele cementate e stabilizzate per pavimentazioni. Diversi studi hanno evidenziato che l'incorporazione di ceneri pesanti nei materiali per strati stradali di sottofondo, fondazione e base può migliorare le proprietà meccaniche complessive, tra cui resistenza a compressione, capacità portante, e durabilità ai cicli di *wet-dry*.

Il miglioramento delle prestazioni è principalmente attribuito a un effetto di *"particle packing"*, che riduce i vuoti e incrementa la densità della matrice. Inoltre, in presenza di cemento, la frazione fine della BTA può contribuire alla formazione di prodotti di idratazione aggiuntivi, come il silicato di calcio idrato, anche se la sua reattività pozzolanica rimane generalmente limitata a causa dell'elevata componente cristallina. A dosaggi elevati, tuttavia, la cenere pesante tende a comportarsi prevalentemente come filler inerte, con possibili incrementi di porosità e riduzione delle prestazioni meccaniche.

Dal punto di vista ambientale, le analisi di lisciviazione indicano concentrazioni di metalli pesanti inferiori ai limiti normativi, confermando la sicurezza del materiale in applicazioni stradali. Nel complesso, l'utilizzo della cenere pesante come sostituto parziale della sabbia rappresenta una soluzione promettente per ridurre il consumo di risorse naturali e valorizzare un sottoprodotto industriale altrimenti destinato allo smaltimento.

[20]

3.2 Tecnologie innovative di produzione e lavorazione

L'incremento delle esigenze di sostenibilità nel settore delle infrastrutture stradali non riguarda esclusivamente la sostituzione dei materiali impiegati, ma coinvolge anche i processi di produzione, posa in opera e manutenzione delle pavimentazioni. In questi anni, la ricerca si è concentrata anche sullo sviluppo di nuove tecnologie finalizzate a ridurre i consumi energetici, limitare le emissioni climalteranti, aumentare il contenuto di materiali riciclati e migliorare la durabilità delle infrastrutture stradali.

A tal proposito, particolare attenzione è stata rivolta alle tecnologie di produzione a bassa temperatura, che consentono di ridurre significativamente le temperature di miscelazione e compattazione rispetto agli asfalti tradizionali, con conseguenti benefici ambientali ed economici. Parallelamente, sono state sviluppate tecniche avanzate di riscaldamento e rigenerazione volte a prolungare la vita utile delle pavimentazioni mediante processi di autoriparazione o recupero delle proprietà meccaniche del materiale. In aggiunta, la crescente digitalizzazione del settore ha favorito l'introduzione di sistemi automatizzati e strumenti di controllo intelligente capaci di ottimizzare i processi produttivi e gestire in modo più efficiente la variabilità dei materiali riciclati.

Le sezioni seguenti analizzano alcune delle principali innovazioni tecnologiche recentemente proposte in letteratura, evidenziandone i principi di funzionamento, i vantaggi applicativi e il contributo al miglioramento della sostenibilità delle pavimentazioni stradali.

3.2.1 Tecnologie a bassa temperatura ("*Warm Mix Asphalt*", WMA)

La costruzione di infrastrutture stradali è in forte espansione, in particolare nei Paesi in via di sviluppo, con l'obiettivo di sostenere la crescita economica e la mobilità. Le stime indicano la realizzazione di circa 3–4,7 milioni di km di nuove strade a livello globale entro il 2050. Alla luce delle crescenti preoccupazioni legate al riscaldamento globale, il settore delle pavimentazioni stradali assume un ruolo rilevante in termini di impatto ambientale. L'impiego delle tradizionali miscele a caldo ("*Hot Mix Asphalt*", HMA) per soddisfare questa domanda comporterebbe un incremento significativo delle emissioni di carbonio e del potenziale di riscaldamento globale. La tecnologia *Warm Mix Asphalt*

(WMA) si propone come alternativa sostenibile, consentendo una significativa riduzione delle emissioni e del consumo energetico grazie a temperature di produzione inferiori rispetto ai HMA. In generale, i WMA vengono prodotti a temperature comprese tra 100 °C e 140 °C, rispetto ai 150–180 °C tipici delle miscele a caldo, con conseguenti benefici ambientali e operativi. [21]

Parallelamente, l'incorporazione e il riutilizzo del fresato d'asfalto (RAP) rappresentano un'altra strategia efficace per ridurre il consumo di risorse naturali nelle miscele bituminose. Tuttavia, l'impiego del RAP è stato tradizionalmente limitato a percentuali relativamente basse, tipicamente comprese tra il 10% e il 15%, intervallo entro il quale le miscele riciclate tendono a comportarsi in modo simile a quelle convenzionali, senza richiedere analisi aggiuntive specifiche. In queste condizioni, però, i benefici economici e ambientali risultano piuttosto contenuti. Per aumentare l'efficacia del riciclo, la ricerca si è progressivamente orientata verso l'utilizzo di percentuali più elevate di RAP, inclusi materiali provenienti da miscele ad alte prestazioni contenenti leganti modificati con polimeri, indicati come RAP modificato (RAP M). Questo tipo di fresato si distingue dal RAP convenzionale per la presenza di leganti polimerici residui e per la provenienza da pavimentazioni realizzate con aggregati di qualità superiore, rendendolo potenzialmente più performante una volta reintrodotta in nuove miscele, nonostante il naturale processo di invecchiamento subito in esercizio.

L'aumento del contenuto di RAP fino a valori elevati (circa 40–60%) comporta tuttavia diverse criticità, legate sia all'invecchiamento del legante presente nel materiale riciclato, sia all'aumento del consumo energetico e delle emissioni associate alla produzione. Inoltre, il riscaldamento del RAP richiede particolare attenzione, poiché il materiale contiene già legante bituminoso e non può essere trattato termicamente come un aggregato vergine senza rischiare un ulteriore degrado delle sue proprietà.

Per superare tali limiti, si ricorre sempre più frequentemente a tecnologie WMA e, in alcuni casi, *Half-Warm*, che consentono di ridurre le temperature di lavorazione e migliorare la lavorabilità delle miscele, facilitando l'integrazione di elevate percentuali di RAP.

I risultati sperimentali evidenziano che le miscele WMA contenenti RAP M risultano particolarmente adatte a condizioni di traffico elevato, grazie alle proprietà residue del legante polimerico presente nel materiale riciclato. Con l'aumento del contenuto di RAP M, si osserva un significativo incremento della resistenza all'ormaiamento, attribuibile sia alla maggiore rigidità complessiva

della miscela sia alla presenza di una rete polimerica parzialmente conservata che contribuisce a mantenere un comportamento elastico del materiale.

In particolare, nelle miscele con circa il 40% di RAP M, la deformazione permanente risulta ridotta di oltre il 50% rispetto sia alle miscele di controllo sia ai WMA contenenti RAP convenzionale (RAP C). Questo miglioramento è legato all'effetto sinergico tra il legante vergine e il contributo elastico della rete polimerica residua, che aumenta il recupero viscoelastico della miscela riciclata. Ne deriva un materiale idoneo anche per condizioni di traffico intenso e temperature elevate.

Dal punto di vista della durabilità, le miscele WMA-RAP mostrano generalmente una maggiore resistenza all'ormaiamento rispetto alle corrispondenti HMA con lo stesso contenuto di RAP, mentre le prestazioni a fatica e a bassa temperatura possono risultare comparabili o superiori quando si utilizzano additivi chimici o leganti modificati. Inoltre, l'impiego di RAP M contribuisce a migliorare le proprietà coesive e adesive della miscela, riducendo fenomeni di *stripping* in condizioni sature e migliorando la qualità del legame interfacciale tra aggregati e legante.

