

Il progetto

L'autostrada A4 TO-MI viaggia verso la sostenibilità

La realizzazione del primo tratto pilota di una pavimentazione sicura e sostenibile ad alte percentuali di materiali recuperati, elevata vita utile e minore manutenzione - Smart Road

Introduzione

Il Green Deal Europeo (EGD) ha come obiettivo il raggiungimento delle emissioni zero entro il 2050: l'economia europea non dovrà più immettere nell'atmosfera una sola tonnellata di gas serra e dovrà compensare ogni quantità emessa con una pari quantità assorbita da biomassa o da altri sistemi. Sebbene questo sia l'obiettivo finale, ne esiste anche uno intermedio per il 2030, data entro la quale le emissioni dovranno essere ridotte del 55% rispetto ai livelli del 1990. I pacchetti legislativi "FIT for 55" definiscono con precisione le azioni da intraprendere. L'EGD presenta una tabella di marcia che mira a promuovere l'uso efficiente delle risorse, attraverso l'adozione di un'economia pulita e circolare, cercando di ridurre l'inquinamento, di fermare il cambiamento climatico dovuto alle azioni antropiche e d'invertire la tendenza inerente alla perdita di biodiversità. Le azioni dell'EGD ricadono chiaramente anche sul settore dei trasporti e stabiliscono nuovi requisiti per rendere le infrastrutture stradali più sicure, durevoli, affidabili, riutilizzabili, riparabili, rinnovabili, riciclabili ed efficienti dal punto di vista energetico e delle risorse. Infatti, le infrastrutture e le pavimentazioni stradali sono obiettivi molto sfidanti dal punto di vista della sostenibilità perché la costruzione e la manutenzione richiedono grandi quantità di materiali non rinnovabili e generano significativi consumi energetici ed emissioni in ambiente. Uno dei capisaldi per lo sviluppo delle infrastrutture viarie è quindi il passaggio all'"eco-progettazione" che implica:

- allungamento del ciclo di vita/servizio;
- riduzione dell'impatto ambientale dei prodotti durante tutto il loro ciclo di vita/servizio (Zero Pollution Action Plan);
- garanzia che i prodotti siano adatti a un'economia circolare (riciclabilità a fine vita utile) e climaticamente neutri;
- prevenzione nei confronti di sprechi e incentivi per il recupero di materia;

- richiesta di un assorbimento minimo dei materiali riciclati.

Il progetto europeo New Road Construction Concept - NR2C (European Commission, 09-05-23) ha chiaramente mostrato che le tendenze tipiche della costruzione e manutenzione stradale devono essere:

- l'utilizzo di materiali di altissima qualità;
- l'istituzione di innovative tecniche di costruzione e manutenzione, convalidate da risultati scientifici aggiornati;
- la diminuzione dei costi del ciclo di vita (LCC) costruendo soluzioni di lunga durata con bassa necessità di manutenzione e riabilitazione e, di conseguenza, minimo disturbo al traffico.

In dettaglio, alcuni dei principali obiettivi evidenziati nello sviluppo di nuovi concetti per la strada del futuro sono:

- Infrastrutture affidabili: i costi iniziali delle infrastrutture non sono l'unico fattore dominante, ma devono essere inclusi i costi di manutenzione e le perdite economiche dovute agli ingorghi causati dai lavori di manutenzione. Un'infrastruttura durevole e con bassa manutenzione è sinonimo di affidabilità. Un punto focale è la necessità di sviluppare e/o utilizzare nuovi materiali e prodotti per sopportare i crescenti carichi di traffico e l'incremento delle temperature.
- Infrastrutture verdi: in funzione delle elevate quantità di materiali da costruzione necessari per la realizzazione delle infrastrutture viarie, un importante contributo riguarda il risparmio delle risorse naturali non rinnovabili. I lavori di manutenzione e ricostruzione generano un'enorme quantità di materiale da demolizione che deve essere riciclato. Il riutilizzo completo di questi materiali rappresenta la prima sfida.
- Infrastrutture sicure e intelligenti: ottenute attraverso una progettazione innovativa, utiliz-

Ing. Michele Mori,
Direttore Tecnico,
SINA

Dott. Lorenzo Nicolini,
Responsabile
Area Monitoraggi
Ambientali, SINA

PhD. Ing. Loretta Venturini, Direttore
Scientifico e dello
Sviluppo Strategico,
Iterchimica S.p.A.

zando procedure avanzate, tecnologie e materiali di nuova generazione.

È ormai noto che, la migliore pavimentazione stradale si ottiene combinando durabilità, efficienza economica, ecoefficienza e prestazioni elevate (H. Wang & R. Gangaram, 2014).

In tale contesto e considerando la propria mission, la Società concessionaria ASTM S.p.A. (secondo concessionario autostradale al mondo con un network di circa 6.200 chilometri di rete in gestione in Italia, Brasile attraverso EcoRodovias e Regno Unito) sta operando, ormai da diversi anni, per raggiungere gli obiettivi sopra indicati. SATAP S.p.A. (Società autostradale che gestisce in regime di concessione le tratte autostradali Torino-Milano e Torino-Piacenza per conto di ASTM) ha infatti presentato un piano economico finanziario per il periodo 2023-2026 ("EFP 2023-26") con l'obiettivo di trasformare l'Autostrada A4 Torino-Milano in un'infrastruttura Smart Road. Tra i principali obiettivi si annoverano: l'introduzione di un sistema di recupero delle acque, la realizzazione di stazioni di ricarica elettrica rapide e l'utilizzo di conglomerati bituminosi innovativi a basso impatto ambientale. In collaborazione con Iterchimica S.p.A. (realtà italiana, leader nella messa a punto di prodotti high-tech per asfalti e tecnologie a ridotto impatto ambientale), impiegando apposite tecnologie e prodotti, è stato possibile riutilizzare il 70% dell'asfalto derivante dalla demolizione della vecchia pavimentazione (granulato di conglomerato bituminoso - RAP) e, attraverso la modifica strutturale con supermodificante composto da plastiche selezionate riciclate e additivate con grafene, è stato inoltre possibile incrementare la vita utile della pavimentazione (+75%) rispetto alla tecnologia tradizionalmente utilizzata, riducendo di conseguenza le future manutenzioni. Tale progetto permette di ridurre l'uso di materie prime non rinnovabili, il consumo energetico e le emissioni in ambiente. Il primo tratto di pavimentazione sostenibile è stato realizzato a fine 2022 ed è attualmente in fase di monitoraggio dal punto di vista prestazionale.

