

**I** CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI **INGEGNERI**



**CONVEGNI IN MODALITÀ ON LINE**  
**MODULO 1 - Mercoledì 21 febbraio 2024, ore 15.00 - 18.00**  
**Materiali e Tecnologie**  
**per Pavimentazioni Stradali Sostenibili**

## **Criteria Tecnico-Economici e di Sostenibilità del Ciclo di Vita delle Pavimentazioni Stradali**

***Prof.ssa Ing. Francesca Russo***

Responsabile tecnico-scientifico del Laboratorio di strade Luigi Tocchetti

Università degli Studi di Napoli Federico II

francesca.russo2@unina.it



# Procedura per la definizione di soluzioni sostenibili di miscele in conglomerato bituminoso



Caratterizzazione fisico-meccanica delle miscele



Verifica dello stato tenso-deformativa della pavimentazione



Costruzione di curve di degrado per specifici indicatori di stato  
(manutenzione predittiva vs manutenzione preventiva)



Valutazione della sostenibilità ambientale delle soluzioni sull'intero ciclo di vita  
(LCA)



Valutazione della sostenibilità economica delle soluzioni sull'intero ciclo di vita



Analisi comparative delle soluzioni

# Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36 Codice dei contratti pubblici

in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici

## Art. 41. (Livelli e contenuti della progettazione)

### 1. La progettazione in materia di lavori pubblici, si articola in due livelli di successivi approfondimenti tecnici:

il progetto di fattibilità tecnico-economica e il progetto esecutivo. Essa è volta ad assicurare:

- a) il soddisfacimento dei fabbisogni della collettività;
- b) la conformità alle norme ambientali, urbanistiche e di tutela dei beni culturali e paesaggistici, nonché il rispetto di quanto previsto dalla normativa in materia di tutela della salute e della sicurezza delle costruzioni;
- c) la rispondenza ai requisiti di qualità architettonica e tecnico-funzionale, nonché il rispetto dei tempi e dei costi previsti;
- d) il rispetto di tutti i vincoli esistenti, con particolare riguardo a quelli idrogeologici, sismici, archeologici e forestali;
- e) l'efficientamento energetico e la minimizzazione dell'impiego di risorse materiali non rinnovabili nell'intero ciclo di vita delle opere;
- f) il rispetto dei principi della sostenibilità economica, territoriale, ambientale e sociale dell'intervento, anche per contrastare il consumo del suolo, incentivando il recupero, il riuso e la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente e dei tessuti urbani;
- g) la razionalizzazione delle attività di progettazione e delle connesse verifiche attraverso il progressivo uso di metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni di cui all'art.43;
- h) l'accessibilità e l'adattabilità secondo quanto previsto dalle disposizioni vigenti in materia di barriere architettoniche;
- i) la compatibilità geologica e geomorfologica dell'opera.

## **Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36** Codice dei contratti pubblici

in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici

### **Art. 41. (Livelli e contenuti della progettazione)**

#### **6. Il progetto di fattibilità tecnico-economica:**

- a) individua, tra più soluzioni possibili, quella che esprime il rapporto migliore tra costi e benefici per la collettività in relazione alle specifiche esigenze da soddisfare e alle prestazioni da fornire;
- b) contiene i necessari richiami all'eventuale uso di metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni;
- c) sviluppa, nel rispetto del quadro delle necessità, tutte le indagini e gli studi necessari per la definizione degli aspetti di cui al comma;
- d) individua le caratteristiche dimensionali, tipologiche, funzionali e tecnologiche dei lavori da realizzare, compresa la scelta in merito alla possibile suddivisione in lotti funzionali;**
- e) consente, ove necessario, l'avvio della procedura espropriativa;
- f) contiene tutti gli elementi necessari per il rilascio delle autorizzazioni e approvazioni prescritte;
- g) contiene il piano preliminare di manutenzione dell'opera e delle sue parti.**

## **Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36** Codice dei contratti pubblici

in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici

### **Art. 41. (Livelli e contenuti della progettazione)**

#### **8. Il progetto esecutivo, in coerenza con il progetto di fattibilità tecnico-economica:**

- a) sviluppa un livello di definizione degli elementi tale da individuarne compiutamente la funzione, requisiti, la qualità e il prezzo di elenco;
- b) è corredato del piano di manutenzione dell'opera per l'intero ciclo di vita e determina in dettaglio i lavori da realizzare, il loro costo e i loro tempi di realizzazione;**
- c) se sono utilizzati metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni, sviluppa un livello di definizione degli oggetti rispondente a quanto specificato nel capitolato informativo a corredo del progetto.

