



WORKSHOP

Il recupero dei materiali da demolizione: dalla progettazione alla gestione

15 aprile 2026 Auditorium, Sala Mediterraneo – ANAS ROMA



La filiera virtuosa per le costruzioni stradali con fresato: dal laboratorio al cantiere



Prof.ssa Ing. Francesca Russo

Responsabile tecnico-scientifico Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti

francesca.russo2@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II

Ing. Nunzio Viscione

Funzionario Tecnico Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti

nunzio.viscione@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II

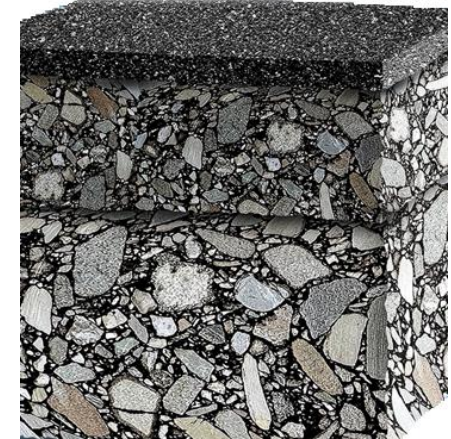
La Pavimentazione stradale

è una struttura piana, costituita da più strati, ciascuno progettato in termini di resistenza

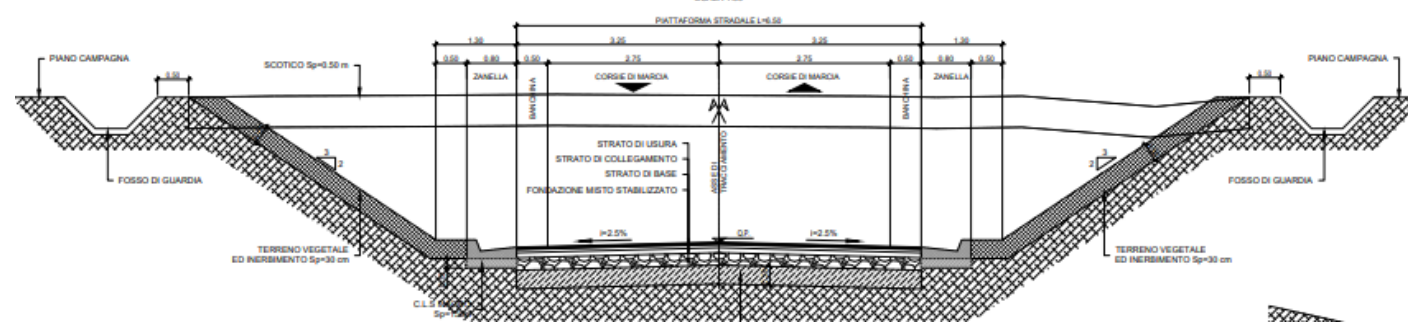
per rispondere a determinate caratteristiche funzionali e/o strutturali

realizzate e messe in opera su rilevati o terreni disponibili in sito (trincee),

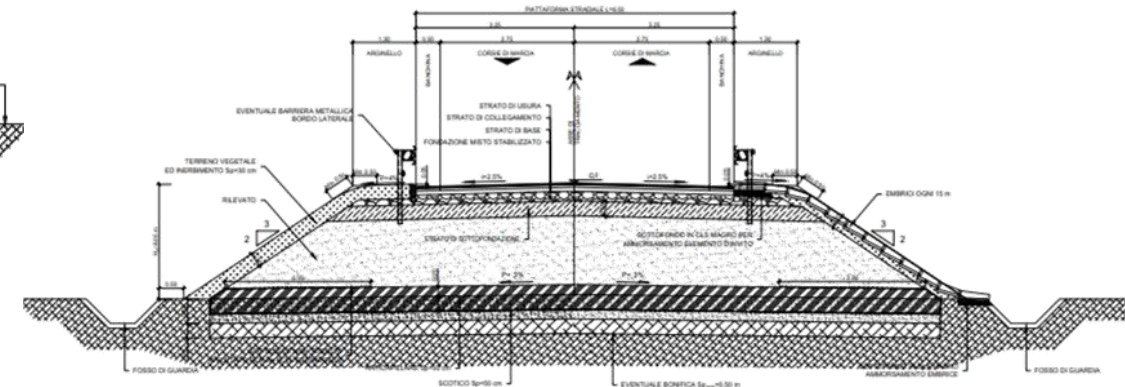
soggetta all'azione diretta dei carichi da traffico ed agenti atmosferici.



SEZIONE TIPO IN TRINCEA
SCALA 1:50



STRADA A DESTINAZIONE PARTICOLARE
SEZIONE TIPO IN RILEVATO H_{ri} ≤ 6.00 m
SCALA 1:50



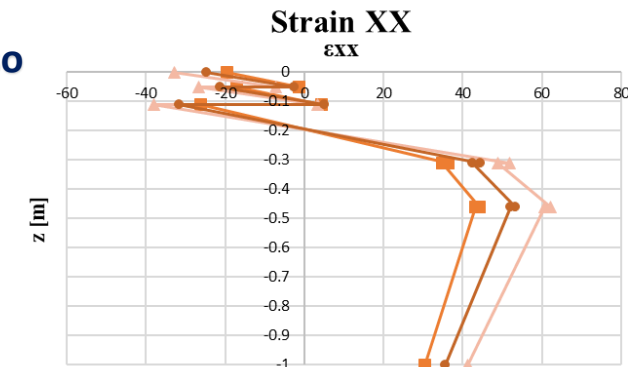
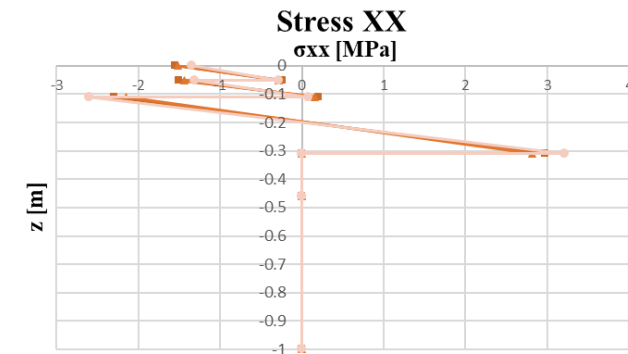
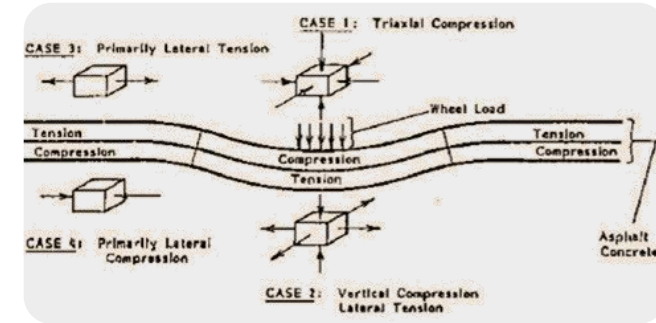
Approccio razionale per dimensionamento pavimentazioni

- **Verticali**

Si distribuiscono uniformemente su superfici circolari la cui area circolare è proporzionale all'area di impronta dello pneumatico e con una pressione proporzionale a quella di gonfiaggio dello pneumatico.

- **Orizzontali**

Le azioni orizzontali vanno a distribuirsi uniformemente su superfici circolari la cui area circolare è proporzionale a quella dello pneumatico però di entità inferiore a quella generata dalle azioni verticali.



Dati di Input

- ☐ Modulo complesso E^* , coefficiente di Poisson complesso ν^* per le miscele in conglomerato bituminoso
- ☐ Modulo $E_{\text{Sottofondo}}$ e $E_{\text{Fondazione}}$, coefficiente di Poisson ν per gli strati non legati
- ☐ Raggio dell'area d'impronta
- ☐ Aderenza tra gli strati

È carente

PROCEDERE AL DIMENSIONAMENTO DI UNA STRATIGRAFIA DI UNA SOVRASTRUTTURA VIARIA APPLICANDO METODO AASHTO 1993

$$SN_i = a_i H_i d_i$$

SN_i = numero di struttura dell'i-esimo strato [inch];

a_i = coefficiente di strato dell'i-esimo strato [adimensionale];

H_i = spessore dell'i-esimo strato [inch].

d_i = coefficiente di drenaggio dell'i-esimo strato.

Inoltre, si tiene conto del contributo dato dal sottofondo SNSG (structural number of subgrade)

Il valore di SN viene, infine, valutato con la seguente espressione¹:

$$SN = \sum_{i=1}^{n_{strati}} a_i H_i d_i + SNSG \quad [\text{Inch}]$$

Il contributo del sottofondo viene introdotto attraverso la sua capacità portante CRB:

$$SNSG = 3.51 \log_{10} CBR - 0.85 (\log_{10} CBR)^2 - 1.43 \quad \text{per } CBR \geq 3$$

$$SNSG = 0 \quad \text{per } CBR < 3$$

CBR = indice di portanza CBR (California Bearing Ratio) [%].