Strumenti per valutare la sostenibilità

La capacità da parte della biosfera di assorbire gli effetti delle attività antropiche non è illimitata. Ormai è diventato necessario soddisfare i bisogni della nostra generazione, ma è importante agire per fare in modo che anche le prossime generazioni possano soddisfare i propri bisogni. Tale concetto si traduce in un unico termine: "sostenibilità". Menzionati per la prima volta nel Rapporto Brundtland del 1987 e tuttora definiti nella Dichiarazione del Millennio delle Nazioni Unite, i

tre pilastri fondamentali per lo sviluppo del futuro sono: Sostenibilità Ambientale, Economica e Sociale. Strettamente collegati tra loro, si riferiscono reciprocamente alla capacità di:

- preservare le risorse naturali e i sistemi ecologici nel lungo termine, garantendo la loro rigenerazione e mantenendo un equilibrio tra le esigenze umane e l'ambiente (uso intelligente delle risorse e consumo responsabile, evitando sprechi e sfruttamenti intensivi, utilizzo dell'economia circolare, garanzia della biodiversità, protezione degli ecosistemi più sensibili, mitigazione dei cambiamenti climatici, efficienza e transizione energetica);
- creare e garantire una società imparziale, giusta ed inclusiva, attraverso interventi legali, politiche sociali, di informazione e di comunicazione, coinvolgendo anche attivamente la popolazione e le diverse società e comunità;
- generare un sistema per cui le attività sono condotte in modo tale da preservare e promuovere il benessere economico a lungo termine, la diversificazione economica, l'innovazione, l'uso efficiente delle risorse, la promozione dell'occupazione dignitosa e la riduzione della povertà. In pratica, l'obiettivo è mirare a creare un equilibrio tra crescita economica, efficienza delle risorse, equità sociale e stabilità finanziaria.

Nel corso degli anni sono stati studiati e promossi molti strumenti per valutare gli impatti ambientali e già alla fine degli anni '60 venivano analizzate le emissioni terrestri, atmosferiche e idriche, e successivamente anche energia, uso delle risorse ed emissioni chimiche (T. E. Tisberger Ibañez, 2020). Sebbene l'impatto ambientale oggi giorno possa essere determinato con diversi metodi, l'analisi del ciclo di vita (LCA - Life Cycle Assessment) nel campo delle infrastrutture viarie si è rivelata lo strumento più appropriato poiché permette di qualificare, quantificare e confrontare le ripercussioni indotte (B. G. Gouveia, M. Donato, & M. A. Vieira da Silva, 2022) (R. Liu, B. W. Smartz, & B. Descheneaux, 2014), oltre che a consentire di sviluppare ed implementare un progetto riducendo al minimo gli impatti negativi sull'ambiente per l'intero ciclo di vita, compresi quelli che si verificano lungo tutta la catena di fornitura.

Le norme di riferimento emesse dall'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione fanno riferimento alla serie ISO 14040 e permettono di:

- identificare le opportunità per migliorare le prestazioni ambientali dei processi produttivi e dei prodotti;
- guidare i diversi decisori di aziende, industrie, organizzazioni governative e non, verso una

- pianificazione strategica, la definizione delle priorità, la progettazione di prodotti, processi e servizi sempre più sostenibili (riduzione dei consumi energetici, delle emissioni in ambiente e dei consumi di materiali non rinnovabili);
- identificare, selezionare ed evidenziare gli indicatori di prestazione ambientale più importanti per il contesto di riferimento e scoprire quali impatti siano più significativi durante il ciclo di vita;
 - sviluppare il corretto marketing, anche attraverso l'implementazione di un sistema di etichettatura ecologica (eco-labeling) o produzione di una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD).

LCA comparative sono utilizzate per confrontare le prestazioni tecnico-ambientali di pavimentazioni potenzialmente realizzabili con tecnologie e materiali da costruzione differenti, anche di primo utilizzo o riciclati (W. S. Alaloul, M. Altaf, M. A. Musarat, M. F. Javed, & A. Mosavi, 2021). Esistono tre diversi approcci (N. Santero, E. Masanet, & A. Horvath, 2010) (T. E. Tisberger Ibañez, 2020) per condurre un'analisi:

1. LCA di processo (Process LCA) - quantifica i dati di ingresso (consumi di materiali ed energetici) e le emissioni in uscita di ciascun processo, all'interno del confine del sistema e del

ciclo di vita. Questo metodo (dal basso verso l'alto) affonda le sue radici negli approcci supportati e perfezionati dalla Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) e dall'Environmental Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti. Poiché ogni processo che comprende il ciclo di vita del prodotto è esaminato in modo puntuale, i risultati sono molto specifici per il prodotto/progetto/servizio in esame.