### **Art. 116. (Collaudo e verifica di conformità)**

---

#### **10. Al termine del lavoro sono redatti:**

.....

- b) **l'aggiornamento del piano di manutenzione** e della eventuale modellazione informativa dell'opera realizzata di cui all'articolo 43 **per la successiva gestione del ciclo di vita;**

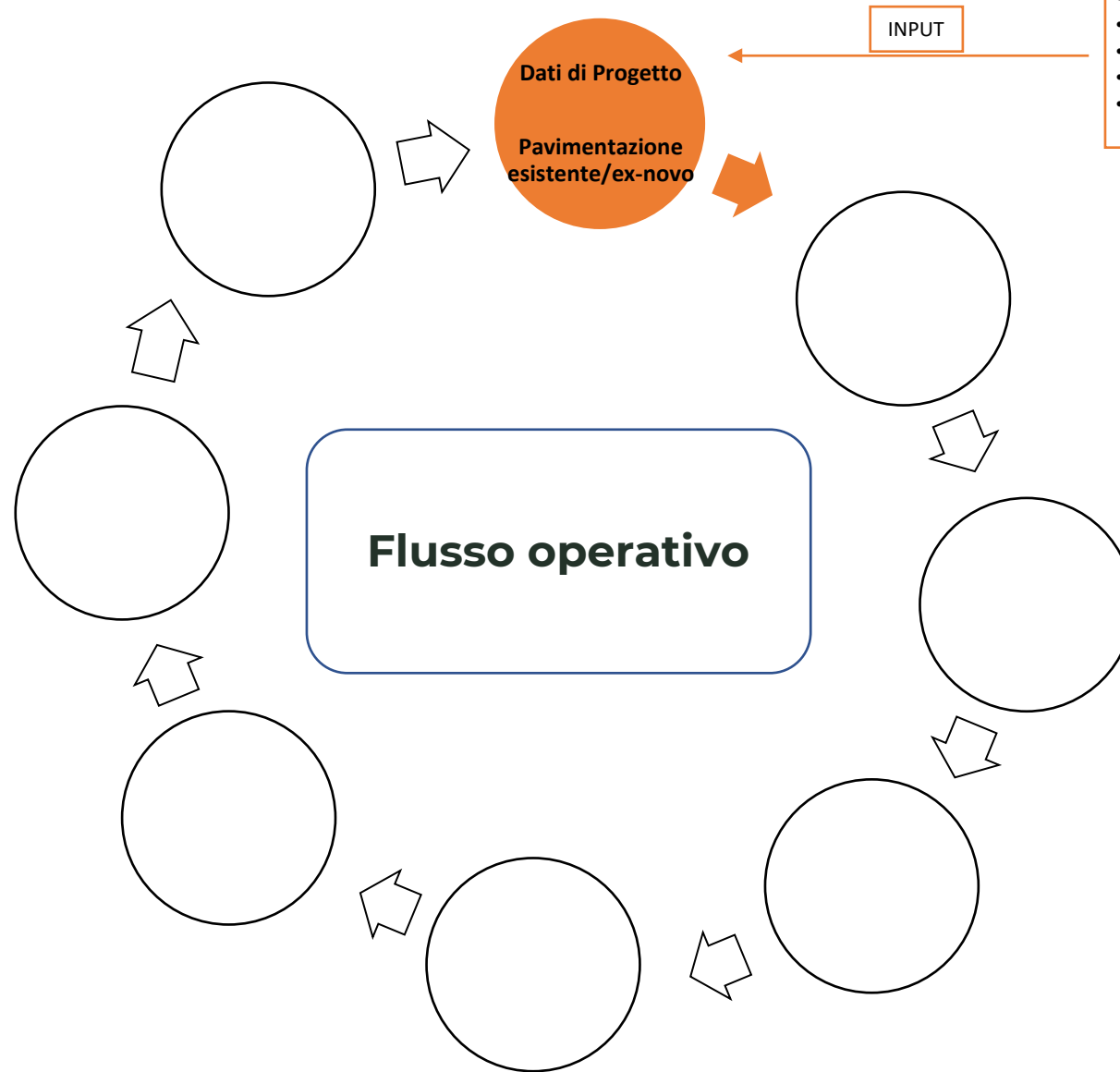
## **Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36** Codice dei contratti pubblici