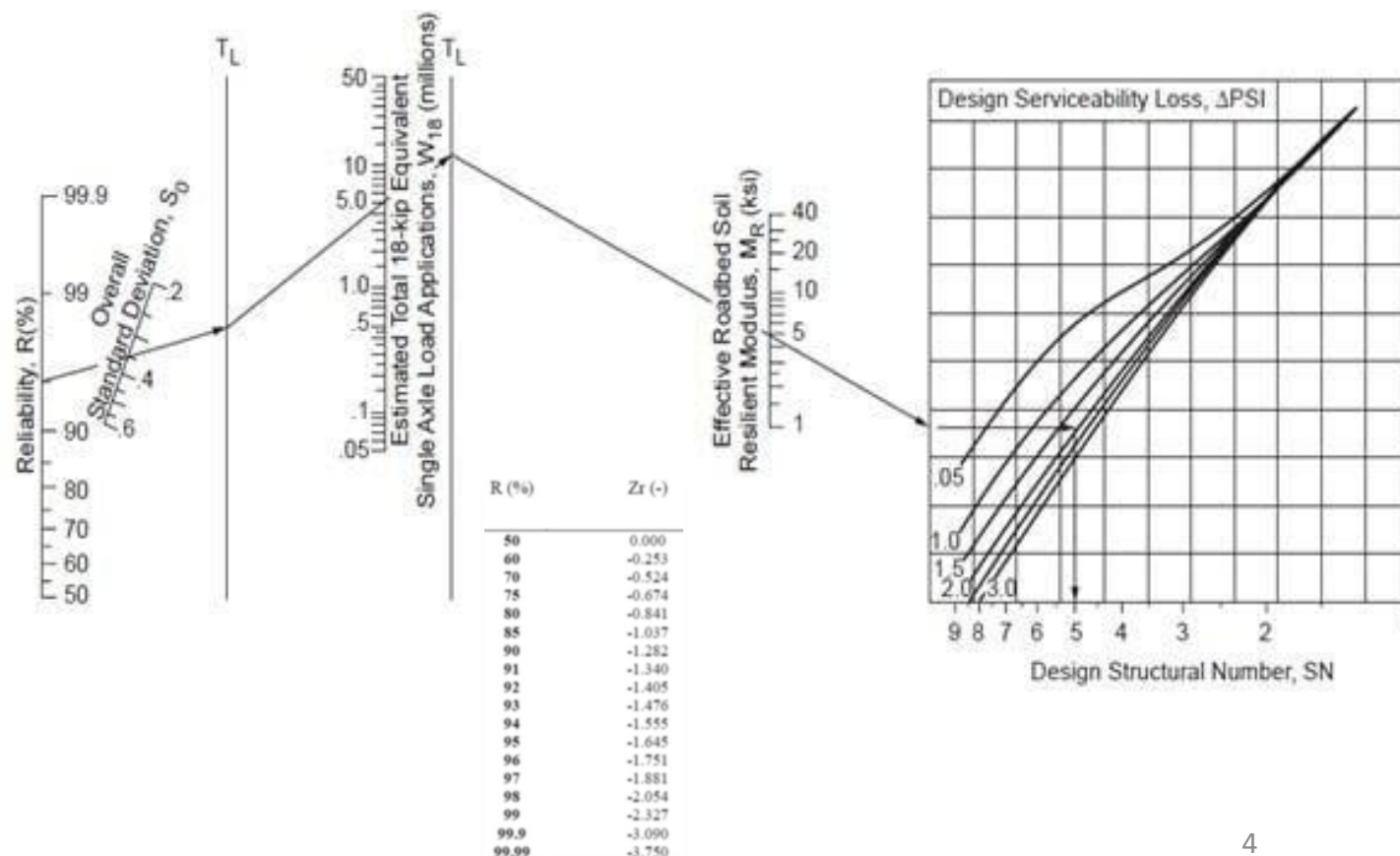
I coefficienti di drenaggio, già presenti nelle revisioni del 1986 alla AASHTO Design Guide, sono stati mantenuti nell'ultima versione della Guida (1993).

Nella AASHTO, i coefficienti di drenaggio, d_i sono usati per modificare il valore del coefficiente di spessore a_i di ogni strato non stabilizzato al di sopra del sottofondo in una pavimentazione flessibile.

Gli strati in conglomerato bituminoso, o realizzati con materiali legati, non sono influenzati da un eventuale cattivo drenaggio dello strato o dal tempo in cui si trova in condizioni di saturazione. In questi casi il coefficiente di drenaggio vale comunque 1. Per gli altri strati i coefficienti di drenaggio sono determinati considerando la qualità del drenaggio e il tempo, in percentuale, che la pavimentazione è esposta a livelli di umidità vicino alla saturazione.

L'effetto di un efficiente drenaggio è quello di fornire valori elevati di SN e, pertanto, si traduce in una riduzione delle fessurazioni, delle ormaie e delle irregolarità della superficie stradale.

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \log (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$



¹ Se gli spessori sono espressi in mm l'espressione si modifica, tenendo conto che 1 pollice = 25.4 mm, come segue:

$$SN = \sum_i a_i d_i \frac{H_i}{25.4} + SNSG = 0.03938 \sum_i a_i d_i H_i + SNSG$$

Verifiche di Resistenza

La Fessurazione da fatica

Si manifesta attraverso una serie di fessure tra loro interconnesse

E' detta per la particolare forma fessurazione a pelle di cocodrillo

La fatica è generata dal passaggio ciclico di veicoli

Il ripetersi di questo meccanismo porta ad un progressivo accumulo del danno fino alla rottura

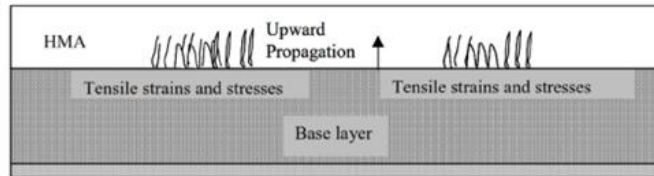
La resistenza a fatica dipende da molteplici fattori legati soprattutto alla miscela bituminosa

$$DC = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^A \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \leq 1$$

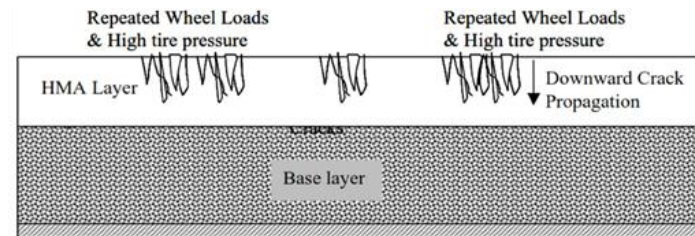
$n_{i,j}$ Numero di passaggi effettivi dell'asse j-esimo nel periodo di analisi i-esimo

$N_{i,j}$ Numero di ripetizioni dell'asse considerato che porta a rottura il materiale per quella predefinita configurazione di calcolo

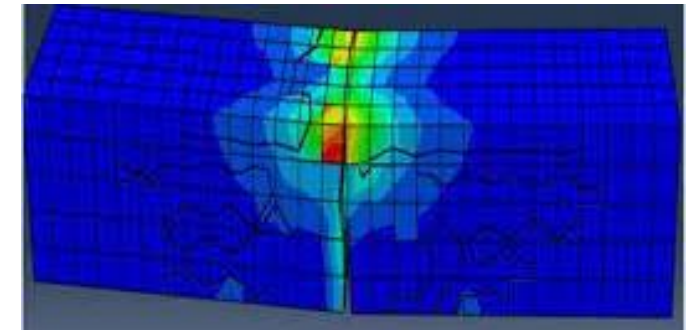
$$N_{i,j} = N_{i,j}^I + N_{i,j}^{F10}$$



Bottom-up



Top-down



Verifiche di Resistenza

La resistenza ai fenomeni di deformazione permanente

Depressioni sulla superficie stradale che si sviluppano in direzione longitudinale, lungo le direttrici di impronta degli pneumatici

Insorgono cedimenti verticali permanenti lungo il percorso delle ruote dovuti al **progressivo accumulo di deformazioni** a seguito del passaggio ripetuto di veicoli

La presenza di ormaie oltre rendere difficili alcune manovre di cambio direzione, **in presenza di pioggia possono dar luogo al fenomeno di acquaplaning**

$$\delta_p = \varepsilon_p(n) \cdot h \leq 1.5 \div 2.5 \text{ cm}$$

- $\varepsilon_p(n)$ = Deformazione permanente dopo n cicli di carico;
- h = Spessore strato in esame [cm].