2. LCA Ingresso-Uscita (IO-LCA) - è una metodologia top-down che si basa sull'approccio economico input-output (IO) sviluppato da Wassily Leontief nel 1936. Esso include nell'analisi tutti i settori di un'economia, identificando i flussi di beni e servizi tra i distinti settori. Il metodo è accoppiato con dati ambientali a livello di settore per generare stime degli oneri ambientali a livello economico associati alla produzione di un determinato prodotto/progetto/servizio.
3. LCA ibrida (Hybrid LCA) - combina gli approcci LCA di processo e IO-LCA. Tendenzialmente, l'IO-LCA è utilizzato per colmare le informazioni mancanti durante il calcolo della LCA di processo. Ovvero, la LCA di processo è utilizzata per analizzare i processi più diretti e influenti, mentre si utilizza l'IO-LCA per i processi indiretti a monte. Ciò sfrutta i principali

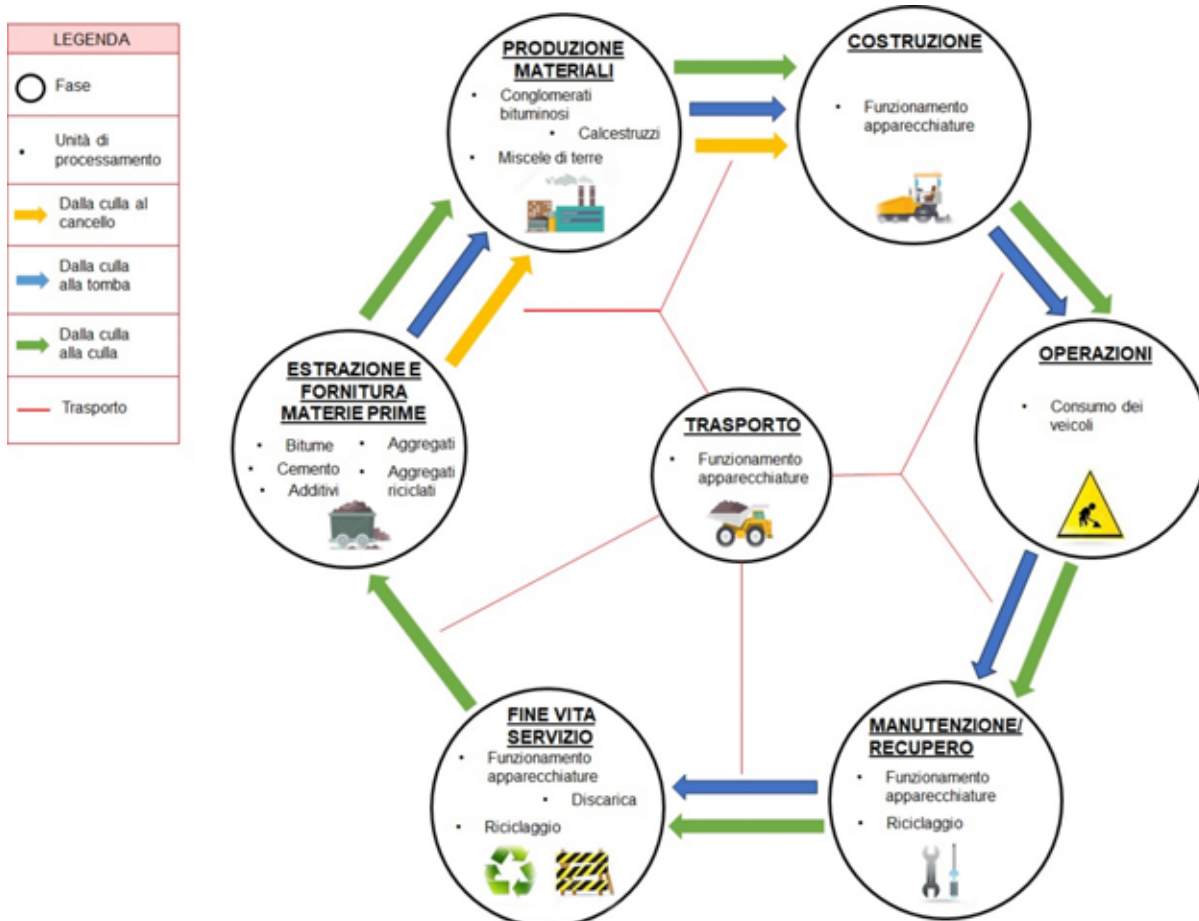


Fig.1. Verifica degli impatti ambientali per una pavimentazione stradale.

punti di forza del processo LCA (specificità) e IO-LCA (completezza), riducendo al minimo l'impatto degli errori di troncamento e aggregazione che si verificano quando si utilizzano i due approcci in modo indipendente.

Tutti i sistemi di riferimento (es. pavimentazione stradale) hanno dei confini di sistema, diverse fasi del ciclo di vita (es. costruzione, manutenzione e demolizione), processi unitari e flussi (es. acquisti materie prime, produzione dei materiali, lavorazioni). In generale, per le infrastrutture stradali si fa riferimento in successione a:

- acquisto di materie prime
- input e output nella sequenza di produzione
- trasporti
- utilizzo di combustibili, energia elettrica e calore
- utilizzo e manutenzione
- smaltimento degli scarti e dei prodotti di processo
- recupero di materie prime seconde (riutilizzo, riciclaggio e recupero energetico)
- costruzione, manutenzione e demolizione
- operazioni aggiuntive come l'illuminazione.

Con riferimento al progetto in fase di analisi, se non sono incluse tutte le fasi del ciclo di vita e/o non sono considerati tutti gli indicatori ambientali appropriati, allora le politiche, i regolamenti e le scelte di ridurre gli impatti ambientali del sistema potrebbero comportare conseguenze negative (Federal Highway Administration, 2014). I metodi di verifica degli impatti ambientali possono avvenire sostanzialmente in tre modi (Fig.