Nel complesso, l'integrazione di RAP modificato con tecnologie WMA consente di mantenere o migliorare le prestazioni meccaniche rispetto alle miscele tradizionali, riducendo al contempo le temperature di produzione. Questo approccio permette di incrementare il contenuto di materiale riciclato senza compromettere le proprietà strutturali della pavimentazione, con evidenti vantaggi in termini di riduzione delle emissioni e sostenibilità complessiva del processo produttivo. [22]

3.2.2 Tecnologie di riscaldamento e rigenerazione

La costruzione delle pavimentazioni stradali si basa tradizionalmente sull'impiego di conglomerati bituminosi a caldo (HMA), tecnologia che garantisce elevate prestazioni meccaniche e una comprovata durabilità nel tempo. I principali punti di forza delle miscele HMA riguardano la resistenza alla fatica, alla deformazione permanente e alla fessurazione, oltre ad un'ampia adattabilità nelle diverse applicazioni che ne ha favorito la diffusione su larga scala. Tuttavia, la produzione e la posa in opera di tali materiali richiedono temperature elevate, con conseguenti consumi energetici significativi e un rilevante impatto ambientale.

Negli ultimi anni, parallelamente allo sviluppo di tecnologie per la riduzione delle temperature di produzione, la ricerca si è orientata verso sistemi in-

novativi in grado di prolungare la vita utile delle pavimentazioni attraverso processi di autoriparazione (“*self-healing*”) e rigenerazione del materiale. Tra le tecnologie più promettenti emerge il riscaldamento mediante microonde, che consente di ripristinare le proprietà del conglomerato bituminoso intervenendo direttamente sui meccanismi di danneggiamento che si sviluppano durante l’esercizio.

Il principio alla base di questa tecnologia consiste nell’utilizzo di radiazioni elettromagnetiche per generare calore all’interno della miscela bituminosa. L’efficacia del processo dipende principalmente dalle proprietà dielettriche dei materiali costituenti, ovvero dalla loro capacità di assorbire l’energia delle microonde e trasformarla in energia termica. Poiché il bitume presenta proprietà dielettriche relativamente basse, il riscaldamento viene generalmente favorito mediante l’introduzione di materiali altamente suscettibili alle microonde, come fibre metalliche, aggregati derivanti da scorie siderurgiche o altri materiali a base carboniosa.

Quando tali componenti assorbono l’energia elettromagnetica, il calore generato viene trasferito progressivamente al bitume circostante, provocandone il rammollimento. Questo fenomeno favorisce la chiusura delle microfessure presenti nel materiale e il ripristino della coesione tra legante e aggregati. Il riscaldamento indotto dalle microonde permette quindi di attivare meccanismi di autoriparazione che contribuiscono al recupero delle proprietà meccaniche originarie della miscela.

Diversi studi hanno evidenziato come l’aggiunta di scorie d’acciaieria o fibre metalliche possa incrementare significativamente il potenziale di autoriparazione delle miscele bituminose. In alcuni casi, dopo ripetuti cicli di riscaldamento, è stato osservato non solo il recupero delle caratteristiche iniziali del materiale, ma anche un miglioramento di alcune proprietà meccaniche rispetto allo stato originario. Questo risultato è attribuito alla migliore distribuzione del legante e alla riduzione dei difetti interni presenti nella matrice bituminosa.

Per incrementare ulteriormente l’efficacia del processo, numerosi ricercatori hanno proposto l’integrazione del riscaldamento a microonde con operazioni di ri-compattazione meccanica. Questo approccio termomeccanico si sviluppa generalmente in due fasi successive: una prima fase di irradiazione mediante microonde, finalizzata al rammollimento del bitume, e una seconda fase di compattazione, che consente di richiudere i vuoti e ripristinare l’integrità strutturale del materiale.

Un esempio significativo è rappresentato dallo studio condotto da Boutgoulla

et al. (2026), nel quale è stata analizzata l'efficacia di un trattamento combinato basato su riscaldamento a microonde e ri-compattazione applicato a miscele bituminose riciclate a freddo contenenti scorie nere provenienti dall'industria siderurgica. I risultati hanno evidenziato come la presenza delle scorie migliori sensibilmente la capacità della miscela di assorbire l'energia elettromagnetica. In particolare, mentre la miscela di riferimento ha mostrato una risposta limitata all'irradiazione, la miscela contenente il 20% di scorie ha raggiunto temperature particolarmente elevate, fino a circa 165 °C sulla superficie esterna e oltre 190 °C nelle zone interne. [23]

Le particelle di scoria hanno infatti agito come efficienti assorbitori di microonde, favorendo il riscaldamento uniforme del conglomerato e consentendo il rammollimento del legante bituminoso. Tale fenomeno ha permesso una migliore ridistribuzione del bitume all'interno della matrice e il ripristino dei legami tra aggregati e legante, creando le condizioni ottimali per la successiva fase di ri-compattazione.

Lo studio ha dimostrato che la combinazione tra riscaldamento a microonde e ri-compattazione meccanica costituisce una strategia efficace per incrementare la capacità di autoriparazione delle miscele bituminose riciclate a freddo. Oltre al recupero delle prestazioni meccaniche, questo approccio presenta interessanti prospettive applicative in termini di sostenibilità, poiché consente di estendere la vita utile delle pavimentazioni esistenti riducendo la necessità di interventi di manutenzione invasivi e limitando il consumo di nuove materie prime.[23]

L'adozione di tali tecnologie potrebbe quindi rappresentare una soluzione innovativa per la gestione sostenibile delle infrastrutture stradali, contribuendo sia alla riduzione dei costi di manutenzione sia alla diminuzione dell'impatto ambientale associato alla produzione e al trasporto dei materiali da costruzione.

3.2.3 Tecnologie automatizzate e controllo digitale

Come già accennato l'incremento dell'utilizzo del fresato d'asfalto rappresenta una delle principali strategie per migliorare la sostenibilità economica e ambientale delle pavimentazioni stradali. Tuttavia, l'impiego di elevate percentuali di RAP è spesso limitato dalla forte variabilità del materiale riciclato. Le differenze nelle condizioni delle pavimentazioni originarie, nelle profondità di fresatura, nelle modalità di stoccaggio e nella provenienza del materiale possono infatti determinare significative variazioni nella granulometria, nel contenuto di bitume e nelle proprietà meccaniche del RAP.

Questa variabilità costituisce uno dei principali ostacoli alla produzione di miscele bituminose riciclate ad alte prestazioni, poiché può compromettere l'uniformità qualitativa del prodotto finale e rendere più complesso il controllo del processo produttivo. Tradizionalmente, il problema viene affrontato mediante operazioni di frantumazione, classificazione granulometrica e stoccaggio separato del materiale, oltre che attraverso un'attenta progettazione della miscela. Negli ultimi anni, l'evoluzione delle tecnologie digitali ha aperto nuove prospettive per la gestione intelligente del RAP. In particolare, stanno emergendo sistemi basati su algoritmi di analisi dei dati, sensori e strumenti di supporto decisionale in grado di automatizzare parte delle operazioni di classificazione e controllo qualità.

Un esempio significativo è rappresentato dallo studio di Xu et al. (2026), nel quale è stato sviluppato un *framework* intelligente per il controllo della variabilità del RAP negli impianti di riciclaggio a caldo. Il sistema utilizza l'algoritmo di *clustering* DBSCAN per classificare automaticamente il materiale fresato sulla base delle condizioni della pavimentazione di origine, consentendo una gestione più omogenea dello stoccaggio e dell'impiego del RAP.

Parallelamente, gli autori hanno sviluppato un metodo di calcolo automatico del contenuto ottimale di RAP nelle miscele bituminose riciclate, integrato in un'applicazione mobile dedicata. Tale strumento consente di controllare simultaneamente la variabilità della granulometria e del rapporto bitume-aggregato, riducendo il rischio di produrre miscele non conformi alle specifiche progettuali.

I risultati ottenuti hanno evidenziato una significativa riduzione della variabilità delle miscele prodotte. Inoltre, grazie al miglior controllo del materiale riciclato, è stato possibile aumentare il contenuto di RAP fino al 32%, rispetto al 2% utilizzato nella pratica tradizionale, ottenendo una riduzione delle emissioni di carbonio pari all'8,59%. [24]

L'applicazione di strumenti digitali e sistemi automatizzati di gestione rappresenta quindi una delle direzioni più promettenti per il futuro del riciclaggio delle pavimentazioni bituminose. L'integrazione tra tecniche di monitoraggio, algoritmi di classificazione e supporti software dedicati consente infatti di migliorare la qualità delle miscele riciclate, aumentare le percentuali di materiale recuperato e ridurre contemporaneamente l'impatto ambientale del settore stradale.