$$\varepsilon_p = A \cdot \left(\frac{N}{1000 \cdot f} \right)^B$$

- A = Aderenza fra gli strati;
- N = N° di passaggi di veicoli commerciali;
- f = Frequenza di applicazione del carico [Hz];
- B = Coefficiente pari a 0.25.

$$A = \frac{H \cdot |\sigma_3 - \sigma_1|}{2 \cdot |E^*|}$$

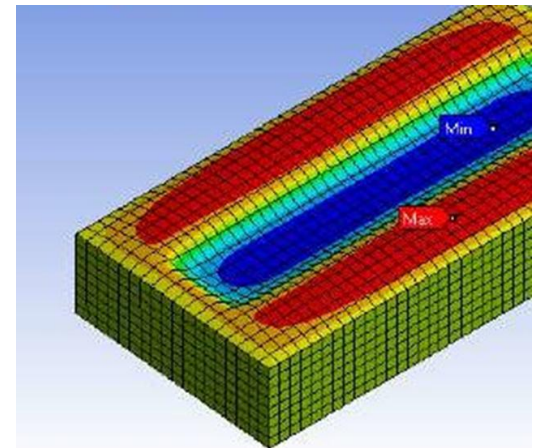
- σ_1 = Tensione verticale massima ottenuta dal calcolo del multistrato elastico (compressione positiva) [MPa];
- σ_3 = Tensione orizzontale massima di confinamento ottenuta dal calcolo del multistrato elastico (compressione positiva) [MPa];
- $|E^*|$ = Modulo Complesso del conglomerato bituminoso con temperatura e frequenza che si verificano [MPa].

I. Se le sollecitazioni verticali σ_{zz} nel **sottofondo** lungo le verticali passanti per il centro dell'area circolare di impronta del carico

$$\sigma_{zz} < \frac{0,006 E_d}{1 + 0,7 \lg N}$$

II. **Per la Fondazione** σ_{zz} nei punti di intersezione delle verticali suddette con i piani di delimitazione degli strati

$$2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq \sigma_{zz} \leq 4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



MANUTENZIONE PREDITTIVA -RIGENERATIVA DELLE PAVIMENTAZIONI

Approccio RAZIONALE: modellazione del comportamento meccanico dei materiali

Valutazione portanza sottofondo (Winkler, Boussinesqu)

Analisi dei carichi con riferimento all'intera vita utile

Definizione della tecnologia costruttiva degli strati costituenti una Pavimentazione

Analisi Reologica dei leganti

Mix design miscela singolo strato

Valutazione e determinazione numerica Indici Prestazionali sull'intero ciclo di vita della Pavimentazione

Progettazione stratigrafia

Approccio LCA

Approccio LCCA

Analisi a criteri multipli

Redazione PMS



Percentuali minime di materia recuperata, riciclata o sottoprodotto

Le percentuali sono calcolate sul peso del prodotto finito (secco su secco). Per interventi su strade esistenti, la materia recuperata deve provenire preferibilmente dal sito di intervento.

Le percentuali minime indicate nelle tabelle precedenti si intendono come somma dei contributi dati dalle singole frazioni utilizzate.

CORPO DEL RILEVATO

70%	Piano di posa delle fondazioni, corpo del rilevato e sottofondo <i>min. materiale riciclato/recuperato o sottoprodotto</i>
-----	--

PAVIMENTAZIONI RIGIDE (calcestruzzo)

50%	Fondazione in misto granulare / cementato
5%	Pavimentazione in lastre di calcestruzzo

STRATI DI PAVIMENTAZIONE

50%	Strato di fondazione/base (misto granulare non legato/legato, misto cementato) Pavim. flessibili e semirigide
-----	---

Conglomerati bituminosi con BITUMI NORMALI

35%	Base / Base-Binder
-----	--------------------

30%	Collegamento / Binder
-----	-----------------------

15%	Usura chiusa
-----	--------------

Conglomerati bituminosi MODIFICATI / con polimeri

25%	Base / Base-Binder
-----	--------------------

20%	Collegamento / Binder
-----	-----------------------

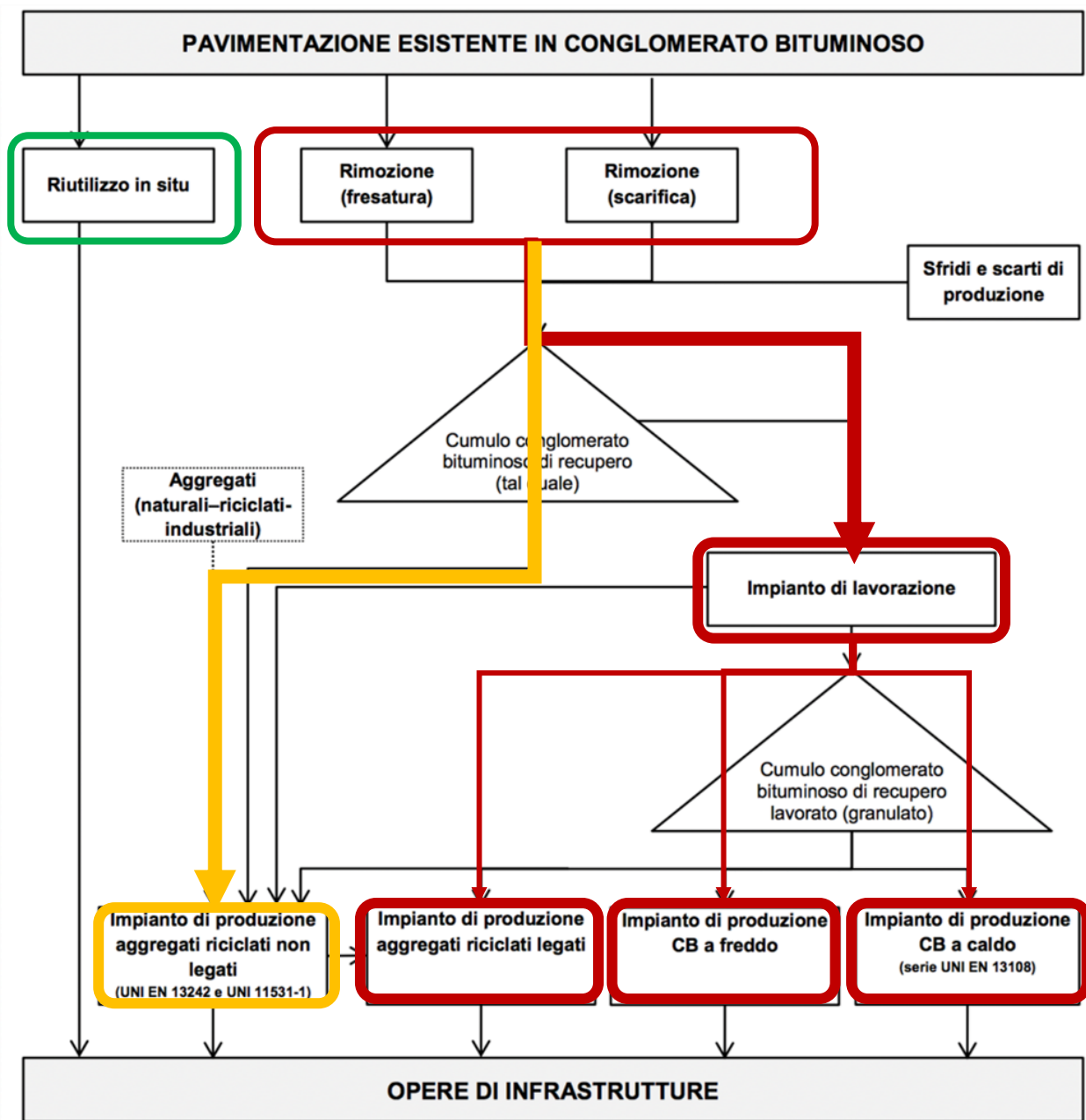
10%	Usura chiusa e drenante
-----	-------------------------

Conglomerato bituminoso di recupero

UNI/TS 11688

Criteri di qualificazione e impiego del conglomerato bituminoso di recupero proveniente dalla rimozione di pavimentazioni esistenti.