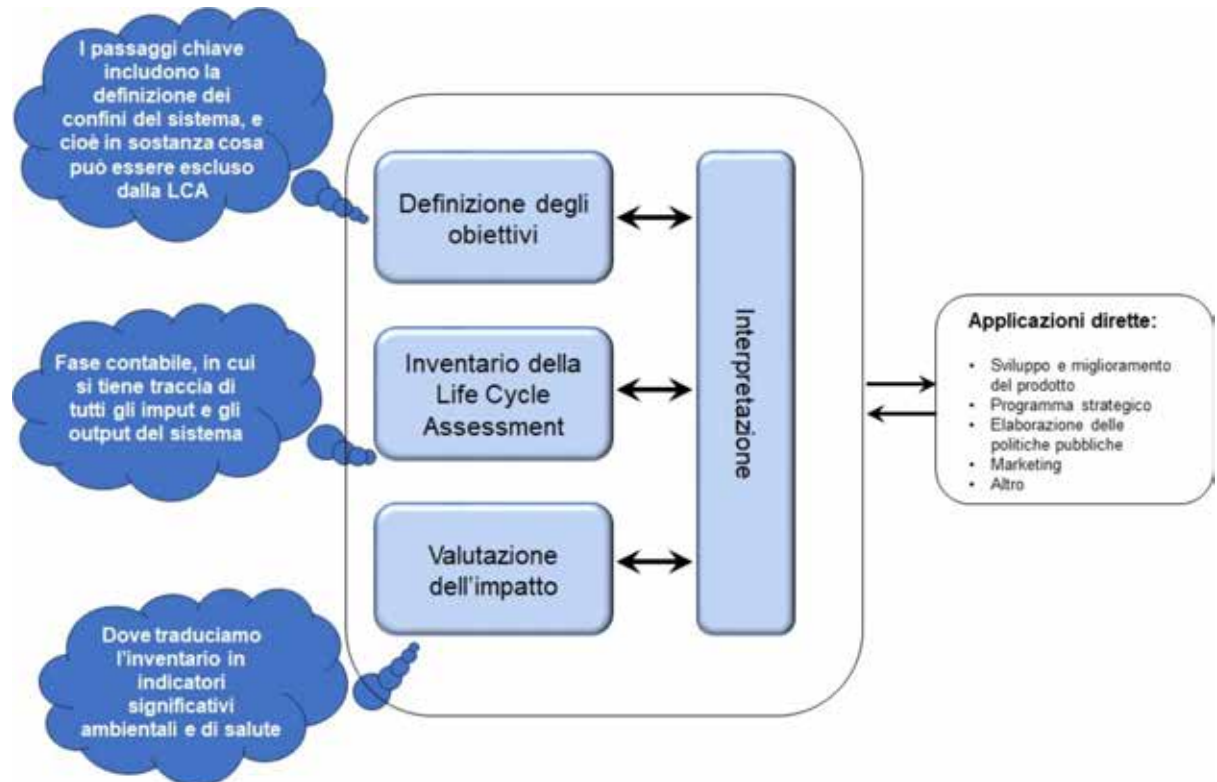
1) (B. G. Gouveia, M. Donato, & M. A. Vieira da Silva, 2022):

1. dalla culla al cancello (cradle to gate), quando sono considerate le fasi di estrazione e lavorazione delle materie prime, i trasporti e la produzione. Esempio tipico è la produzione dei conglomerati bituminosi;
2. dalla culla alla tomba (cradle to grave), quando a quelle di cui al punto (1) sono sommate le fasi di utilizzo/esercizio, di manutenzione e demolizione a fine vita, senza considerare il riciclaggio dei materiali di risulta. Esempio è la pavimentazione stradale sino alla sua demolizione.
3. Dalla culla alla culla (cradle to cradle), quando a quelle di cui al punto (2) sono verificate e sommate le fasi del riciclo dei materiali da risulta. Esempio è la pavimentazione stradale che dopo la demolizione è riciclata nella costruzione di quella nuova (soluzione sollecitata dalle politiche europee sulla sostenibilità, significa che non basta riciclare, ma a fine vita utile il materiale di risulta deve essere riciclabile nuovamente).

Lo studio LCA è composto da quattro fasi (Fig. 2): 1 - definizione degli obiettivi e del campo di applicazione; 2 - analisi dell'inventario; 3 - valutazione dell'impatto; 4 - interpretativa.

Il primo passo per una corretta LCA è la definizione dell'obiettivo e dell'ambito in cui ricade il progetto (Goal and Scope Definition). Gli obiettivi vi possono differire in funzione dei diversi Gesto-

Fig.2. Strategie per la verifica della sostenibilità (14040, 2006) (Federal Highway Administration, 2014).



ri e dei loro target ambientali generali, delle politiche (non solo Europee ma anche locali), delle leggi e dei regolamenti in vigore. In questa fase sono anche identificati i confini del sistema e l'unità funzionale di riferimento. Successivamente si passa all'analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI, Inventory analysis), schematizzato con un diagramma di flusso, in cui sono identificati e tracciati i flussi ambientali (input di materiali ed energia; output in emissioni in ambiente e rifiuti) per il sistema studiato, attraverso la definizione di un modello di processo. Si passa quindi alla valutazione degli impatti (Impact assessment) sulle persone (esseri umani), sulla natura (ecosistemi) e sull'esaurimento delle risorse (14040, 2006). L'ultimo passo riguarda l'interpretazione e la valutazione dei risultati, al fine di trarre alcune conclusioni, formulare raccomandazioni o altrimenti aiutare nel processo decisionale per i progetti studiati (T. E. Tisberger Ibañez, 2020). I metodi di analisi delle categorie di impatto possono essere molteplici: quelli più utilizzati sono riportati nella tabella 1 (Federal Highway Administration, 2014).

Gruppo	Categorie d'impatto
Energia utilizzata	Carburante: <i>non rinnovabile, rinnovabile</i>
Risorse impiegate	Risorse: <i>non rinnovabili, rinnovabili</i>
Emissioni	Cambiamenti climatici Riduzione dello strato d'ozono Acidificazione Ozono troposferico Eutrofizzazione
Tossicità	Tossicità per l'uomo: <i>respiratoria, cancerogena, non cancerogena</i> Eco-tossicità: <i>acqua dolce, acqua marina, terreno</i>
Acqua	Utilizzo di acqua dolce
Rifiuti	Pericolosi, Non pericolosi

La progettazione della pavimentazione ha un ruolo fondamentale poiché determina i materiali da utilizzare, la struttura e il dimensionamento, i cicli manutentivi e la vita utile in funzione del traffico e delle condizioni ambientali. I confini del sistema delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso sono ben definiti e dipendono anche dal ciclo di vita. Bisogna ricordare che il valore delle pavimentazioni è enorme e, pertanto, è fondamentale considerare non solo il costo del capitale, ma anche i costi di gestione, manutenzione e smaltimento (W. S. Alaloul, M. Altaf, M. A. Musarat, M. F. Javed, & A. Mosavi, 2021). Le relative fasi devono comprendere (B. G. Gouveia, M. Donato, & M. A. Vieira da Silva, 2022):

- Estrazione, trasporto (materiali grezzi o fini-

ti tra le diverse sottofasi, influenzati principalmente da tecnologia e consumi, capacità di carico, distanze e velocità di trasporto), e produzione delle materie prime, ovvero dei materiali costituenti (bitume, aggregati, filler, granulato di conglomerato bituminoso e altri prodotti di aggiunta).