Negli ultimi anni, il settore delle infrastrutture stradali sta attraversando un

processo di trasformazione digitale analogo a quello osservato in numerosi altri comparti industriali. Qui si inserisce il concetto di “*Asphalt 4.0*”, sviluppato a partire dai principi dell’Industria 4.0 e basato sull’integrazione di tecnologie digitali, sistemi intelligenti di gestione dei dati e processi automatizzati lungo l’intero ciclo di vita delle pavimentazioni.

Secondo l’*European Asphalt Pavement Association* (EAPA), il concetto di *Asphalt 4.0* si fonda su tre principi fondamentali: trasparenza, tracciabilità e innovazione. L’obiettivo è migliorare l’efficienza operativa, la qualità dei prodotti e dei servizi offerti, l’ottimizzazione delle risorse e la sostenibilità complessiva del settore stradale. A differenza degli approcci tradizionali, basati principalmente sull’esperienza degli operatori e su controlli puntuali, l’*Asphalt 4.0* prevede una gestione continua e integrata delle informazioni generate durante tutte le fasi di progettazione, produzione, costruzione, manutenzione e riciclo delle pavimentazioni.

Tra le tecnologie maggiormente coinvolte figurano sensori avanzati, sistemi *Internet of Things* (IoT), piattaforme cloud per l’archiviazione dei dati, comunicazioni macchina-macchina (M2M), strumenti di intelligenza artificiale e algoritmi di *machine learning*. Tali strumenti consentono il monitoraggio in tempo reale dei parametri di produzione, il controllo automatico dei dosaggi dei materiali, la tracciabilità dei lotti di produzione e l’ottimizzazione dei processi decisionali attraverso l’analisi di grandi quantità di dati. [25]

L’applicazione di questi strumenti risulta particolarmente rilevante nel caso delle miscele bituminose riciclate ad alto contenuto di RAP, dove la variabilità dei materiali rappresenta uno dei principali ostacoli all’incremento delle percentuali di riciclo. In questo contesto, sistemi intelligenti di classificazione, monitoraggio e controllo, come quelli proposti da Xu et al. (2026), permettono di ridurre l’incertezza associata alle caratteristiche del materiale recuperato e di migliorare la qualità delle miscele prodotte.

Riassumendo, la digitalizzazione del settore stradale apre nuove prospettive per la gestione sostenibile delle infrastrutture, consentendo di ridurre consumi energetici, emissioni climalteranti e sprechi di materiali. Inoltre, la disponibilità di dati aggiornati e continuamente monitorati favorisce una manutenzione più efficiente delle pavimentazioni e una migliore pianificazione degli interventi nel lungo periodo. Per questi motivi, l’*Asphalt 4.0* rappresenta una delle principali direttrici di innovazione per il futuro dell’ingegneria delle pavimentazioni, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale,

economica e gestionale richiesti dalle moderne infrastrutture di trasporto.

Capitolo 4

ANALISI DEGLI ASPETTI AMBIENTALI ED ECONOMICI

4.1 Benefici ambientali delle tecnologie innovative

Le tecnologie innovative analizzate nel capitolo precedente dimostrano come il settore delle pavimentazioni stradali si stia evolvendo verso soluzioni sostenibili che rispondono alla crescente necessità di ridurre l'impronta ecologica sempre più importante. L'impiego di materiali naturali e riciclati e di tecnologie avanzate consente infatti di ridurre l'impatto ambientale associato alla costruzione e alla manutenzione delle infrastrutture stradali. A partire dalle tecnologie precedentemente descritte, è possibile analizzare i principali benefici ambientali secondo tre aspetti fondamentali: la riduzione del consumo di materie prime vergini, la diminuzione delle emissioni di gas serra generate durante il ciclo produttivo e la valorizzazione dei materiali di scarto secondo i principi dell'economia circolare.

4.1.1 Riduzione del consumo di materie prime

Il primo importante beneficio ambientale riguarda la riduzione delle attività estrattive in cava e nella riduzione della dipendenza dal petrolio greggio per la produzione di leganti vergini. Il tasso di sostituzione delle materie prime varia in funzione della tipologia del materiale alternativo incorporato:

- Materiali riciclati dalla pavimentazione (RAP):
Rappresenta la strategia a più alto impatto quantitativo, in quanto consente il recupero simultaneo sia della frazione lapidea (aggregati già selezionati e lavorati) sia della frazione legante (bitume invecchiato), riducendo l'utilizzo di nuovi aggregati naturali e di bitume vergine.
- Biomateriali (biochar e lignina):
L'impiego di materiali di origine biologica come biochar derivato da residui agricoli e lignina consente di sostituire parzialmente componenti tradizionalmente derivati dal petrolio, riducendo il consumo di materie prime non rinnovabili e promuovendo al contempo la valorizzazione di sottoprodotti provenienti da altri settori produttivi.
- Sottoprodotti industriali (rifiuti da costruzione e demolizione, *bottom ash*):
L'impiego di frazioni cementizie o laterizie riciclate in sostituzione degli aggregati naturali contribuisce a limitare il consumo di materiali estratti da cava, riducendo gli impatti ambientali associati alle attività estrattive e offrendo al contempo uno scopo utile a materiali altrimenti conferiti in discarica. Per quanto riguarda le ceneri pesanti, grazie alle loro caratteristiche granulometriche e morfologiche, le ceneri pesanti derivanti dalla combustione del carbone agiscono come sostituti parziali della sabbia naturale e dei filler fini, migliorando la distribuzione granulometrica e il compattamento degli strati di fondazione senza ricorrere a nuove risorse estrattive.[20]
- Polimeri riciclati (plastiche, gomma):
L'introduzione di polimeri di scarto (quali PET depolimerizzato o polietilene) agisce come modificatore termoplastico del bitume o come parziale sostituto degli aggregati fini, riducendo l'impiego di polimeri vergini ottenuti da processi petrolchimici tradizionali. [16]

4.1.2 Riduzione delle emissioni

Un secondo beneficio ambientale rilevante associato alle strategie innovative analizzate riguarda la riduzione delle emissioni climalteranti generate durante le fasi di produzione, trasporto, posa in opera e manutenzione delle pavimentazioni stradali. Dall'analisi delle tecnologie considerate si evince come la diminuzione delle temperature di produzione, l'ottimizzazione dei processi

e il maggiore riutilizzo di materiali esistenti contribuiscano direttamente alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas a effetto serra:

- Tecnologie *Warm Mix Asphalt* (WMA):

Come evidenziato dagli studi, operando a un intervallo termico compreso tra i 100°C e i 140°C (rispetto ai 150-180°C degli asfalti a caldo tradizionali HMA), queste tecnologie consentono un risparmio di combustibile fossile negli impianti compreso tra il 15% e il 30%. Questo comporta una significativa diminuzione delle emissioni di CO₂ e di altri composti inquinanti, tra cui SO₂, VOC e NO_x, durante le fasi di miscelazione e posa in opera. [26]

- Aumento del contenuto di RAP:

L'incremento della percentuale di fresato reintrodotta nei cicli di lavorazione riduce le emissioni indirette associate alle attività estrattive, al trasporto e alla lavorazione delle materie prime lungo l'intera catena di fornitura.

- Controllo digitale e *Asphalt 4.0*:

L'utilizzo di sensori intelligenti e algoritmi permette un controllo granulometrico istantaneo e una regolazione dinamica delle fiamme dell'essiccatore. Questo previene surriscaldamenti anomali, riducendo gli sprechi energetici e riducendo le emissioni complessive dell'impianto. [25]

4.1.3 Riduzione dei rifiuti in discarica e circolarità delle risorse

Un'operazione di interesse ambientale importante riguarda la possibilità di riutilizzare i materiali di scarto industriali come nuove risorse per la costruzione della pavimentazione stradale secondo i principi dell'economia circolare, valorizzando gli scarti provenienti da filiere industriali e trasformando oneri ambientali in risorse di valore tecnologico.

Plastiche riciclate, materiali da costruzione e demolizione, ceneri pesanti derivanti dalla combustione del carbone e altri residui industriali trovano nuova applicazione come sostituti di aggregati, filler o modificanti del legante bituminoso. In parallelo, gli pneumatici esausti tramite polverizzazione della gomma vengono usati per la produzione di bitumi modificati, risolvendo il problema dello smaltimento di grandi volumi di pneumatici difficilmente smaltibili e al contempo migliorando le prestazioni viscoelastiche della struttura.