La norma integra le indicazioni fornite dalla norma UNI EN 13108-8.



prospetto 1 Caratteristiche del cumulo di conglomerato bituminoso di recupero in base all'impiego

CARATTERISTICHE DEL CUMULO			IMPIEGHI DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO						
			LAVORATO (granulato)				NON LAVORATO (tal quale)		
CARATTERISTICA	RIFERIMENTI NORMATIVI	CB a caldo (serie UNI EN 13108)		CB a freddo		fondazione	base-binder	Aggregati (legati e non legati) (UNI EN 13242)	Lavorazioni in situ ^{b)}
		RA≤10% (usura)	10%<RA<50% (usura)	RA≥50% (tutti gli strati)	RA≤20% (base binder)				
Designazione del conglomerato di recupero	Distribuzione granulometrica	UNI EN 933-1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Designazione granulometrica	UNI EN 13108-8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Composizione del conglomerato di recupero	Contenuto legante	UNI EN 12697-1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Dimensione massima (U _{RA})	UNI EN 12697-2, UNI EN 13043	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Legante	Tipo di legante	Evidenze documentali	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Proprietà legante (Penetrazione - rammollimento / Viscosità)	UNI EN 1426 UNI EN 1427 UNI EN 13302	nr	SI	SI	nr	nr	nr	nr
Aggregato	Granulometria	UNI EN 12697-2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Resistenza frammentazione (LA)	UNI EN 1097-2	nr	nr	SI	nr	SI	nr	nr
	Forma e appiattimento	UNI EN 933-3, UNI EN 933-4	nr	nr	SI	nr	SI	nr	nr
	Resistenza levigazione (VL) (solo per strati superficiali di usura)	UNI EN 1097-8	nr	nr	SI ^{a)}	na	na	na	na
Materie estranee	Materiali Gruppo 1	UNI EN 12697-42	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Materiali Gruppo 2		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Omogeneità cumulo (variabilità o scarto)	Contenuto di legante	-	nr	SI	SI	nr	SI	nr	nr
	Caratteristiche del legante	-	nr	SI	SI	nr	SI	nr	nr
	Distribuzione granulometrica	-	nr	SI	SI	nr	SI	nr	nr

NOTE:
a) I requisiti evidenziati in grassetto sono richiesti secondo la norma UNI EN 13108-8.
b) Da determinare in fase di progetto
SI = Requisito richiesto
nr = Requisito non richiesto
na = Requisito non applicabile

Alcune pubblicazioni scientifiche



Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti



Investigating the rheological properties of hot bituminous mastics made up using plastic waste materials as filler

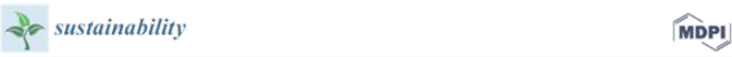
Rosa Veropalumbo, Francesca Russo^{*}, Nunzio Viscione, Salvatore Antonio Biancardo, Cristina Oreto
Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy



Verifying laboratory measurement of the performance of hot asphalt mastics containing plastic waste

Rosa Veropalumbo¹, Francesca Russo^{1,*}, Cristina Oreto¹, Salvatore Antonio Biancardo², Weibin Zhang³, Nunzio Viscione²

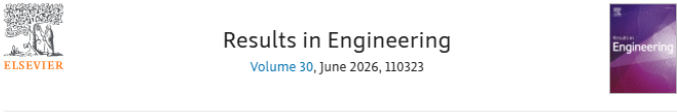
^{*} Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy
¹ Nanjing University of Science and Technology, School of Electronic and Optical Engineering, 210094 Nanjing, China



Chemical, Thermal, and Rheological Performance of Asphalt Binder Containing Plastic Waste

Rosa Veropalumbo¹, Francesca Russo¹, Cristina Oreto¹, Giovanna Giuliana Buonocone², Letizia Verdolotti^{2,*}, Herminio Muíambo³, Salvatore Antonio Biancardo¹ and Nunzio Viscione¹

- ¹ Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy; rosa.veropalumbo@unina.it (R.V.); francesca.russo2@unina.it (E.R.); cristina.oretto@unina.it (C.O.); salvatoreantonio.biancardo@unina.it (S.A.B.); nunzio.viscione@unina.it (N.V.)
 - ² Institute of Composites, Polymers and Biomaterials, National Research Council, P.le E. Fermi, 1, 80055 Naples, Italy; giovannagiuliana.buonocone@cnr.it
 - ³ Chemistry Department, Eduardo Mondlane University, Maputo P.O. Box 257, Mozambique; hmuambo@uem.mz
- * Correspondence: letizia.verdolotti@cnr.it; Tel.: +39-081-7758839



Research paper

Comparative sustainability analysis of RAP and recycled sand from solid urban waste into porous asphalt mixtures

Francesca Russo, Rosa Veropalumbo¹, Giovanni Alfano, Giuseppe D'Addio, Cristina Oreto



Case study

Reusing bottom ash as a filler from a Waste-to-Energy plant for making asphalt mastics

F. Russo^a, R. Veropalumbo^{a,*}, C. Oreto^a, D. Cassese^b, B. Papa^b, S. Malvezzi^b

^a Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, University of Naples Federico II, Via Claudio 21, 80125, Naples, Italy
^b Waste-to-Energy Plant at A2A Ambiente SpA, Via Lamarmora, 230, 25124 Brescia, BS, Italy



A comparative environmental life cycle assessment of road asphalt pavement solutions made up of artificial aggregates

Cristina Oreto, Francesca Russo¹, Gianluca Dell'Acqua, Rosa Veropalumbo



Climate change mitigation investigating asphalt pavement solutions made up of plastomeric compounds

Francesca Russo^{a,b}, Rosa Veropalumbo^{a,*}, Cristina Oreto^a

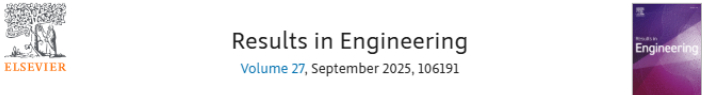
^a Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125, Naples, Italy
^b Road Materials Laboratory La.Stra., Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125, Naples, Italy



Performance-based characterization of recycled polymer modified asphalt mixture

Nunzio Viscione^a, Davide Lo Presti^b, Rosa Veropalumbo^a, Cristina Oreto^a, Salvatore Antonio Biancardo^a, Francesca Russo^a

^a Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy
^b Department of Civil, Environmental, Aerospace, Materials Engineering, University of Palermo, Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy



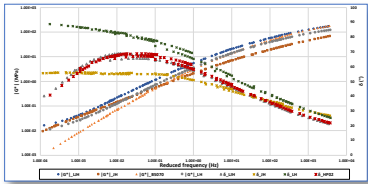
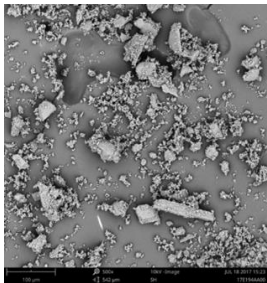
Research paper

Turning marine microplastics into components for producing innovative bituminous mastics: Boosting sustainability in road pavements

Yanqi Wang^{a,b,1}, Rosa Veropalumbo^{c,1}, Federica Recupido^{a,1}, Cristina Oreto^c, Quansheng Sun^d, Letizia Verdolotti^a, Assunta Campanile^a, Barbara Liguori^a, Nunzio Viscione^c, Gianluca Dell'Acqua^c, Francesca Russo^c, Giuseppe Cesare Lama^a

PROCESSI VIRTUOSI DI MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI DELLE MISCELE

Procedura rigorosa attraverso approccio numerico razionale e verifica in scala di laboratorio di soluzioni bituminose ai fini della progettazione, controllo e collaudo di pavimentazioni sostenibili in linea con D.M. 5/08/2024 - CAM Strade



Phase 1

Materials characterisation

Limestone aggregates (LA)

Neat bitumen 50/70 (NB)

Modified bitumen 10/40-70 (PMB)

Polymer compounds

Plastomeric polymer compound (PC)

Graphene-enhanced recycled plastic compound (GRPC)

Phase 2

Asphalt mixtures mechanical performance

Design of hot asphalt mixtures:

1) HMA_{NB}
95.7% LA + 4.3% NB

2) HMA_{PMB}
95.7% LA + 4.3% PMB

3) HMA_{PC}
95.5% LA + 4.3% NB + 0.2% PC

4) HMA_{GRPC}
95.5% LA + 4.3% NB + 0.2% GRPC

Mechanical tests:

Indirect Tensile Strength (EN 12697-23)

Indirect Tensile Strength Ratio (EN 12697-12)

Indirect tensile stiffness modulus (EN 12697-26)

Fatigue life (EN 12697-24)

Semi Circular Bendind (EN 12697-44)

Rut depth (EN 12697-22)

Phase 3

Life cycle assessment of pavement solutions

4 pavement solutions designed combining empirical equations and the results of the mechanical tests to obtain functional units