- Stoccaggio delle materie prime, produzione e stoccaggio del conglomerato bituminoso, compresi tutti i macchinari per la movimentazione delle materie prime, l'uso di acqua ed energia (influenzato dalle materie prime utilizzate, dal tipo di impianto di produzione, dal tipo di energia e dalle prestazioni finali della miscela).
- Trasporto della miscela bituminosa verso il cantiere.
- Costruzione (influenzata principalmente dalla tipologia di macchine utilizzate e loro capacità/consumi e dalle prestazioni che si vogliono ottenere), comprendendo la mobilitazione per il /dal cantiere, utilizzo di energia ed acqua.
- Utilizzo della pavimentazione (influenzato dalla tipologia di traffico, condizioni e caratteristiche dei veicoli, rugosità e macrotessitura, caratteristiche geometriche della strada, albedo e riflettanza, capacità di riscaldamento e conduttività termica).
- Manutenzione, ripristino e ricostruzione (influenzato dai cicli e dalle tecnologie utilizzate i cui impatti devono essere calcolati come i punti precedenti).
- Fine della vita utile, demolizione (dipende dalle macchine utilizzate), gestione dei materiali di risulta e riciclaggio della vecchia pavimentazione.

Progetto Smart Road dell'A4 TO-MI

Sviluppata dal Gruppo ASTM, la Smart Road dell'A4 TO-MI è stato il primo progetto autostradale al mondo studiato per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità basati sulla riduzione delle emissioni, scientificamente fondati e approvati dall'iniziativa Science Based Targets (SBT) e, quindi, in linea con l'accordo di Parigi per la riduzione delle emissioni di gas serra (GHG - Green House Gases).

Entro il 2030, gli obiettivi generali del Gruppo riguardano la riduzione del 25% delle proprie emissioni dirette e indirette (Scope 1 e 2) e del 13% delle emissioni indirette non possedute derivanti da beni e servizi acquistati da terzi (Scope 3). Il primo segnale verso tale cambiamento è stato il progetto "Innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica" nella manutenzione dell'autostrada A4 Torino-Milano, gestita dal Gruppo SATAP, facendo diventare una tratta iniziale di circa 30 chilometri un vero e proprio "Laboratorio Sperimentale" per verificare in scala

Tab. 1 Categorie di impatto mediamente analizzate (Federal Highway Administration, 2014).

reale il progetto, con lo scopo di adottare successivamente e in modo graduale l'innovativa strategia di manutenzione su tutti i 4.900 chilometri di pavimentazioni in concessione.

Con riferimento all'infrastruttura, ai sistemi di controllo, gestione e comunicazione, le principali macro-aree di intervento sono:

- Ambientale;
- Sicurezza stradale e assistenza alla guida;
- Monitoraggio e manutenzione dell'infrastruttura.

Concentrandosi nel dettaglio sulla pavimentazione in conglomerato bituminoso, lo scopo principale è stato quello di focalizzare l'attenzione sul riciclaggio di Granulato di Conglomerato Bituminoso (GCB, internazionalmente RAP - Reclaimed Asphalt Pavement) derivante dalla demolizione della vecchia pavimentazione, sull'incremento della vita utile e sulla riduzione della manutenzione (come oltretutto richiesto dalle strategie inerenti alla sostenibilità richieste dall'UE).

Il progetto della pavimentazione è stato studiato da SINA S.p.A. utilizzando come riferimento l'enorme banca dati derivante dai monitoraggi del comportamento della pavimentazione esistente, nel corso degli ultimi 50 anni, considerando la distribuzione e l'evoluzione dei volumi di traffico, sfruttando il know-how di progetti già realizzati con tecnologie alternative e in base a prove di laboratorio che hanno permesso di identificare le prestazioni dei nuovi CB (valori di input per il calcolo progettuale). Le analisi di LCA ed LCCA sono state invece condotte dall'Università di Bologna - DICAM.

A fine ottobre 2022 è stato realizzato il primo tratto di 2 chilometri per entrambe le carreggiate della A4 Torino-Milano ad oggi ancora in fase di monitoraggio.

Riciclaggio di GCB

In accordo alla norma vigente, il granulato di conglomerato bituminoso (GCB), comunemente noto come fresato, deriva principalmente dalla fresatura e/o scarifica degli strati legati a bitume delle pavimentazioni stradali a fine vita utile e, in minore quantità, da conglomerato bituminoso di scarto dovuto all'avvio e allo spegnimento degli impianti, dalle eccedenze produttive e da quello scartato per difetti nella ricetta o del processo produttivo.