Allo stesso modo, materiali di origine biologica, come bio-oil o oli alimentari esausti vengono impiegati come agenti rigeneranti invece di costituire un rifiuto pericoloso per le reti idriche, le loro frazioni chimiche mobili reintegrano i malteni persi dal bitume del RAP per ossidazione, stabilizzando la suscettibilità termica della miscela.

Per confrontare in modo sintetico l'efficienza ambientale delle diverse tecnologie, la Tabella 4.1 riporta una valutazione degli effetti prodotti sui differenti vettori ambientali.

Tabella 4.1: Confronto dei benefici ambientali delle tecnologie analizzate.

Soluzione Tecnologica	Riduzione Materie Prime	Riduzione Rifiuti	Riduzione Emissioni (CO₂)
Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	Alta	Media	Alta
Bio-oli e Oli alimentari esausti (WEO)	Alta	Alta	Media
Biochar e Lignina (Biomasse vegetali)	Media	Alta	Alta
Pneumatici esausti (Crumb Rubber)	Media	Alta	Media
Plastiche Riciclate (PET/PE)	Media	Alta	Media
Rifiuti da Demolizione (C&D)	Alta	Alta	Bassa
Ceneri Pesanti (Bottom Ash)	Media	Alta	Bassa
Warm Mix Asphalt (WMA)	Bassa	/	Alta

4.2 Benefici economici delle tecnologie innovative

La sostenibilità di un'infrastruttura oltre ad essere valutata dal punto di vista ambientale, deve essere valutata anche la componente economica lungo l'intero ciclo di vita dell'opera. Risulta quindi fondamentale distinguere i risparmi immediati legati ai materiali e ai processi produttivi dai costi iniziali richiesti per l'adozione di tecnologie innovative, valutandone l'effettiva convenienza nel lungo periodo.

4.2.1 Risparmio diretto sui materiali

La sostituzione parziale o totale dei materiali tradizionalmente impiegati nelle pavimentazioni stradali può generare un risparmio economico immediato, principalmente legato alla riduzione dei costi di approvvigionamento delle materie prime.

- Riduzione del costo del legante tramite bio-oli e oli esausti:

Il bitume di origine petrolifera rappresenta una delle componenti economicamente più onerose delle miscele bituminose ed è soggetto a forti oscillazioni di prezzo legate al mercato del petrolio. L'impiego del legante già presente nel RAP, opportunamente rigenerato attraverso oli esausti o bio-oli di origine vegetale, permette di ridurre la dipendenza dai materiali vergini e limitare i costi associati alla raffinazione del greggio.

- Sostituzione di modificatori tradizionali con biochar e lignina:

Materiali di origine naturale come biochar derivato da paglia di riso o lignina possono sostituire, almeno parzialmente, modificatori sintetici convenzionali come SBS o EVA. L'utilizzo di questi sottoprodotti consente di ridurre il ricorso a polimeri di origine petrolchimica, offrendo al tempo stesso una soluzione economicamente più accessibile grazie alla loro elevata disponibilità. [12]

- Riduzione dell'utilizzo di aggregati vergini:

L'impiego di materiali riciclati come RAP, rifiuti da costruzione e demolizione oppure ceneri pesanti permette di limitare l'acquisto di aggregati naturali provenienti da cava. Questo aspetto assume particolare rilevanza economica nei cantieri localizzati lontano dai siti di estrazione, dove i

costi di trasporto incidono in maniera significativa sul costo finale della miscela.

4.2.2 Risparmio energetico di processo

Una parte rilevante dei costi di produzione delle miscele bituminose deriva dall'energia necessaria al riscaldamento dei materiali durante le fasi di lavorazione. Per questo motivo, le tecnologie che consentono di ridurre i consumi energetici possono determinare vantaggi economici significativi.

- Efficienza energetica delle miscele *Warm Mix Asphalt* (WMA):
La produzione delle miscele tiepide avviene a temperature inferiori rispetto ai conglomerati bituminosi tradizionali, generalmente con una riduzione di circa 20–40 °C. Questo comporta un minor consumo di combustibile negli impianti di produzione e, di conseguenza, una riduzione diretta dei costi energetici associati al funzionamento dei bruciatori. [26]
- Tecnologie di riscaldamento localizzato mediante microonde:
L'utilizzo del riscaldamento selettivo tramite microonde, in combinazione con materiali sensibili alle radiazioni elettromagnetiche come scorie d'acciaieria o altri additivi specifici, consente di concentrare l'energia esclusivamente nelle zone in cui è necessario attivare il rammollimento del bitume. Questo permette di limitare le dispersioni termiche tipiche dei sistemi di riscaldamento tradizionali e di ottimizzare i consumi energetici durante gli interventi di manutenzione. [23]

4.2.3 Risparmio sui costi operativi

L'adozione di materiali innovativi o tecnologie avanzate può comportare costi iniziali superiori rispetto alle soluzioni convenzionali. Tuttavia, tali costi devono essere valutati considerando i benefici prestazionali che si manifestano durante l'intera vita utile della pavimentazione.

- Maggiore durabilità e migliori prestazioni meccaniche:
L'impiego di modificatori avanzati, come sistemi combinati a base di SBS e polverino di gomma riciclata, consente di migliorare l'elasticità del legante e aumentare la resistenza alla deformazione permanente e alla fatica. Questo si traduce in una maggiore capacità della pavimentazione di mantenere nel tempo le proprie prestazioni funzionali. [14]

- Riduzione degli interventi di manutenzione:

Una maggiore resistenza ai dissesti consente di aumentare l'intervallo temporale tra un intervento manutentivo e il successivo. La diminuzione della frequenza di fresatura e rifacimento degli strati superficiali riduce i costi operativi sostenuti dagli enti gestori e limita anche i costi indiretti associati ai disagi causati dalla presenza dei cantieri.

- Riduzione dei costi complessivi lungo il ciclo di vita:

Le analisi tecnico-economiche mostrano che, nonostante un eventuale incremento del costo iniziale legato ad alcuni modificatori innovativi, le migliori prestazioni meccaniche e la maggiore durabilità possono determinare una riduzione significativa dei costi complessivi nel lungo periodo. Nel caso dei bitumi modificati con gomma riciclata, ad esempio, è stata osservata una diminuzione dei costi del ciclo di vita stimata intorno al 30%, grazie soprattutto al miglior comportamento a fatica riscontrato sia in laboratorio sia nelle applicazioni in campo. [14]

4.3 Limiti e criticità delle tecnologie innovative

Nonostante i numerosi vantaggi ambientali ed economici evidenziati nei capitoli precedenti, l'applicazione su larga scala delle tecnologie innovative analizzate presenta ancora diverse criticità. La diffusione industriale di questi materiali e processi è infatti condizionata da limiti tecnici, costi iniziali elevati e dalla necessità di un quadro normativo più strutturato, che permetta una maggiore standardizzazione e affidabilità delle soluzioni proposte.

4.3.1 Elevata variabilità del RAP

Uno dei principali limiti legati all'utilizzo del fresato d'asfalto riguarda la sua elevata eterogeneità. A differenza degli aggregati naturali vergini, il RAP deriva da pavimentazioni differenti per età, composizione originaria, spessore degli strati rimossi e condizioni di stoccaggio successive alla fresatura. Questa variabilità comporta inevitabilmente differenze nel contenuto di bitume residuo e nella distribuzione granulometrica del materiale recuperato. In assenza di adeguati sistemi di selezione, classificazione e controllo, tali differenze possono compromettere l'omogeneità delle prestazioni della miscela finale, limitando nella pratica l'utilizzo del RAP a percentuali relativamente basse. Per questo

motivo stanno assumendo crescente importanza sistemi di gestione avanzata e processi di controllo digitale in grado di ridurre tale variabilità.

4.3.2 Instabilità e incompatibilità dei materiali

L'introduzione di materiali alternativi all'interno della matrice bituminosa può generare problematiche legate alla compatibilità fisica e chimica tra i diversi componenti, influenzando la stabilità e il comportamento del legante nel tempo.