in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici

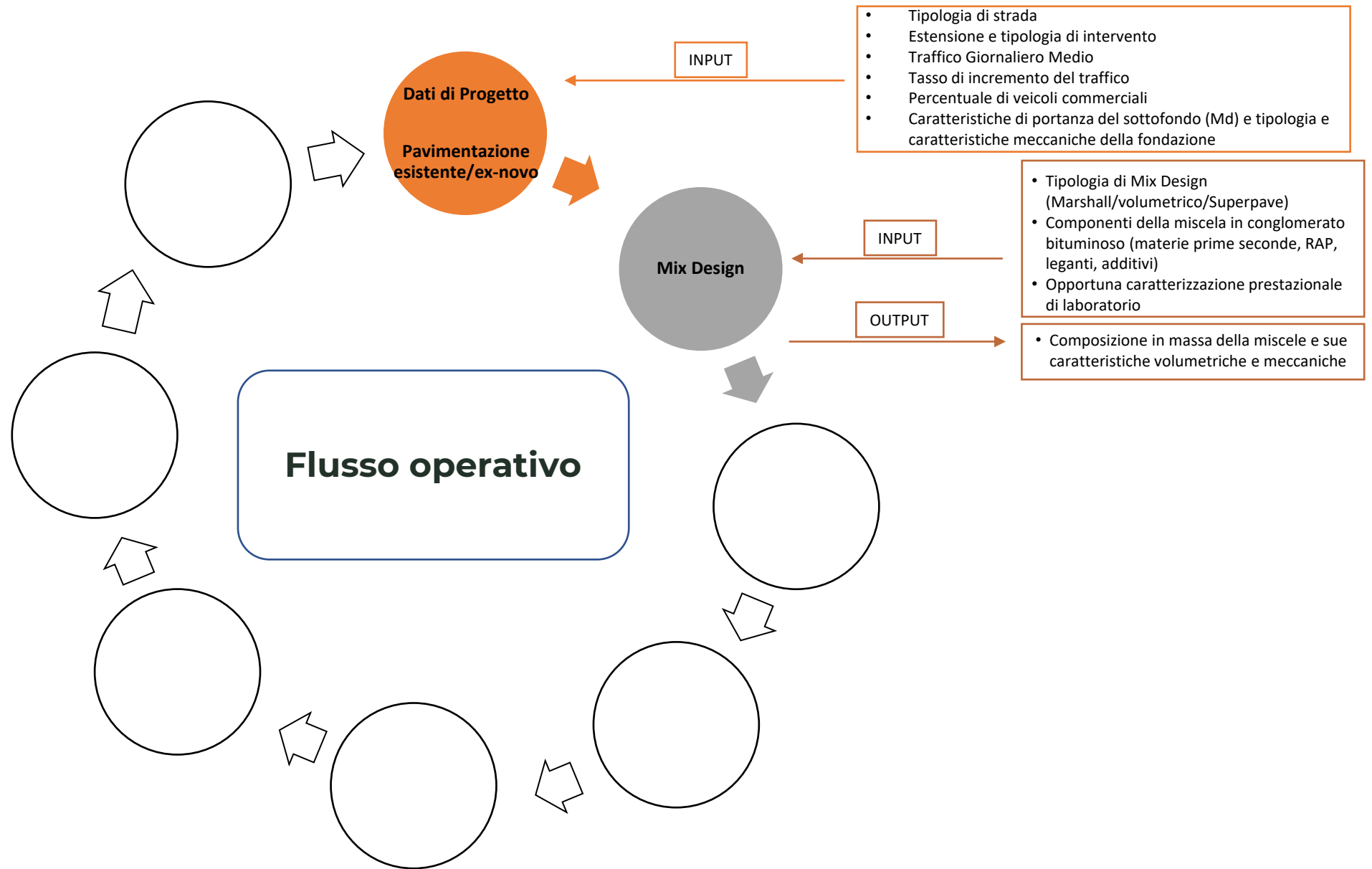
### **Art. 57. (Clausole sociali del bando di gara e degli avvisi e criteri di sostenibilità energetica e ambientale)**