HMA_{NB} HMA_{PC} HMA_{PMB} HMA_{GRPC}

PS1 PS2 PS3 PS4

Recipe Method

Global warming

Acidification

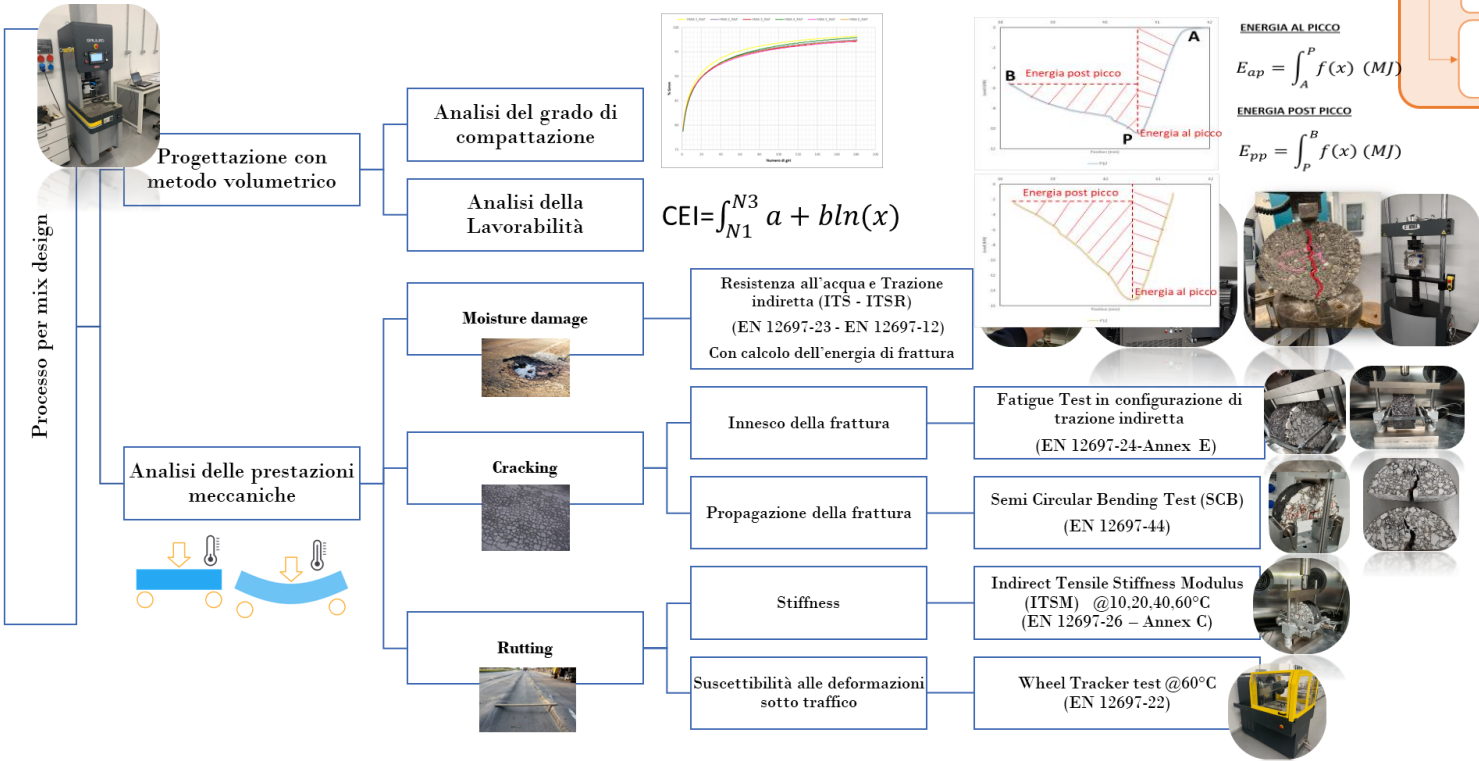
Toxicity

Resource scarcity

Phase 4

Real scale analysis

Test track built in real scale analysis. Pre- and post-production lab tests in addition to the periodical monitoring operations

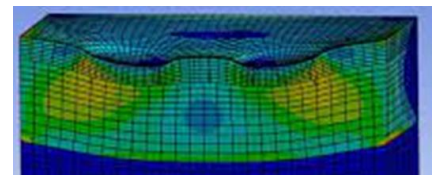
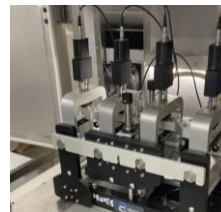


Mix Design e performance meccanico-Volumetriche

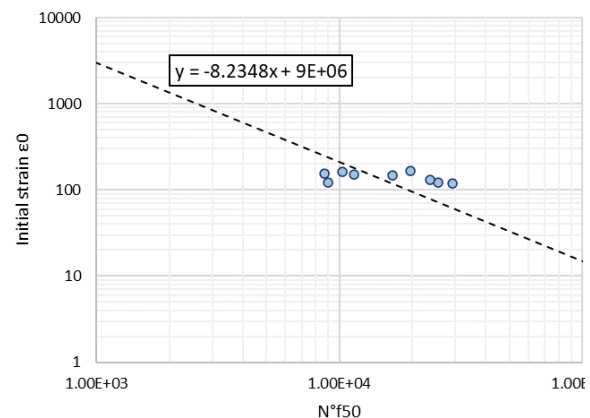
Resistenza meccanica: Cracking

INNESCO DELLA FESSURA

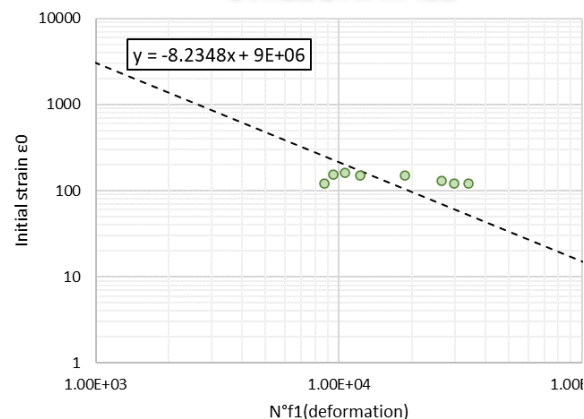
EN 12697-24 – Annesso E – Method I



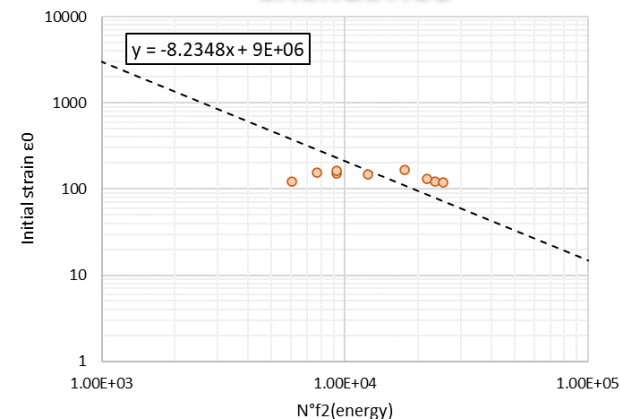
50% MODULO INIZIALE



MASSIMA DEFORMAZIONE ORIZZONTALE



MASSIMO RAPPORTO ENERGETICO



$$DC = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^A \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \leq 1$$

$n_{i,j}$ Numero di passaggi effettivi dell'asse j-esimo nel periodo di analisi i-esimo

$N_{i,j}$ Numero di ripetizioni dell'asse considerato che porta a rottura il materiale per quella predefinita configurazione di calcolo