- Instabilità allo stoccaggio di gomma e plastiche riciclate:
La differenza di densità e la limitata compatibilità chimica tra bitume, polimeri riciclati e polverino di gomma possono provocare fenomeni di separazione di fase durante lo stoccaggio alle alte temperature. Questo comporta la necessità di mantenere il materiale in continua agitazione e di utilizzare sistemi di pompaggio dedicati per evitare sedimentazioni o ostruzioni negli impianti. [14]
- Sensibilità all'invecchiamento e all'umidità:
Sebbene bio-oli e oli esausti possano migliorare il recupero del legante invecchiato, alcuni composti ossigenati presenti al loro interno possono favorire fenomeni di ossidazione nel tempo o aumentare la suscettibilità all'umidità, specialmente quando il valore di acidità rimane elevato. In questi casi risultano necessari trattamenti di stabilizzazione o l'impiego di additivi correttivi [10]. Parallelamente, l'utilizzo combinato di tecnologie WMA con alte percentuali di RAP richiede un controllo accurato della resistenza all'umidità nel lungo periodo. [26]
- Incremento di rigidità con biochar e lignina:
L'impiego di biochar o lignina in quantità elevate può aumentare eccessivamente la rigidità complessiva della miscela, comportandosi in parte come un filler inerte. Questo può determinare una leggera riduzione delle prestazioni alle basse temperature, rendendo necessario un accurato controllo del dosaggio durante la fase di progettazione della miscela. [13]

4.3.3 Investimenti iniziali

L'adozione di tecnologie innovative nel settore stradale richiede spesso investimenti iniziali elevati, che possono rallentarne la diffusione soprattutto nelle attività produttive di medio-piccole dimensioni. L'integrazione di novità nel

processo produttivo comporta costi significativi legati all'adeguamento degli impianti esistenti, all'acquisto di nuove attrezzature e all'utilizzo di sistemi di controllo avanzati. In molti casi, il rientro economico di questi investimenti richiede tempi medio-lunghi, rendendo meno immediata la convenienza economica.

- Adeguamento degli impianti per elevate percentuali di RAP:

L'introduzione di contenuti elevati di fresato, soprattutto oltre il 40%, richiede impianti dotati di sistemi specifici per il riscaldamento indiretto del materiale, evitando che il bitume invecchiato venga esposto direttamente alla fiamma e subisca ulteriori fenomeni di degradazione.

- Investimenti in digitalizzazione e sistemi Asphalt 4.0:

L'utilizzo di sistemi di controllo intelligente richiede l'integrazione di sensori, piattaforme digitali, sistemi di monitoraggio in tempo reale e software dedicati alla gestione automatizzata dei parametri produttivi. Per molte imprese questi investimenti rappresentano ancora un ostacolo, a causa degli elevati costi iniziali e della necessità di disporre di adeguati strumenti di incentivazione economica.

4.3.4 Rigidità dei capitolati d'appalto tradizionali

Un ulteriore ostacolo alla diffusione di queste tecnologie riguarda la limitata presenza di normative tecniche consolidate per l'utilizzo di molti materiali alternativi.

L'impiego di materiali riciclati, come rifiuti da costruzione e demolizione o ceneri pesanti, è spesso rallentato dall'assenza di specifiche tecniche condivise e da una generale diffidenza nei confronti delle loro prestazioni a lungo termine. Molti capitolati tradizionali continuano infatti a privilegiare materiali vergini convenzionali, limitando l'introduzione di alternative innovative nonostante numerosi studi abbiano evidenziato prestazioni soddisfacenti e livelli di sicurezza ambientale pienamente compatibili con i limiti normativi. [18]

4.3.5 Necessità di validazione e monitoraggio sul campo

Molte delle tecnologie descritte nei capitoli precedenti hanno mostrato risultati molto promettenti in laboratorio, ma la loro effettiva affidabilità deve essere verificata anche in condizioni reali in sito.

Le prove sperimentali consentono di valutare parametri meccanici come rigidità, resistenza a fatica o comportamento all'umidità, ma non sempre riproducono fedelmente le condizioni di esercizio cui una pavimentazione è sottoposta durante la propria vita utile.

Diverse soluzioni innovative più recenti, come i processi di mineralizzazione biomimetica o alcuni rigeneranti di nuova generazione, necessitano ancora di monitoraggi prolungati su tratti stradali reali e di osservazioni nel lungo periodo. Solo attraverso una validazione estesa sul campo sarà possibile confermarne definitivamente l'affidabilità tecnica e favorirne una diffusione commerciale su larga scala.

Capitolo 5

CASI STUDIO E APPLICAZIONI IN SITO

Dopo aver analizzato le principali innovazioni nei materiali e nei processi produttivi, risulta utile esaminare alcune applicazioni reali in cui tali soluzioni sono state effettivamente implementate. L'analisi di casi studio consente di osservare come le tecnologie descritte nei capitoli precedenti possano essere trasferite dalla ricerca sperimentale alla pratica costruttiva, evidenziandone benefici e risultati ottenuti.

5.1 Applicazione di miscele bituminose modificate in ambito aeroportuale italiano

5.1.1 Inquadramento dell'intervento e obiettivi prestazionali

Nel caso studio condotto presso l'Aeroporto Internazionale di Palermo da Ce-lauro et al. (2019), l'obiettivo principale della ricerca è stato quello di valutare l'efficacia di un composto polimerico (PC) progettato per migliorare le prestazioni meccaniche di miscele bituminose di qualità media.

Le pavimentazioni in ambito aeroportuale, in particolare nelle zone di accesso ai piazzali di sosta, sono sottoposte a condizioni di carico molto gravose e localizzate, che accelerano i normali processi di degrado strutturale. Sebbene le pavimentazioni ad alto modulo richiedano l'impiego di bitumi duri (con bassi gradi di penetrazione), essi sono spesso costosi e difficilmente reperibili. La sperimentazione ha quindi voluto verificare se l'aggiunta del composto

polimerico potesse consentire l'utilizzo di un bitume con grado di penetrazione 50/70, più tenero di altri bitumi, facilmente disponibile sul mercato come quello italiano, garantendo comunque valori di rigidità e resistenza adeguati a condizioni di esercizio gravose. [27]

Per valutare le prestazioni della miscela sono state condotte diverse prove sperimentali, sia in laboratorio sia in sito. La ricerca si è sviluppata in due fasi distinte:

- Fase 1 (test di laboratorio), finalizzata alla progettazione preliminare della miscela (mix design) e alla valutazione delle prestazioni meccaniche;
- Fase 2 (test di laboratorio e in sito): finalizzata alla verifica delle prestazioni del materiale su una sezione di prova reale.

5.1.2 Materiali impiegati e mix design

I materiali impiegati nella sperimentazione comprendono un bitume puro 50/70 e aggregati calcarei frantumati provenienti da una cava locale. Il modificatore utilizzato è un composto polimerico commerciale (PC) sotto forma di granuli flessibili, costituito da una miscela di polietilene a bassa densità (LDPE), etilene-vinil acetato (EVA) e altri polimeri caratterizzati da un punto di fusione medio.

Poiché questo additivo è di natura apolare e presenta una bassa affinità chimica con il bitume, i ricercatori hanno escluso la modifica "a umido" (*wet process*), optando invece per la modifica "a secco" (*dry process*) più efficiente. Il processo prevede l'introduzione dell'additivo direttamente all'interno degli aggregati caldi prima dell'aggiunta del bitume, seguendo la sequenza: aggregati → additivo polimerico → bitume → filler.

La progettazione della miscela è stata sviluppata in due fasi sperimentali. Nella Fase 1 (in laboratorio), l'uso del compattatore giratorio ha evidenziato che la presenza del composto polimerico permette di ridurre il contenuto ottimale di bitume fino al 4,3% rispetto al range iniziale del 4,8%-5,1%, limitando fenomeni di spurgo superficiale (*bleeding*). In questa fase preliminare, la percentuale ottimale di composto polimerico è stata fissata allo 0,3% rispetto alla massa degli aggregati. Nella Fase 2, finalizzata alla messa in opera, il mix design è stato ricalibrato per i diversi strati della pavimentazione, aumentando il dosaggio del PC e del legante in base alla vicinanza con la superficie, dove le sollecitazioni sono maggiori. Le miscele ottimali sono state così definite (in massa di aggregati) [27]:

- Strato di usura: 0,4% di composto polimerico (PC) e 5,6% di bitume;
- Strato di collegamento (o binder): 0,3% di composto polimerico (PC) e 4,9% di bitume;
- Strato di base: 0,2% di composto polimerico (PC) e 4,1% di bitume.