2. Le stazioni appaltanti e gli enti concedenti contribuiscono al conseguimento degli obiettivi ambientali previsti dal Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione **attraverso l'inserimento, nella documentazione progettuale e di gara, almeno delle specifiche tecniche e delle clausole contrattuali contenute nei criteri ambientali minimi**, definiti per specifiche categorie di appalti e concessioni, differenziati, ove tecnicamente opportuno, anche in base al valore dell'appalto o della concessione, con decreto del Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica e conformemente, in riferimento all'acquisto di prodotti e servizi nei settori della ristorazione collettiva e fornitura di derrate alimentari, anche a quanto specificamente previsto dall'articolo 130.

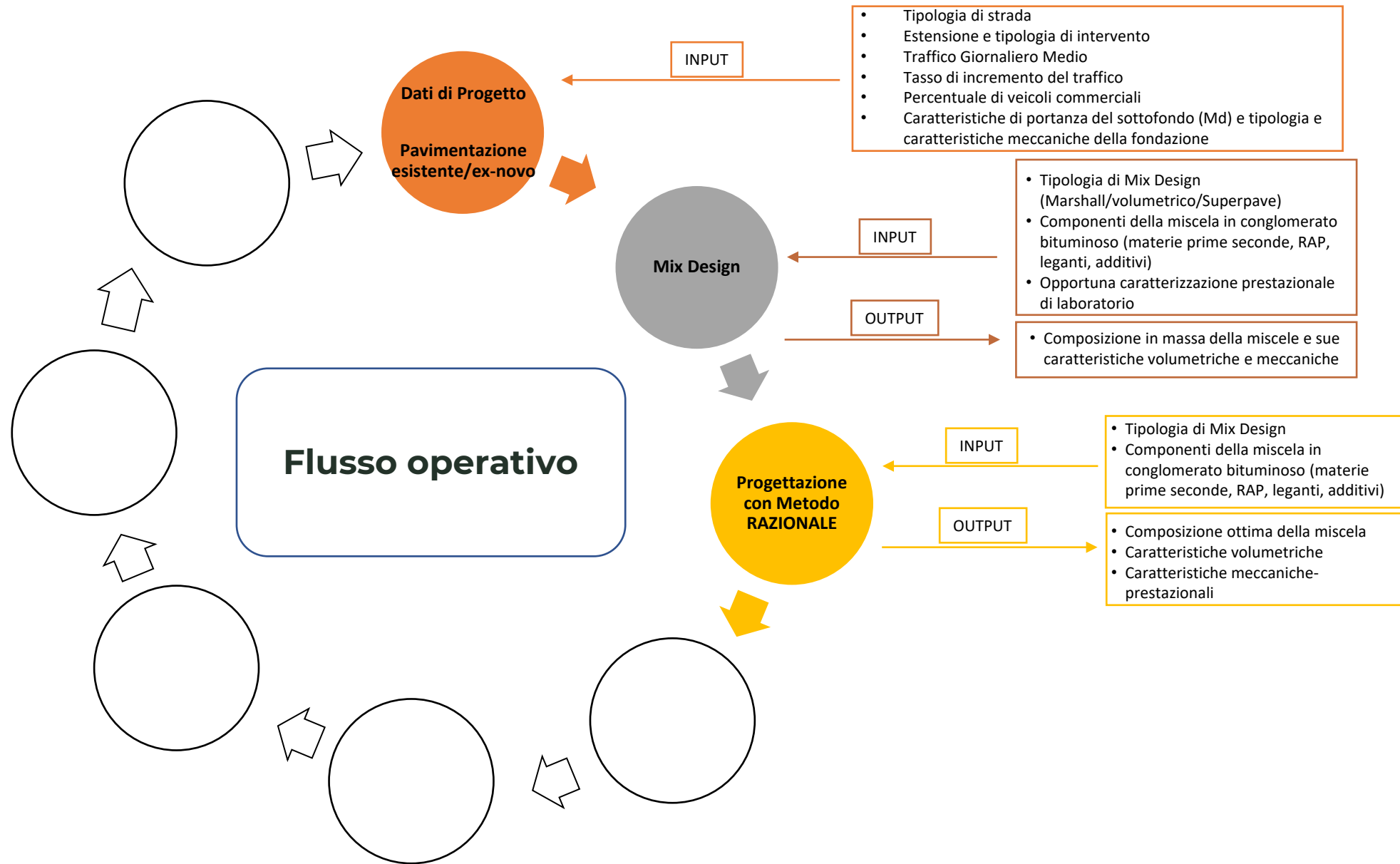
**Tali criteri, in particolare quelli premianti, sono tenuti in considerazione anche ai fini della stesura dei documenti di gara per l'applicazione del criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, ai sensi dell'articolo 108, commi 4 e 5. Le stazioni appaltanti valorizzano economicamente le procedure di affidamento di appalti e concessioni conformi ai criteri ambientali minimi.....**