$$N_{i,j} = N_{i,j}^I + N_{i,j}^{F10}$$

PROPAGAZIONE DELLA FESSURA

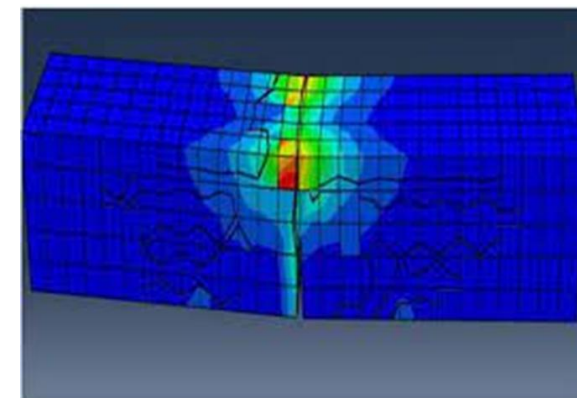
EN 12697-44

Resistenza alla frattura

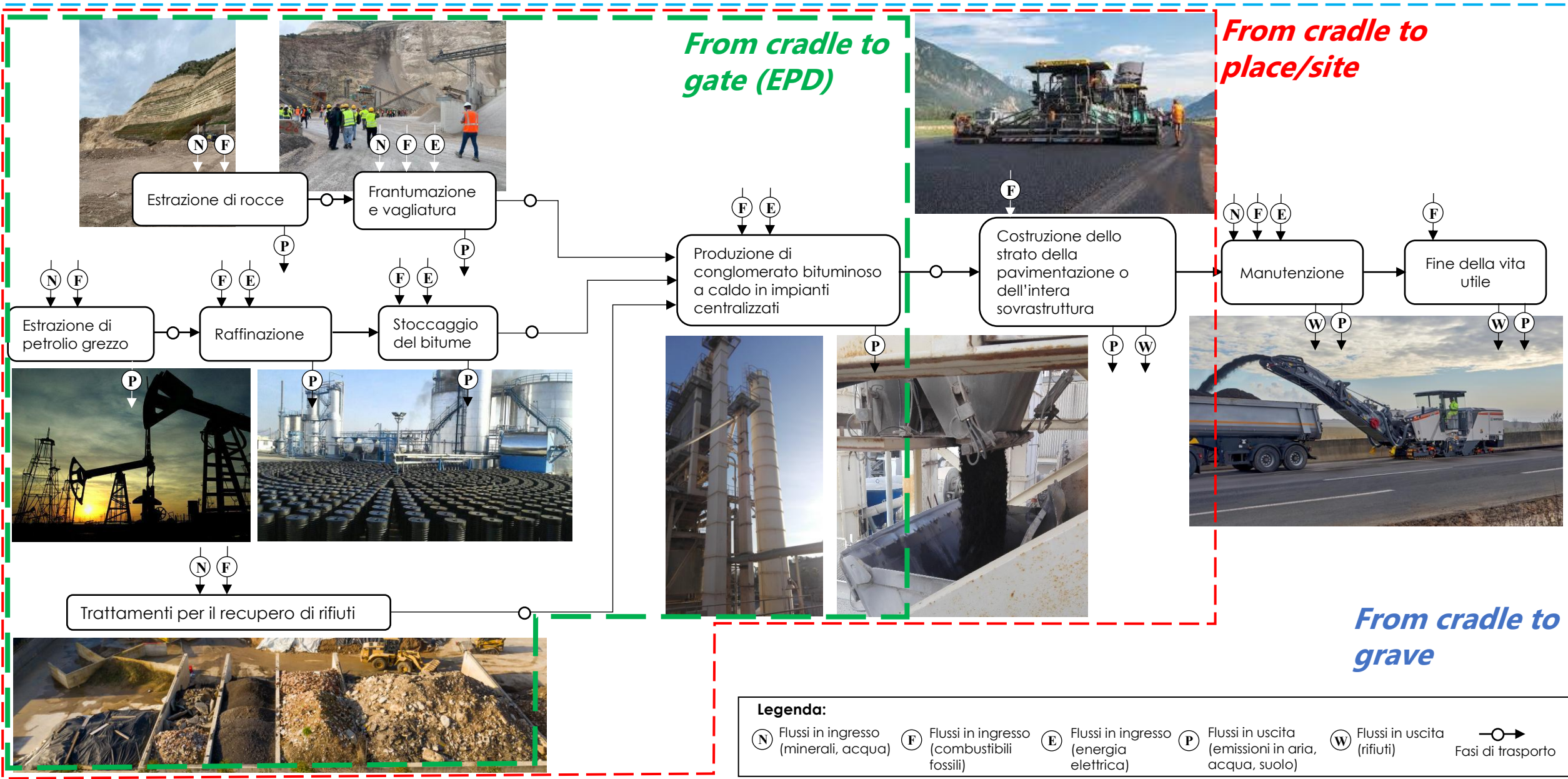
$$K_{IC} = \sigma_{max} Y_1 \sqrt{\pi a} \left[\frac{N}{mm^{1.5}} \right]$$

Max Stress

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{Dt} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

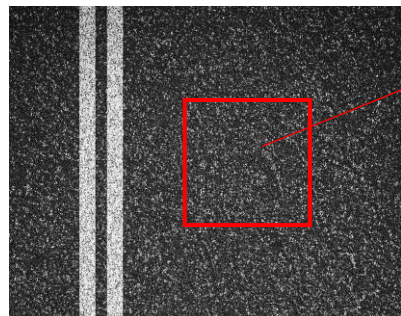


Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA



Fase 3: Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA

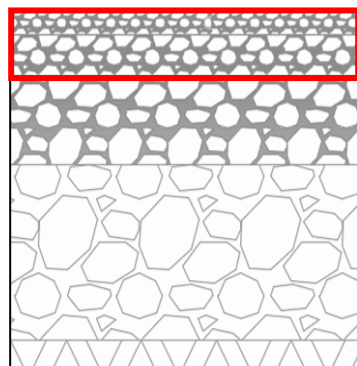
Unità funzionale



1 m² di pavimentazione

Periodo di analisi:
20 anni

Manutenzione ordinaria degli strati di usura e binder



Soluzione
tradizionale

- 3 cm usura CM con bitume tal quale
- 3 cm binder CM con bitume tal quale

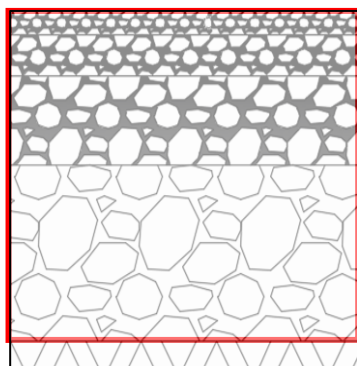
Soluzione
5+1

- 1 cm usura CM con bitume tal quale
- 5 cm binder CM con bitume tal quale

Soluzione
5+1 PBT

- 1 cm usura con bitume tal quale e legante modificato
- 5 cm binder con il 40% di granulato di conglomerato bituminoso e legante Mod

Manutenzione straordinaria



Periodo di analisi:
50 anni

- 1 cm usura con bitume tal quale e legante PBT
- 5 cm binder con il 40% di granulato di conglomerato bituminoso e legante Mod
- 15 cm base con il 50% di granulato di conglomerato bituminoso e legante Mod
- 28 cm Fondazione in misto granulare stabilizzato a fino