Il GCB è costituito da aggregati lapidei o agglomerati di aggregati di varie dimensioni ricoperti da un film di bitume ossidato (invecchiato). Il processo di invecchiamento è graduale e avviene a causa del calore durante la produzione, lo stoccaggio del bitume, la fase di produzione dei CB e a causa della radiazione solare UV e dell'azione dell'acqua durante la vita utile della pavimenta-

zione. Esso consiste principalmente in una variazione delle componenti chimiche per cui i saturi rimangono indicativamente i medesimi, gli aromatici diminuiscono, le resine e gli asfalteni aumentano. Tale mutazione comporta un aumento della viscosità, un aumento della durezza e una riduzione del potere legante, con conseguente decremento delle proprietà fisico-meccaniche. Attualmente, attraverso l'utilizzo di prodotti appositamente studiati e formulati (rigeneranti) che hanno un'azione "ringiovanente", è possibile ripristinare le caratteristiche prestazionali del bitume invecchiato, ribilanciando la composizione chimica del legante (UNI 11837 - Criteri di qualificazione, controllo e impiego di additivi per miscele legate a bitume per la formazione di strati di sovrastrutture per infrastrutture di trasporto; Appendice B).

Il quantitativo di GCB recuperato dipende non solo dalle scelte progettuali, ma anche dagli impianti e dalle loro capacità e sistemi di produzione. I nuovi impianti, ad esempio quelli con doppio tamburo, permettono di recuperare anche oltre il 90% di GCB nelle nuove miscele bituminose.

Compound polimerici per la modifica strutturale dei CB e l'aumento della vita utile

Dal punto di vista prestazionale, è ormai noto che, in funzione delle condizioni ambientali e del traffico attuale, è spesso necessario l'utilizzo di CB modificati che consentono di aumentare la vita utile della pavimentazione. Oltre al tradizionale bitume modificato (PMB - Polymer Modified Bitumen - Metodo Dry), le modifiche strutturali con il metodo wet (compound polimerici - CP - aggiunti direttamente durante la fase di miscelazione del CB) sono sempre più utilizzate sia per le prestazioni ottenibili, sia perché tale tecnologia permette di modificare strutturalmente anche il GCB.

Il compound polimerico di ultima generazione chiamato Gipave® che permette di raggiungere elevate prestazioni, garantendo maggiore vita utile rispetto a quelli tradizionali, è composto da plastiche dure selezionate e riciclate (normalmente destinate a metodi di smaltimento meno sostenibili) e da grafene. Il prodotto è frutto di sei anni di ricerca all'interno del Progetto Ecopave. Oltre alla formulazione, una fase fondamentale della ricerca è stata caratterizzata dal monitoraggio delle emissioni in atmosfera e degli eluati dei CB modificati con Gipave®. I risultati ottenuti in laboratorio e direttamente in situ non hanno evidenziato alcun cambiamento significativo nelle emissioni pericolose (in produzione e in stesa). Inoltre, è stata verificata l'assenza dell'aumento di particelle fini e ultrafini, così come quella di particelle di aerosol

organico secondario, non comportando pertanto un aumento dell'inquinamento atmosferico. Sia per l'asfalto appena prodotto, sia per quello invecchiato in laboratorio, l'analisi degli eluati ha rivelato concentrazioni al di sotto dei limiti di soglia previsti dalla normativa in vigore, confermando l'emissione tipica degli asfalti. Dal punto di vista ecotossicologico (OECD 236-2013 - Fish Embryo acute Toxicity test, FET) è stato dimostrato che gli effetti sono trascurabili, sia per la vitalità sia per le malformazioni embrionali (Mantecca, Perucca, & Rizzi, 2022).

Il progetto Smart Road e l'analisi di impatto ambientale

Il progetto della nuova Smart Road dell'A4 TO-MI prevede la realizzazione di una pavimentazione sostenibile caratterizzata da elevate percentuali di GCB rigenerato (70% sul peso della miscela) per strati di base (10 cm) e binder (6 cm) e l'incremento della vita utile (+75% rispetto alla tradizionale pavimentazione in essere) grazie all'utilizzo del compound polimerico a base di grafene (Fig. 3). Sviluppata dall'Università di Bologna - DICAM, l'analisi di LCA è stata condotta in accordo alle norme ISO 14040-14044 modellando il sistema dalla culla al cancello (cradle to gate), utilizzando il software OpenLCA. Il database di riferimento è stato Ecoinvent v3.7.1 e sono stati utilizzati differenti metodi di valutazione degli impatti, ma quelli analizzati nel dettaglio sono i metodi ReCiPe endpoint (H) e IPCC2013 GWP 100a. Il primo metodo, ReCiPe endpoint (H), sintetizza i risultati nelle seguenti categorie d'impatto ambientale, opportunamente ponderate:

- danno alla salute umana (Damage to human health);
- danno all'ecosistema (Damage to ecosystems);

Strato	Contenuto bitume	Spessore	Densità	Frequenza di rifacimento
Drenante	5,00%	4 cm	2,3 t/m ³	5 anni
Binder	4,60%	6 cm		10 anni
Base	4,10%	10 cm		20 anni

Tab. 2. Strati della pavimentazione tradizionale dell'A4 TO-MI

Strato	N. di rifacimenti in 35 anni	N. di rifacimenti in 35 anni (incremento vita utile)
	30% GCB + PMB	70% GCB + TQ + Gipave®
Usura	7	7
Binder	3,5	2
Base	1,75	1

Tab. 3. Cicli manutentivi a parità di vita utile (Tradizionale vs Smart Road).