5.1.3 Posa in opera e valutazione delle prestazioni

Il comportamento in sito della miscela bituminosa modificata (*"Polymer-Modified Asphalt"*, PMA) è stato valutato realizzando una sezione di prova reale sulla pavimentazione di accesso al piazzale di sosta dell'aeroporto. La struttura è una pavimentazione semi-rigida, costituita da un substrato roccioso in calcarenite, da uno strato di terreno e da una sotto-base entrambi stabilizzati con cemento, sopra i quali sono stati posati i tre strati di conglomerato modificato (base, binder e usura).

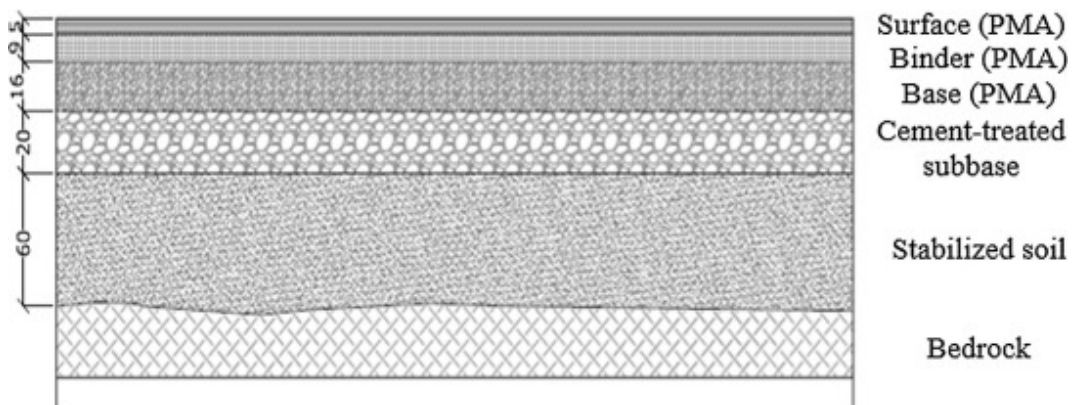


Figura 5.1: Stratigrafia della sezione di prova semi-rigida realizzata presso l'Aeroporto Internazionale di Palermo [27]

Per valutare la rigidità strutturale della pavimentazione in sito ed effettuare un confronto diretto con i test di laboratorio, sono state eseguite prove di deflessione dinamica tramite l'*Heavy Weight Deflectometer* (HWD) Dynatest a 9 geofoni, applicando un carico impulsivo massimo di circa 240 kN. Durante i test, una termocoppia installata sul dispositivo HDW ha registrato una temperatura costante del manto stradale di circa 30 °C, dato successivamente utilizzato per l'elaborazione dei calcoli inversi (*back-calculation*) tramite il software BAKFAA reso disponibile dalla *Federal Aviation Administration*. I risultati ottenuti in situ hanno mostrato un'ottima correlazione con i moduli determinati in laboratorio, confermando gli elevati valori di modulo della pavimentazione ottenibili con l'aggiunta di PC. [27] L'analisi comparativa dei

dati ha dimostrato che l'aggiunta del composto polimerico garantisce prestazioni due volte migliori in termini di resistenza alla deformazione permanente (ormaiamento) rispetto a una miscela convenzionale, mantenendo allo stesso tempo un modulo di rigidezza paragonabile a quello ottenibile con un bitume più duro. Un aspetto rilevante risiede nella capacità del polimero di compensare la carenza di bitume puro nella miscela, consentendo un miglioramento del mix-design senza compromettere la resistenza alla fatica.

In conclusione, lo studio ha confermato l'efficacia del composto polimerico anche dal punto di vista economico e ambientale. L'impiego di un bitume 50/70, facilmente reperibile sul mercato italiano, comporta una significativa riduzione dei costi di approvvigionamento: il costo del legante impiegato nella miscela è circa la metà del legante ad alto modulo (EME) e circa il 55-60% del bitume modificato tradizionale (sia tenero che duro). Poiché il composto polimerico viene utilizzato in quantità ridotte, la tecnologia non richiede costosi interventi di adeguamento o modifiche degli impianti di produzione del conglomerato. Inoltre, il minor consumo di bitume vergine nella miscela e l'utilizzo di aggregati calcarei disponibili localmente, consentono di ridurre le emissioni legate ai trasporti dei materiali in cantiere, garantendo benefici sia economici che ambientali. [27]

5.2 Applicazione di plastiche riciclate in ambito stradale canadese

5.2.1 Inquadramento dell'intervento e obiettivi sperimentali

A seguito di precedenti studi di laboratorio finalizzati a valutare l'influenza della plastica riciclata sulle prestazioni delle miscele bituminose condotti da Ma et al. 2022 e Ma and Hesp 2022b, nell'autunno del 2022, è stata realizzata una sperimentazione su scala reale mediante la costruzione di un tratto stradale pilota presso la Newtonville Road, in Ontario, Canada.

L'obiettivo principale dello studio è stato verificare l'effettiva efficacia dell'impiego di rifiuti plastici riciclati nelle pavimentazioni bituminose in condizioni operative reali, con particolare attenzione alle applicazioni in regioni caratterizzate da clima freddo. La sperimentazione è stata inoltre sviluppata per confrontare i risultati ottenuti in laboratorio con il comportamento della pa-

vimentazione direttamente in sito, per superare le incertezze di valutazione basate esclusivamente su prove sperimentali di laboratorio.

5.2.2 Materiali impiegati e metodologia sperimentale

La sezione sperimentale comprende cinque differenti configurazioni di pavimentazione identificate da S0 a S4, progettate per confrontare il comportamento delle diverse miscele modificate e valutarne le prestazioni meccaniche nel tempo. La struttura a due strati è composta da uno strato di usura superficiale di 50 mm con granulometria HL-3 e uno strato di collegamento (*binder*) di 60 mm con granulometria HL-8. La modifica delle miscele bituminose è stata effettuata utilizzando plastiche riciclate miste e fibre di PET della lunghezza di 18 mm, impiegate sia nello strato superficiale sia nello strato di collegamento al fine di valutare il comportamento dei due differenti modificatori. [15]

Successivamente alla costruzione della pavimentazione, sono stati estratti campioni cilindrici mediante carotaggio direttamente dalle banchine di ciascuna sezione di prova. I campioni ottenuti, comprendenti entrambi gli strati della pavimentazione, sono stati separati all'interfaccia tra strato di usura e binder e successivamente rifilati per consentire l'esecuzione delle prove sperimentali previste. Per valutare le prestazioni meccaniche sono stati eseguiti test di laboratorio differenti. La resistenza alla deformazione permanente è stata analizzata mediante l'*Hamburg Wheel Tracking* (HWT) test, mentre la resistenza alla fessurazione è stata studiata tramite *Semi-Circular Bending* (SCB) test. Parallelamente, una parte delle miscele sciolte raccolte durante la costruzione è stata sottoposta a invecchiamento accelerato in forno a 140 °C per 16 ore, simulando l'invecchiamento a lungo termine al fine di confrontare il comportamento meccanico del materiale dopo il progressivo irrigidimento del legante. [15]