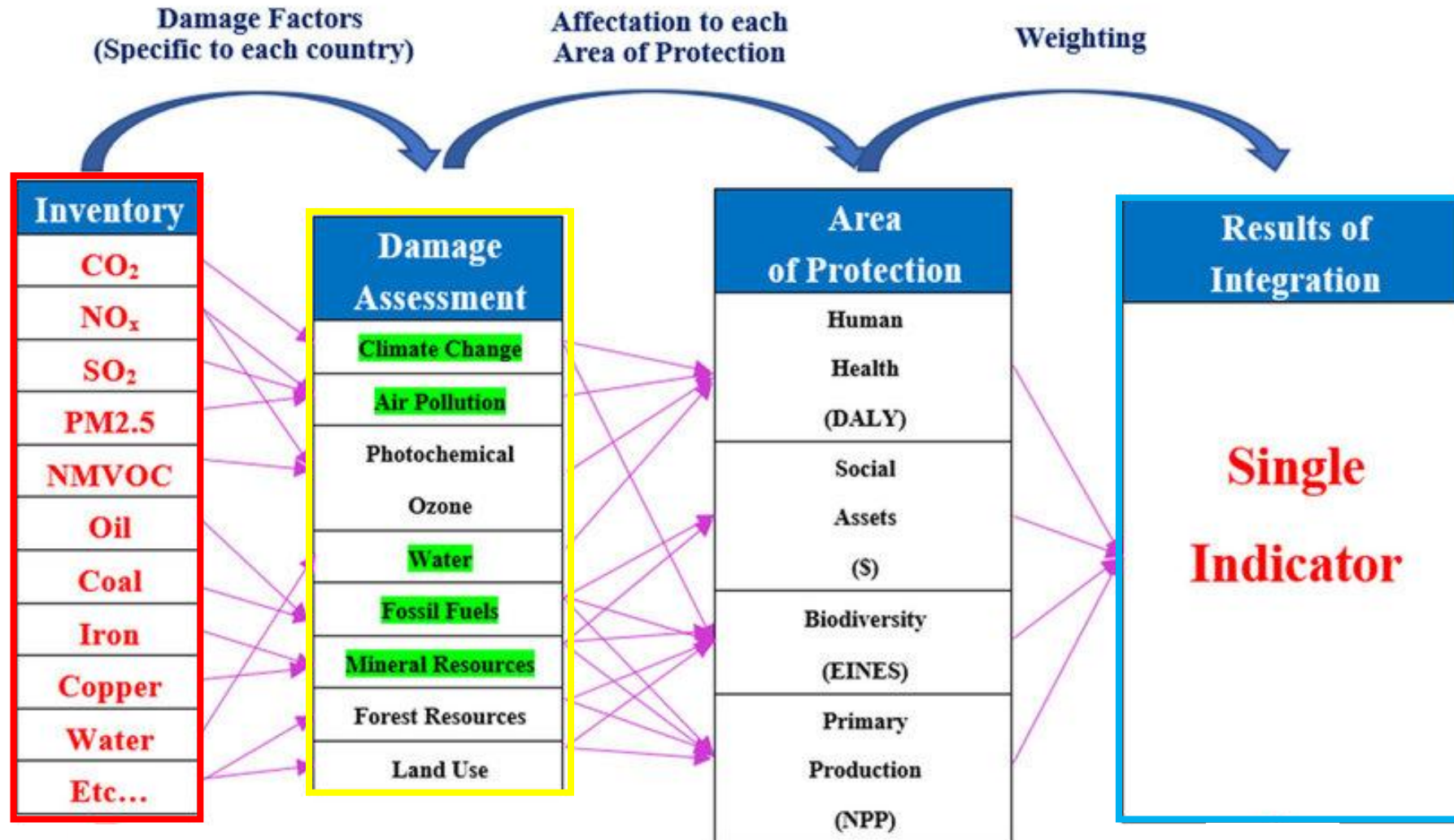
Life Cycle Assessment - Inventario

DATI PRIMARI		FONTE DEL DATO	DATI	ANNO DI RILIEVO
i)	Quantità di materie prime	Composizione delle miscele in conglomerato bituminoso come da mix design	% di ciascuna pezzatura di inerti e % di bitume ottima	2022
iv)	Macchinari e produttività delle operazioni di frantumazione e vagliatura per la produzione di inerti calcarei e basaltici	Cave di estrazione, impianti di frantumazione e vagliatura di inerti	Produttività dell'escavatore per estrazione di roccia: 46.9 t/h Produttività delle pale meccaniche: 400 m ³ /h Produttività dell'escavatore: 210 m ³ /h Produttività dei dumper: 143.4 m ³ /h	2022
v)	Consumi energetici durante la produzione di inerti calcarei e basaltici	Impianti di frantumazione e vagliatura di inerti	2.87 kWh/t (calcarei) 5.95 kW/t (basalti)	2022
vi)	Consumi elettrici e di gas naturale durante la produzione di miscele in conglomerato bituminoso	Impianto di produzione di conglomerato bituminoso	Consumo di gas naturale: 8.79 m ³ /t Consumo di elettricità: 4.37 kWh/t	2022
vii)	Macchinari e produttività delle operazioni di produzione del conglomerato bituminoso a caldo	Impianto di produzione di conglomerato bituminoso	Produttività delle pale meccaniche: 435 m ³ /h	2022
viii)	Macchinari e produttività delle operazioni di stesa di una pavimentazione in conglomerato bituminoso	Impresa di costruzione stradale	Produttività di vibrofinitrice e rullo in serie: 351 t/d (usura), 205 t/d (binder), 117 t/d (base)	2022
x)	Capacità dei veicoli per il trasporto di materiali	Tutte	Variabile	2022
xi)	Numero di interventi di manutenzione ordinaria in 20 anni	Vita utile di progetto delle stratigrafie	Variabile	2023
xii)	Macchinari e produttività delle operazioni di demolizione della pavimentazione	Impresa di costruzione stradale	Produttività della fresatrice: 150 t/h	2022
xiii)	Distanze percorse durante il trasporto di materiali e rifiuti	Tutte	Variabile	2022

Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA

Valutazione di impatto

CML-IA baseline V3.06 / EU25+3, 2000



Valutazione dei costi del ciclo di vita - LCCA

$$LCCA = C^{CON} + C_{(PV)}^M + C_{(PV)}^{EOL} - S \frac{1}{(1+i)^k}$$



$$C^{CON} = \sum_{i=1}^a Q_i^A \cdot \left(\sum_{j=1}^b Q_{i,j}^M \cdot C_j^M + \sum_{k=1}^c \frac{Q_i^A}{P_{i,k}^E} \cdot C_k^E + \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{Q_i^A}{P_{i,k,l}^E} \cdot n_l^W \cdot C_l^W \right)$$

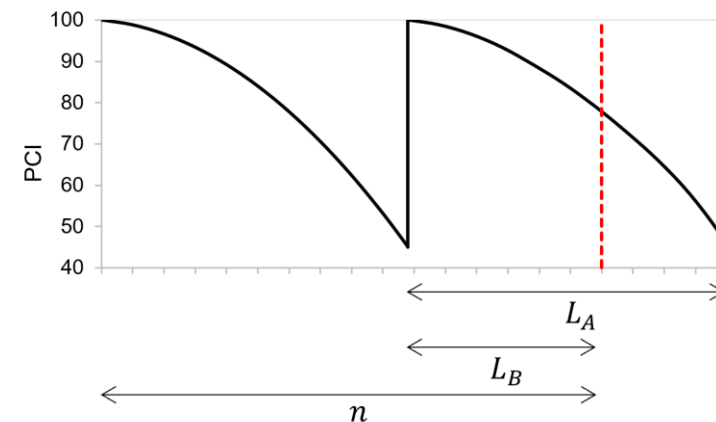
$$C_{(PV)}^M = \sum_{i=1}^a \left[Q_i^A \cdot \left(\sum_{j=1}^b Q_{i,j}^M \cdot C_j^M + \sum_{k=1}^c \frac{Q_i^A}{P_{i,k}^E} \cdot C_k^E + \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{Q_i^A}{P_{i,k,l}^E} \cdot n_l^W \cdot C_l^W \right) \right] \cdot m_i \cdot \frac{1}{(1+r)^{n_i}}$$

$$C_{(PV)}^{EOL} = \sum_{i=1}^a \left[(Q_i^A \cdot D^W \cdot C^T) + (Q_i^A \cdot P_i^W \cdot C^W) + (Q_i^A \cdot (1 - P_i^W) \cdot C^R) \right] \cdot \frac{1}{(1+r)^{n_i}}$$

$$S = C_{m_a} \left(1 - \frac{L_A}{L_B} \right)$$

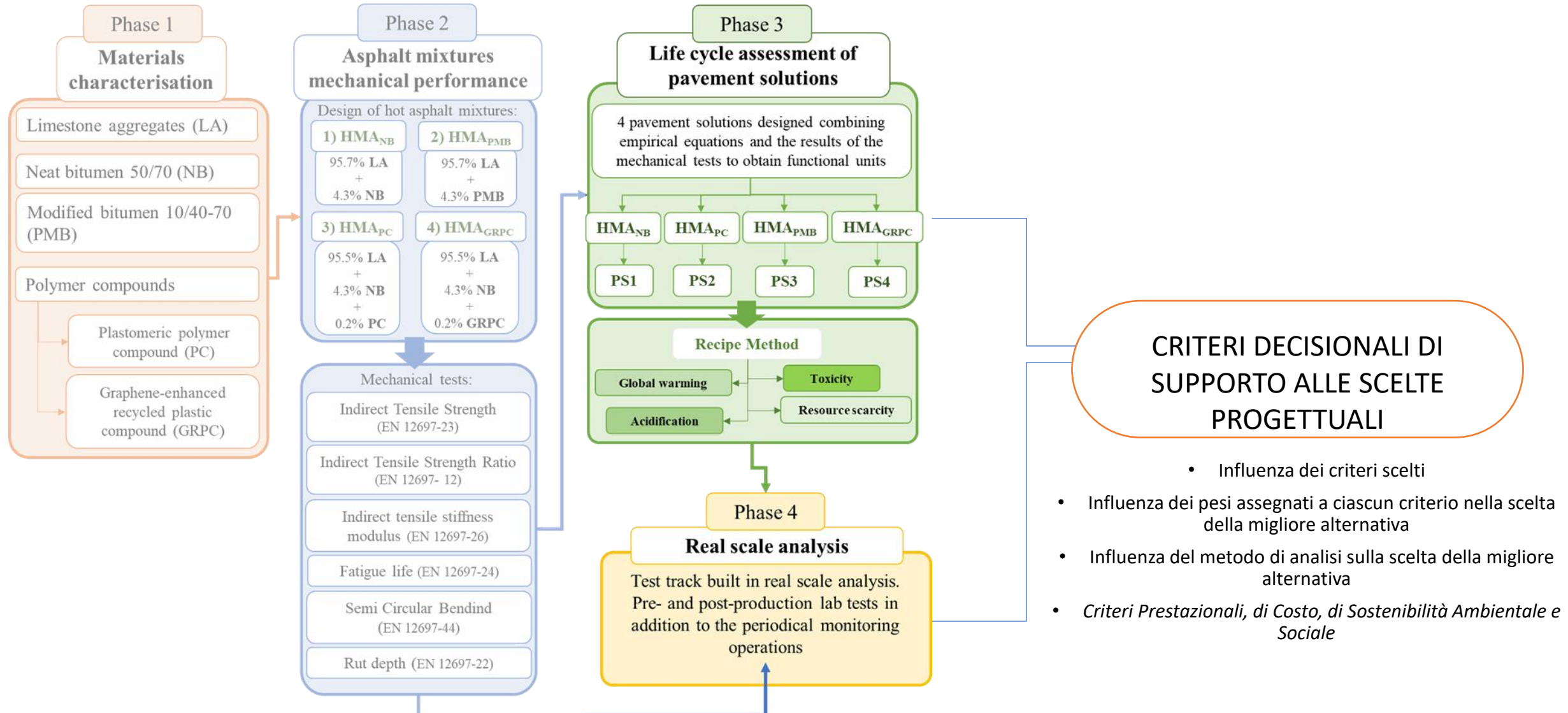
LCCA parametrica rispetto alle caratteristiche delle miscele in conglomerato bituminoso