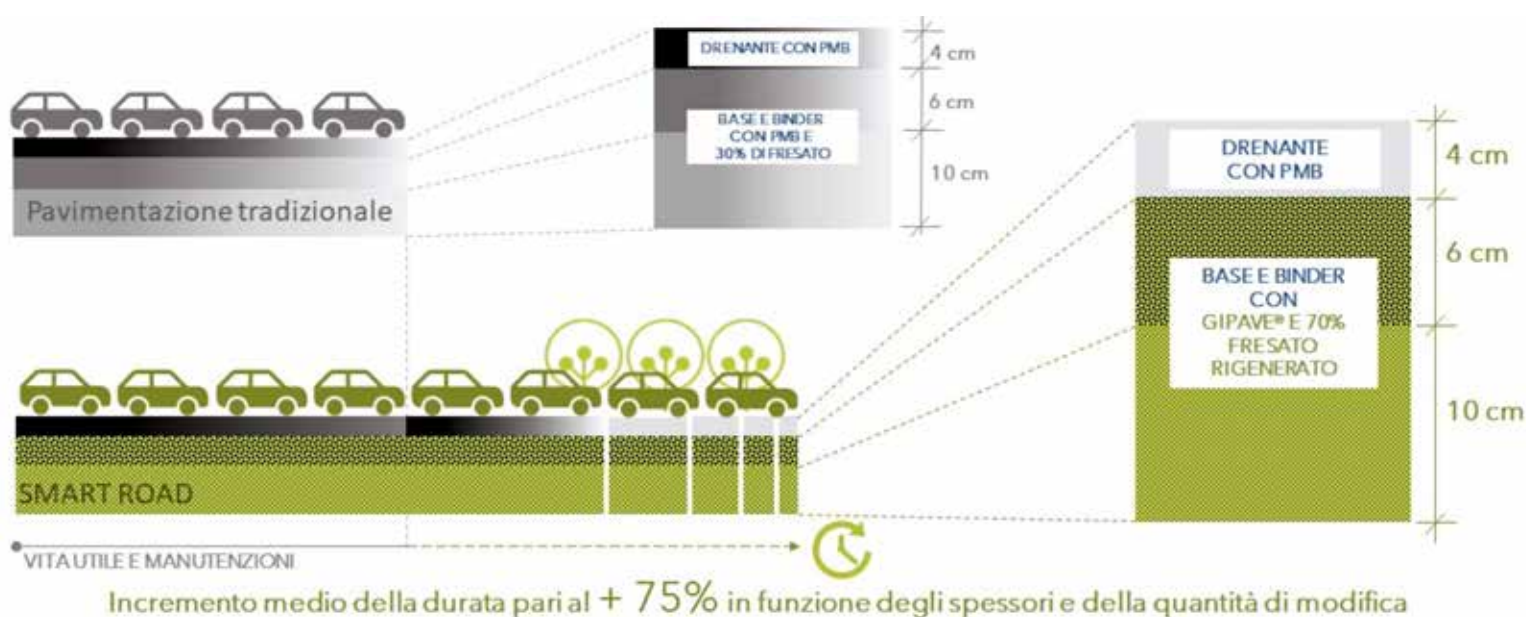
Input	Tipologia impianto	
	Discontinuo	Nuova generazione
Riscaldamento tamburo	Metano	Metano
Consumi combustibile fossile	3.5 m3/t	8 m3/t
Produzione oraria	120 t	240 t
Consumi elettrici	1.7 kWh/t	1.7 kWh/t
Trasporto inerti	100 km	100 km
Trasporto bitume	100 km	100 km
Trasporto RAP	65 km	65 km

- danno alla disponibilità delle risorse (Damage to resource availability).

Il secondo metodo, IPCC2013 GWP 100a, è stato sviluppato dal World Resources Institute (WRI) e dal World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ed è uno standard contabile delle emissioni di gas serra. Questo metodo esprime un indicatore in termini di chilogrammi di anidride carbonica equivalente (CO₂eq).

Tab. 4. Dati di input per la LCA.

Fig.3. La nuova Smart Road per l'Autostrada A4 TO-MI.



I risultati seguenti fanno riferimento ai materiali di primo utilizzo, ai prodotti di modifica, al rigenerante e al riciclaggio di GCB derivante dalla demolizione della pavimentazione in essere e i risultati del modello, pertanto, lo considerano come rifiuto evitato (Tabb. 2÷4).

Considerando 250 chilometri di corsia di marcia lenta, andata e ritorno, i principali risultati ottenuti evidenziano i seguenti benefici ambientali nell'arco di vita utile (pari a 35 anni):

- -30% di risparmio energetico (stimato in circa 90 milioni di kWh), pari al fabbisogno annuale di circa 30.000 famiglie;
- -38,5% di risparmio di emissioni di CO₂eq (pari a circa 18.350.000 kg) pari all'azione di assorbimento di circa 115.000 alberi;
- -40% di risparmio di bitume (pari a quasi 23 milioni di kg) e di aggregati (circa 480 milioni di kg);
- 1500 tonnellate di plastiche dure riutilizzate, evitandone la termovalorizzazione.

Conclusioni

La realizzazione e la manutenzione delle pavimentazioni stradali richiedono un'elevata quantità di materiali non rinnovabili (aggregati e bitume), generando consumi energetici ed emissioni molto importanti dal punto di vista ambientale. In conformità al Green Deal Europeo, la Società concessionaria ASTM e SATAP stanno lavorando per la realizzazione di Smart Road ormai da diversi anni. Dal punto di vista delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, il piano economico-finanziario per il periodo 2023-2026 ("EFP 2023-26") si pone infatti come obiettivo per l'Autostrada A4 Torino-Milano quello di allungarne il ciclo di vita, di ridurre l'impatto ambientale in generale e di riciclare il più alto quantitativo possibile di materiali, compresi quelli da demolizione delle vecchie pavimentazioni (GCB).

Il primo tratto di pavimentazione Smart è stato realizzato a fine 2022 ed è attualmente in fase di monitoraggio dal punto di vista prestazionale. Nel dettaglio, utilizzando tecnologie e prodotti di Iterchimica S.p.A., gli strati di base e di binder sono stati realizzati rigenerando con apposito prodotto GCB pari al 70% sul peso del CB e modificando la miscela con compound polimerico a base di grafene. In base alle miscele progettate da SINA S.p.A., tale modifica dry permette di incrementare del 75% la vita utile della sovrastruttura.

L'analisi LCA eseguita dall'Università di Bologna - DICAM è stata realizzata in accordo alle norme ISO 14040-14044 considerando il modello dalla culla al cancello (cradle to gate), utilizzando il software OpenLCA e il database Ecoinvent

v 3.7.1. I metodi di valutazione degli impatti principalmente considerati sono stati ReCiPe endpoint (H) e IPCC2013 GWP 100a. Presa a riferimento la tradizionale pavimentazione sino ad oggi realizzata (250 chilometri di corsia di marcia lenta, andata e ritorno), i principali risultati ottenuti riguardano il risparmio energetico (-30%), risparmio di emissioni di CO₂eq (-38,5%), -40% di utilizzo di materie prime non rinnovabili (bitume ed aggregati) e il riciclaggio di 1500 tonnellate di plastiche dure riutilizzate, evitandone la termovalorizzazione.