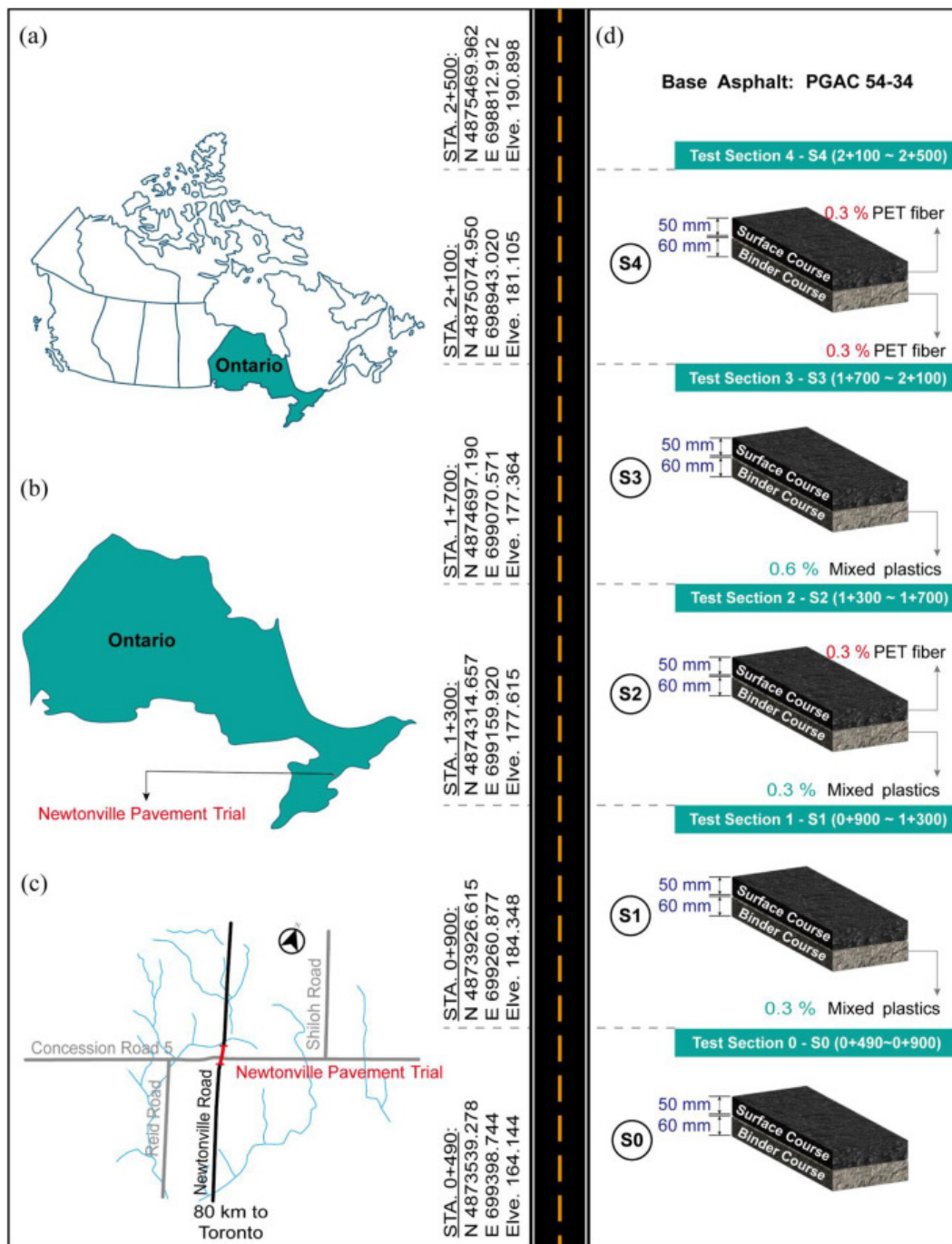


Figura 5.2: Dettagli della sezione di prova di Newtonville Road: (a) inquadramento geografico dell'Ontario; (b) localizzazione del sito d'intervento; (c) planimetria generale dell'area; (d) schema geometrico e strutturale dei lotti sperimentali. [15]

5.2.3 Valutazione delle prestazioni e risultati sperimentali

I risultati sperimentali hanno evidenziato comportamenti differenti tra plastiche miste riciclate e fibre di PET in funzione della temperatura e della granulometria della miscela bituminosa.

Per quanto riguarda la resistenza all'ormaiamento, valutata mediante prova HWT, a 30 °C sia la plastica sia la fibra hanno mostrato effetti negativi nelle miscele a granulometria grossolana utilizzate nello strato binder, mentre la fibra di PET ha prodotto effetti positivi nelle miscele a granulometria fine dello strato superficiale. A temperature più elevate, pari a 40 °C, la plastica mista ha migliorato in modo significativo la resistenza all'ormaiamento delle miscele a granulometria HL-8, con prestazioni crescenti all'aumentare del contenuto di plastica. A 50 °C questo effetto è risultato ancora più evidente, mentre la fibra di PET ha mostrato maggiore efficacia nelle miscele a granulometria fine. [15] Per quanto riguarda la resistenza alla fessurazione, i risultati delle prove SCB hanno mostrato che la fibra di PET risulta generalmente più efficace rispetto alla plastica mista sia nelle miscele a granulometria grossolana sia in quelle a granulometria fine. In particolare, la fibra ha mostrato una maggiore capacità di migliorare la resistenza alla propagazione delle fessure nello strato superficiale, agendo principalmente nel rallentare la crescita della fessura piuttosto che impedirne l'innescio iniziale. A basse temperature hanno evidenziato un generale irrigidimento delle miscele bituminose accompagnato da una lieve diminuzione contenuta della resistenza alla fessurazione. Successivamente all'invecchiamento accelerato in forno, tutte le miscele hanno mostrato una riduzione della resistenza alla fessurazione dovuta all'ulteriore irrigidimento del bitume. Anche in queste condizioni, la fibra di PET ha continuato a mostrare prestazioni superiori rispetto alla plastica mista. [15]

Nel complesso, i risultati dello studio hanno evidenziato che il comportamento delle miscele modificate dipende fortemente dalla tipologia di plastica utilizzata, dal contenuto del modificatore, dalla granulometria della miscela e dalle condizioni di temperatura, confermando la possibilità di impiegare materiali plastici riciclati nelle pavimentazioni stradali mantenendo adeguate prestazioni meccaniche.

Conclusioni

L'analisi condotta nel presente elaborato ha evidenziato come le innovazioni nel riciclaggio dei materiali stradali rappresenti oggi una delle principali strategie per rendere il settore delle infrastrutture viarie maggiormente sostenibile sotto il profilo ambientale ed economico. La crescente necessità di ridurre il consumo di materie prime non rinnovabili, limitare la produzione di rifiuti e contenere i costi legati alla manutenzione delle pavimentazioni ha infatti reso il recupero dei materiali esistenti un elemento sempre più centrale nella progettazione e gestione delle opere stradali.

Nel corso della trattazione è emerso come le tradizionali tecniche di riciclaggio, pur costituendo una soluzione ormai consolidata nel settore, presentino ancora limitazioni legate principalmente alla variabilità dei materiali recuperati, al progressivo invecchiamento del legante bituminoso e alle difficoltà nel garantire prestazioni meccaniche adeguate nelle miscele contenenti elevate percentuali di materiale riciclato. Proprio per superare tali criticità, negli ultimi anni la ricerca scientifica ha concentrato gli studi nello sviluppo di nuove tecnologie e materiali innovativi finalizzati a migliorare l'efficienza dei processi di riciclaggio e ad aumentare le prestazioni delle pavimentazioni realizzate con materiali di recupero.

Particolare rilevanza assumono in questo ambito lo sviluppo di additivi rigeneranti a base biologica, l'impiego di bitumi modificati, l'introduzione di materiali alternativi derivanti da scarti industriali o biomasse e l'evoluzione delle tecnologie di produzione a bassa temperatura e auto-rigenerative, che permettono di ridurre il consumo energetico dei processi produttivi, limitare l'utilizzo di materie prime vergini e valorizzare il riutilizzo degli scarti industriali, contribuendo così ad alleggerire il carico sulle discariche e a diminuire l'impatto ambientale complessivo associato al ciclo di vita delle infrastrutture stradali. Dagli studi analizzati è emerso come tali soluzioni consentano non solo di aumentare significativamente le percentuali di materiale riciclato impiegabile nelle miscele bituminose, ma anche di migliorare diverse prestazioni delle

pavimentazioni, tra cui la resistenza alla fatica, la resistenza all'ormaiamento, la durabilità, la stabilità termica e il comportamento all'invecchiamento del legante. I casi studio analizzati confermano inoltre come molte di queste soluzioni non rappresentino più esclusivamente un ambito di ricerca sperimentale, ma trovino già concrete applicazioni in diversi contesti infrastrutturali reali. Nonostante i progressi tecnologici raggiunti, permane tuttavia la necessità di affrontare alcune criticità ancora presenti, tra cui la standardizzazione delle procedure di controllo del materiale riciclato, la compatibilità tra materiali innovativi e leganti tradizionali, i costi iniziali di implementazione di nuove tecnologie e la presenza di normative tecniche che in alcuni contesti limitano una diffusione più ampia di queste soluzioni.