- **Costi unitari** sostenuti dall'ente gestore per la fornitura e posa in opera di conglomerati bituminosi e oneri di smaltimento
- Parametri dipendenti dai **materiali** (mix design), dalla **stratigrafia di progetto** e dalla tipologia di **interventi manutentivi**
- Parametri dipendenti dalle **condizioni operative** dello specifico progetto (produttività delle macchine, tipologia di manodopera)



PROCESSI VIRTUOSI DI MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI DELLE MISCELE

Procedura rigorosa attraverso approccio numerico razionale e verifica in scala di laboratorio di soluzioni bituminose ai fini della progettazione, controllo e collaudo di pavimentazioni sostenibili in linea con D.M. 5/08/2024 - CAM Strade



Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

1 Definizione della **matrice di decisione**

	ALTERNATIVA		
	1	...	n
Indicatori di stato	IS _{1,1}		IS _{1,n}
	⋮		⋮
	IS _{m,1}		IS _{m,n}
Costo del ciclo di vita	C ₁		C _n
Impatti ambientali del ciclo di vita	IA _{1,1}		IA _{1,n}
	⋮		⋮
	IA _{m,1}		IA _{m,n}

2 Applicazione di **vincoli**
(i.e. budget)

$$\sum_{t=t_0}^{t^*} C_t \leq B_{t^*}$$

3 Calcolo della **matrice normalizzata**
(Vafaei et al., 2016)

Normalizzazione di indicatori a
massimizzare

$$n_{ij} = \frac{a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}{\max_i a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}$$

Normalizzazione di indicatori a
minimizzare

$$n_{ij} = 1 - \frac{a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}{\max_i a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}$$

4 Definizione di un **vettore dei pesi**

5 Definizione metodo

D.M. 05/08/2024 – CAM STRADE

Organizzazione del cantiere in funzione del trattamento del fresato

A. Trasporto a impianto fisso esterno

- Il fresato viene caricato e trasportato a impianto di riciclaggio fisso autorizzato
- Classificazione come rifiuto (CER 17 03 02) o come End of Waste se certificato
- Costi di trasporto elevati per grandi distanze (>30 km non conveniente)
- Minima occupazione di suolo in cantiere; nessun impianto da gestire
- Documentazione: FIR/registro carico-scarico o scheda EoW

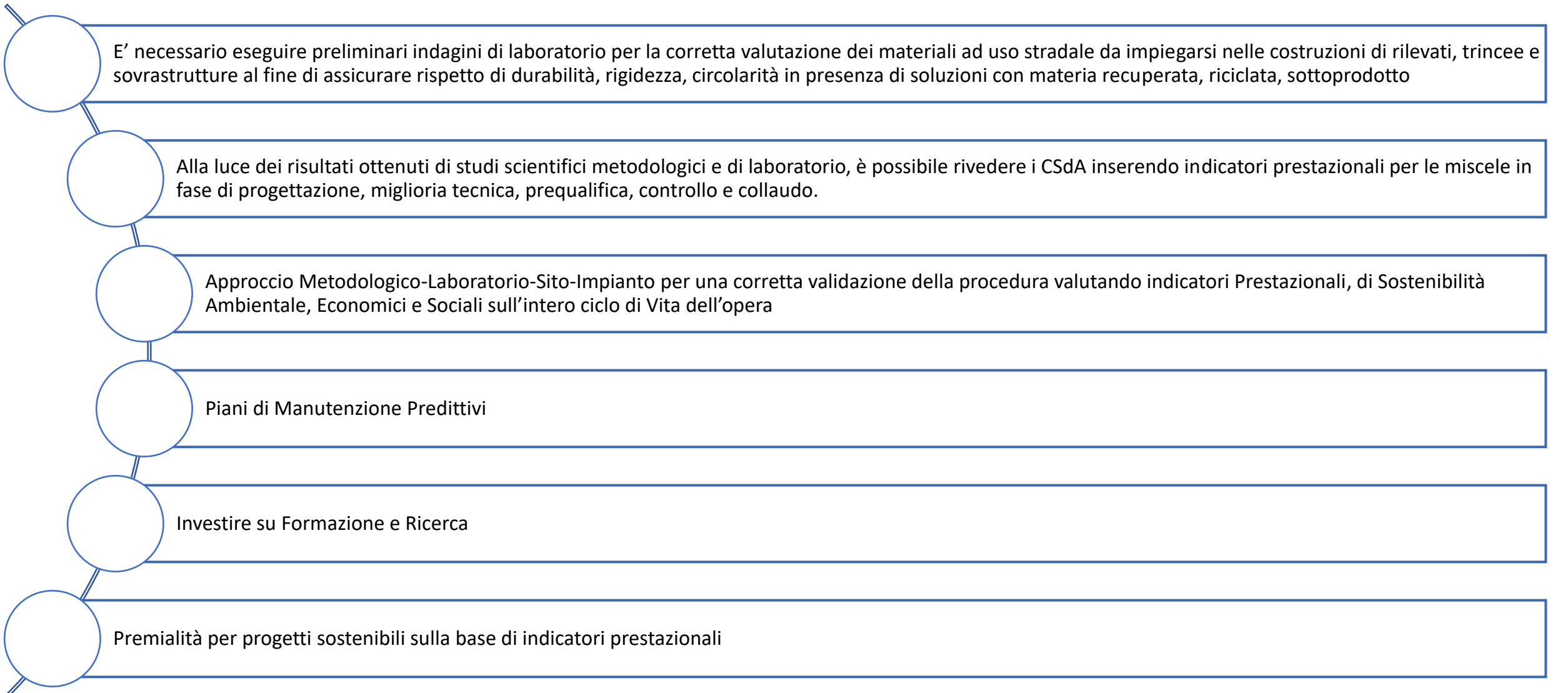
B. Stoccaggio e conferimento a impianto mobile (Art. 208)

- Impianto mobile autorizzato ai sensi dell'Art. 208 D.Lgs. 152/2006
- Autorizzazione in deroga rilasciata dalla Regione con durata e sito definiti
- Fresato trattato in situ: granulazione, selezione granulometrica, certificazione
- Area dedicata con pavimentazione impermeabile, vasche di raccolta acque
- Riduzione costi di trasporto; prodotto finito usabile nel cantiere stesso

C. Reimpiego diretto in situ (riciclaggio a freddo)

- Il fresato non lascia il cantiere: lavorato e reimpiegato direttamente
- Tecnologia: treno di riciclaggio (fresatrice + stabilizzatrice + compattatori)
- Applicabile a strati di base e fondazione; non richiede impianto separato
- Vincoli: caratterizzazione RAP preventiva obbligatoria; dosaggio emulsione critico
- Massima efficienza logistica; CO₂ minima; gestione rifiuti assente

CONCLUSIONI



E' necessario eseguire preliminari indagini di laboratorio per la corretta valutazione dei materiali ad uso stradale da impiegarsi nelle costruzioni di rilevati, trincee e sovrastrutture al fine di assicurare rispetto di durabilità, rigidezza, circolarità in presenza di soluzioni con materia recuperata, riciclata, sottoprodotto

Alla luce dei risultati ottenuti di studi scientifici metodologici e di laboratorio, è possibile rivedere i CSdA inserendo indicatori prestazionali per le miscele in fase di progettazione, miglioria tecnica, prequalifica, controllo e collaudo.

Approccio Metodologico-Laboratorio-Sito-Impianto per una corretta validazione della procedura valutando indicatori Prestazionali, di Sostenibilità Ambientale, Economici e Sociali sull'intero ciclo di Vita dell'opera

Piani di Manutenzione Predittivi

Investire su Formazione e Ricerca

Premialità per progetti sostenibili sulla base di indicatori prestazionali

Il recupero dei materiali da demolizione: dalla progettazione alla gestione

La filiera virtuosa per le costruzioni stradali con fresato: dal laboratorio al cantiere

Grazie per l'attenzione

Prof.ssa Ing. Francesca Russo

Responsabile tecnico-scientifico Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti

francesca.russo2@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II

Ing. Nunzio Viscione

Funzionario Tecnico Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti

nunzio.viscione@unina.it

Università degli Studi di Napoli Federico II