Si evidenzia inoltre che, malgrado la LCA sia stata studiata con il metodo dalla culla alla tomba (cradle to grave), in realtà, a fine vita utile tutti i conglomerati bituminosi prodotti con le nuove tecnologie potranno essere riutilizzati sotto forma di conglomerato bituminoso di recupero per la realizzazione di future pavimentazioni.

Bibliografia

- Shah, A.,** Lodhi, R., Javed,, M., Jasinski, M., Jainska, E., & Gono, M. (2023). Structural Performance Of Waste Plastic Bottles Modified Asphalt: A Review. Resources.
- 14040, I.** (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- Abe, A.,** Caputo, P., Eskandarsefat, S., Loise, V., Porto, M., Giorno, E., . . . Oliviero Rossi, C. (2023). Rejuvenating Agents vs. Fluxing Agents: their respective mechanisms of action on bitumen subjected to multiple aging cycles. Applied Sciences - MDPI. Tratto da <https://doi.org/10.3390/app13020698>
- Airey, G.** (1999). Dynamic shear rheometry, fluorescent microscopy, physical and chemical evaluation of polymer modified bitumens. 7th conference on asphalt pavements for southern Africa.
- B. G. Gouveia ,** M. Donato , & M. A. Vieira da Silva. (2022). Life Cycle Assessment in Road Pavement Infrastructures: A Review. Civil Engineering Journal, 1304-1315.
- Bocci, E.,** Mazzoni, G., & Canestrari, F. (2019). Ageing of rejuvenated bitumen in hot recycled bituminous mixtures: influence of bitumen origin and additive type. Road Materials and pavement Design.
- Capitão, S.,** Almeida, A., & Picado-Santos, L. (2022). Volumetric properties, workability, and mechanical performance of waste plastic-modified asphalt mixtures (Vol. Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads). Elsevier.
- D'Angelo, S.** (2021). Caratterizzazione reologica di bitumi modificati con compound polimerici innovativi. Università Politecnica delle Marche: Tesi di Laurea.

- Desidery, L., & Lanotte, M.** (2022). *Polymers and plastics: Types, properties, and manufacturing*, (Vol. Plastic waste for sustainable asphalt roads). Elsevier.
- E Hoxha, R. R. Vignisdottir, A. Passer, H. Kreiner, S. Wu, & R. A. Bohne.** (2020). Life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of urban roads: a literature review. ECS 244th ECS Meeting. Gothenburg, Sweden: Earth and Environmental Science.
- EU.** (2023, aprile 27). *Plastics*. Tratto da European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/plastics#:~:text=About%20%25%20of%20European%20microplastics,to%2057.2%20Mt%20in%202021>.
- European Commission.** (09-05-23). *New Road Construction Concept (NR2C)*. Grant agreement ID: 505831.
- F. Gschösser, & H. Wallbaum.** (2013). *Life Cycle Assessment of Representative Swiss Road Pavements for National Roads with an Accompanying Life Cycle Cost Analysis*. Chalmers Publication Library, vol. 47(15), pp. 8453-61.
- Federal Highway Administration.** (2014). *LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PAVEMENTS*. USA: FHWA.
- Goodship, V.** (2007). *Plastic Recycling*. Science Progress.
- Grady, B., Afroz Sultana, S., & Prasad, K.** (2022). Waste plastics in asphalt concrete: A review. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) -SPE Polymers*.
- H. Wang, & R. Gangaram.** (2014). *Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Maintenance*. Rutgers, New Jersey: Center for Advanced Infrastructure & Transportation - The State University of New Jersey.
- Haddock, J., & Vivar, E.** (2005). *HMA Pavement Performance and Durability*. FHWA/IN/JTRP-2005/14.
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., & Indacochea-Vegaa, I.** (June 2016). Comparative Analysis of the performance of Asphalt Concretes Modified by Dry Way with Polymeric Waste. *Construction and Building Materials*.
- Lesueur, D.** (2009). *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*. *Advances in Colloid and Interface Science*.
- M. I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini, & L. Zampori.** (2015). *Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold-in-place recycling*.
- Mantecca, P., Perucca, M., & Rizzi, L.** (2022). *Hybrid combination of waste plastics and graphene for high-performance sustainable roads* (Vol. Capitolo 10). Elsevier.
- N. Santero, E. Masanet, & A. Horvath.** (2010). *Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*. Berkeley, California: Environmental Energy Technologies Division - Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Plastics Europe, & Epro.** (2021). *Plastics - The facts - An analysis of European plastics production, demand, and waste data*. Tratto da Plastics Europe: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>
- Portas, S.** (2021, Marzo). *Le pavimentazioni sicure e sostenibili prendono il volo*. *Strade&Autostrade*, p. 80-85.
- R. Liu, B. W. Smartz, & B. Descheneaux.** (2014). *LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado*. *International Journal of Sustainable Engineering*, 102-110.
- T. E. Tisberger Ibañez.** (2020). *Life Cycle Assessment of Pavements through PaLATE*. POLITECNICO DI TORINO - Master of Science in Civil Engineering.
- Takkalkar, P., Jatoi, A., Jadhav, A., & Jadhav, H.** (2022). *Thermo-mechanical, rheological, and chemical properties of recycled plastics* (Vol. Plastic waste for sustainable asphalt roads). Elsevier.
- United Nations.** (2023). *Global Sustainable Development Report 2023*.
- W. S. Alaloul, M. Altaf, M. A. Musarat, M. F. Javed, & A. Mosavi.** (2021). *Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study*. MDPI - Sustainability. ■■