In conclusione, il futuro delle pavimentazioni stradali appare sempre più orientato verso modelli di gestione fondati sul recupero delle risorse, sull'innovazione tecnologica e sull'applicazione dei principi dell'economia circolare. In tale prospettiva, il continuo sviluppo delle tecnologie di riciclaggio rappresenterà un elemento fondamentale per conciliare le esigenze prestazionali delle infrastrutture con la crescente necessità di garantire una gestione più sostenibile delle risorse disponibili.

Bibliografia

- [1] G. Giacomello, " *Dispense del corso di Progetto di Strade, Ferrovie e Aeroporti*," Università degli Studi di Padova, 2023.
- [2] Futura Conglomerati, " *La Pavimentazione Stradale: i suoi 5 strati*," 2026. Available: <https://futuraconglomerati.it/la-pavimentazione-stradale/>. [Consultato: aprile 2026].
- [3] B. G. Famewo and M. Shokouhian, " *A Review of Pavement Performance Deterioration Modeling: Influencing Factors and Techniques*," *Symmetry*, vol. 17, no. 11, p. 1992, 2025.
- [4] Pavement Interactive, " *Pavement Distresses*," 2026. Available: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/>. [Consultato: aprile 2026].
- [5] X. Chen, Q. Li, T. Sesay, Q. You, and E. B. Chineche, " *Valorization of recycled wastes in pavement preventive maintenance: A review on reclaimed asphalt pavement and recycled waste tire*," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, 2024.
- [6] SITEB, Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, " *Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali*." Available: https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/3500_2.pdf. [Consultato: aprile 2026].
- [7] Wirtgen Group, " *Riciclaggio a caldo*." Available: <https://www.wirtgen-group.com/it-it/applicazioni/costruzione-stradale/ripristino-stradale/riciclaggio-a-caldo/>. [Consultato: aprile 2026].

- [8] I. H. Naser, "A review of RAP and its use in pavement engineering," *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 7, no. 1, pp. 073–084, 2021.
- [9] M. H. Hassanjani, M. Arabani, F. M. Nejad, and M. A. Jadehkenari, "A novel approach to reduce acid value of waste edible oil using nano calcium oxide and its effect on asphalt moisture susceptibility," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 23, 2025.
- [10] M. Fei et al., "Palm oil-derived rejuvenator for recycled asphalt binders and mixtures: Molecular simulation and performance evaluation," *Industrial Crops and Products*, vol. 242, 2026.
- [11] Sogeam, "Il biochar come prodotto chiave nell'industria circolare," 2026. Available: <https://www.sogeam.it/il-biochar-prodotto-chiave-nellindustria-circolare/>. [Consultato: giugno 2026].
- [12] J. Zhou et al., "Utilization of biochar derived from rice straw in petroleum bitumen: Agricultural waste recycling and pavement sustainability," *Journal of Cleaner Production*, vol. 490, 2025.
- [13] E. Kamratowsky et al., "Technical performance of lignin-modified bitumen and organic bitumen as binders for asphalt considering environmental criteria," *Construction and Building Materials*, vol. 506, 2026.
- [14] C. Carpani, E. Bocci, G. Marchegiani, and D. Moliterni, "Asphalt concretes including bitumen modified with compounds based on crumb rubber from waste tires: A laboratory and field study," *Construction and Building Materials*, vol. 506, 2026.
- [15] J. Ma, H. Yuan, H. M. C. Nawarathna, and S. A. M. Hesp, "Sustainable application of recycled plastics in asphalt pavement: case study of a trial in Newtonville, Ontario, Canada," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 52, no. 5, 2024.
- [16] J. Xu, S. Zhang, Z. Chen, X. Feng, F. Zou, and Z. Leng, "From performance to environmental benefits: recycling solid waste for low-carbon pavements," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 157, 2026.
- [17] S. K. Shah et al., "Plastic-Waste-Modified Asphalt for Sustainable Road Infrastructure: A Comprehensive Review," 2025.

-
- [18] X. Deng, Z. Cao, W. He, G. V. Vidal, C. Jiang, and F. Xiao, "*Hierarchical applications of brick-concrete construction and demolition waste: From concrete/mortar to pavement engineering and pollutant adsorption*," Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), vol. 13, no. 2, 2026.
- [19] X. Wen et al., "*Converting low-quality construction waste into tough pavement material via biomimetic mineralization*," Chemical Engineering Journal, vol. 536, 2026.
- [20] N. Thanasisathit, S. Lhajai, P. Jongpradist, and P. Jamsawang, "*Recycling bottom ash in cement-stabilized pavement materials: Mechanical performance and environmental feasibility*," Case Studies in Construction Materials, vol. 22, 2025.
- [21] S. Jain, "*A state-of-the-art review on warm mix asphalt with recycled asphalt: Sustainable approach to utilize high RAP contents*," Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2026.
- [22] A. Iturriaga and F. Morea, "*Performance study of Warm Asphalt Mixtures (WAM) made with recycled modified asphalt pavement*," Construction and Building Materials, vol. 517, 2026.
- [23] M. Boutgoulla et al., "*Assessment of induced-healing maintenance for cold-recycled asphalt concretes using microwave heating and re-compaction*," Construction and Building Materials, vol. 518, 2026.
- [24] G. Xu, M. Du, Z. Shen, F. Yang, and C. Han, "*RAP variability intelligent control framework for hot in-plant recycling of asphalt pavement*," Results in Engineering, vol. 26, 2025.
- [25] EAPA, "*What is Asphalt 4.0*," 2026. Available: <https://eapa.org/asphalt-40/>. [Consultato: giugno 2026].
- [26] A. Milad et al., "*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, vol. 19, 2022.
- [27] C. Celauro, G. Bosurgi, G. Sollazzo, and M. Ranieri, "Laboratory and in-situ tests for estimating improvements in asphalt concrete with the

addition of an LDPE and EVA polymeric compound,” *Construction and Building Materials*, vol. 196, pp. 714–726, 2019.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Giovanni Giacomello, relatore di questo elaborato, per la disponibilità e la costante attenzione con cui mi ha seguita durante lo sviluppo di questo lavoro, rispondendo sempre con rapidità e gentilezza a ogni mia domanda.

Un ringraziamento speciale va ad Alex, che in questi ultimi anni è stato il mio punto di riferimento. La tua presenza mi ha aiutata a guardare con maggiore determinazione al traguardo finale. Grazie per essermi stato accanto in ogni momento di difficoltà, per aver sostenuto le mie ansie, alleggerito i periodi più difficili e ricordarmi, quando io facevo fatica a farlo, che sarei stata in grado di arrivare fino in fondo.

Ringrazio i miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di affrontare questo percorso con serenità, sostenendomi anche concretamente. Li ringrazio soprattutto per aver rispettato i miei tempi, senza pressioni o aspettative, anche quando il mio percorso universitario ha richiesto più tempo del previsto.

Un pensiero importante va poi ai miei compagni di corso, in particolare voglio ringraziare Anita, compagna di questo lungo percorso, con cui ho condiviso esami, pomeriggi interi di studio in videochiamata, ma anche pause pranzo con i buonissimi ravioli cinesi della signora al Portello. Senza il sostegno reciproco, molti momenti sarebbero stati decisamente più difficili.

Ringrazio tutta la mia famiglia, che in questi anni mi ha sempre incoraggiata a continuare, ricordandomi il valore di questo traguardo. Essere diventata la prima donna ingegnere dell'intera famiglia rappresenta per me un motivo di grande orgoglio.

Infine, vorrei ringraziare me stessa, per aver continuato ad andare avanti nonostante le difficoltà incontrate durante questo percorso. Sebbene non sia stato lineare, forse è proprio per questo che oggi questo traguardo per me ha un significato ancora più grande.