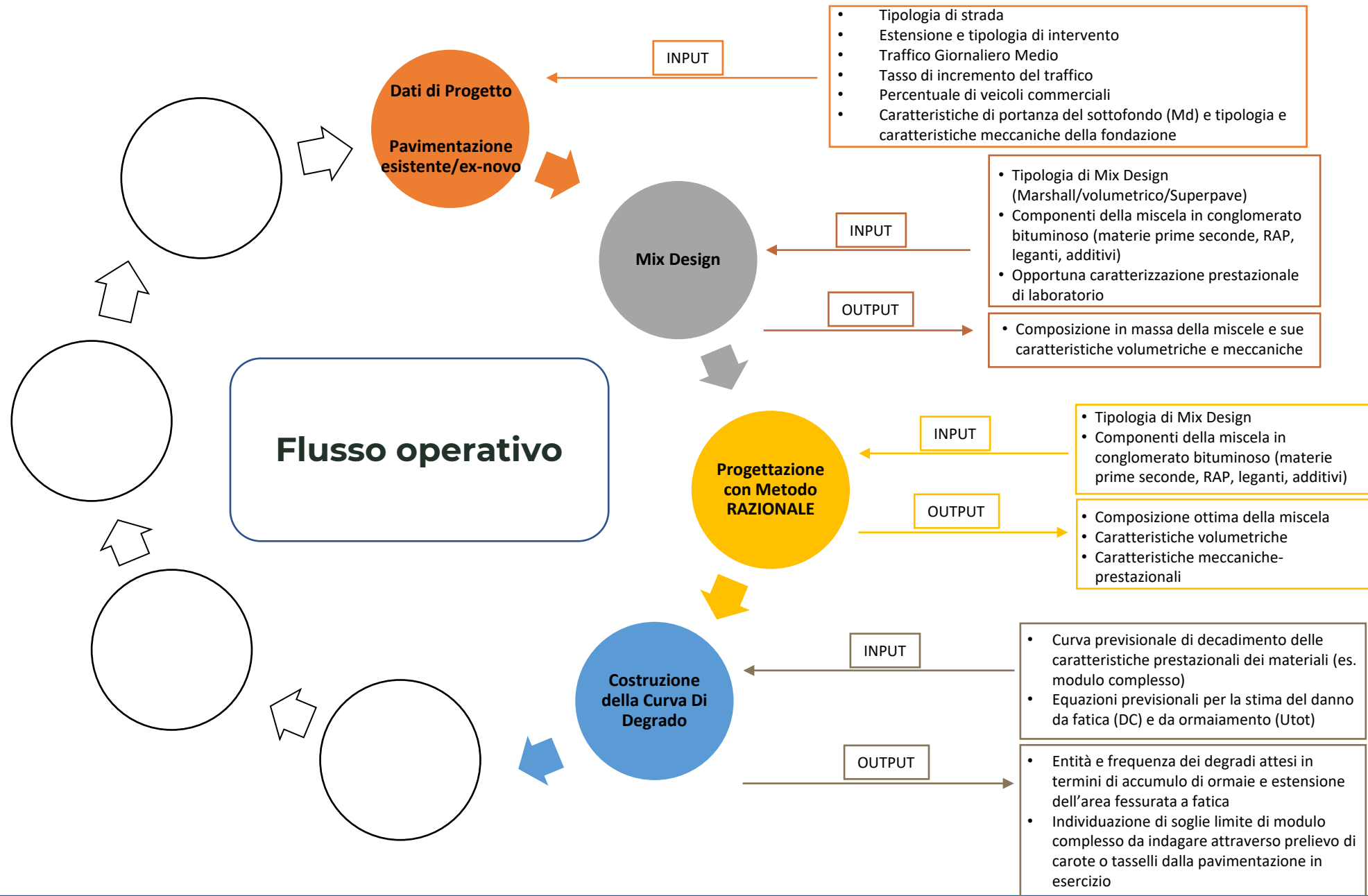


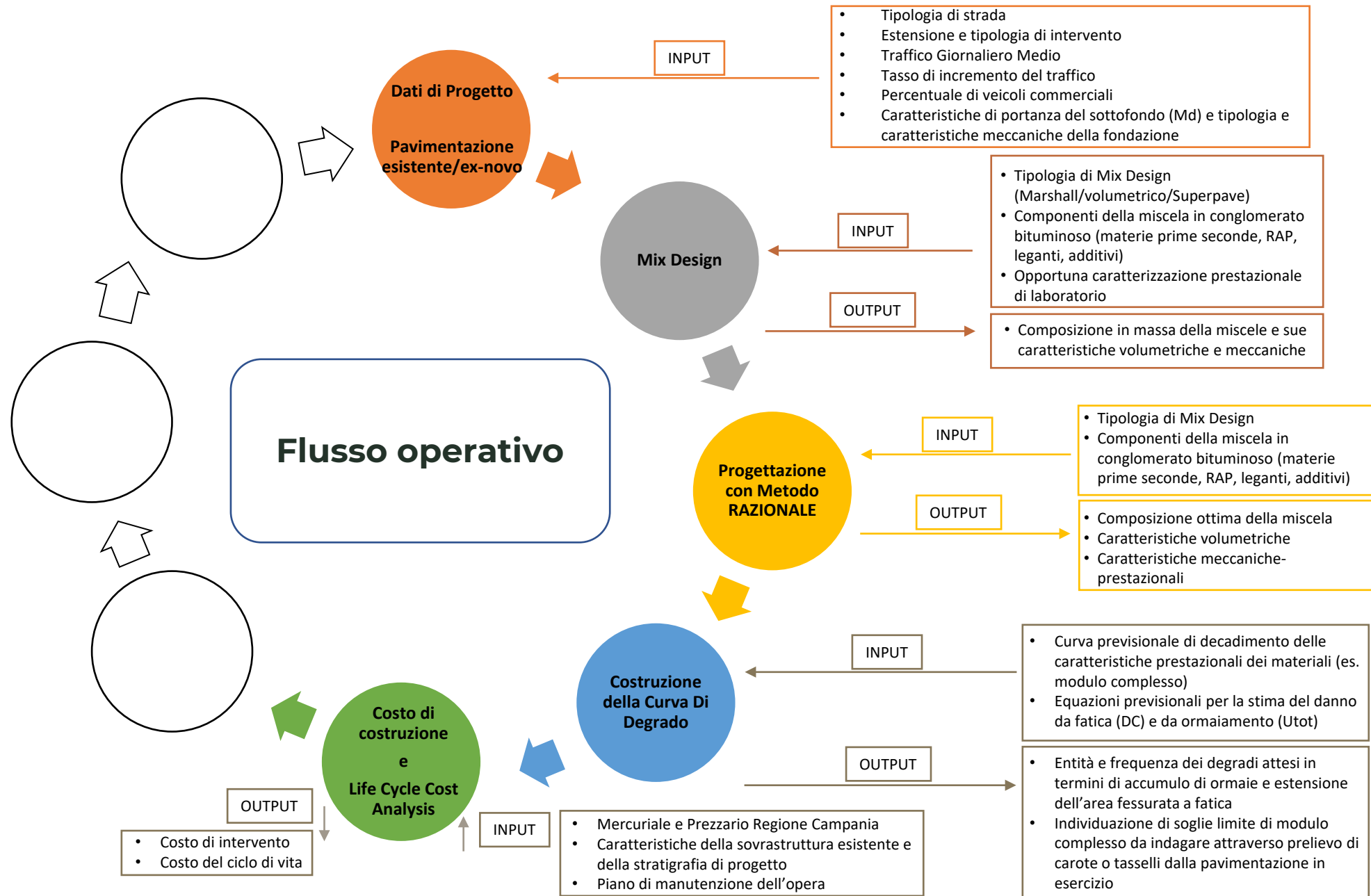
- Tipologia di strada
- Estensione e tipologia di intervento
- Traffico Giornaliero Medio
- Tasso di incremento del traffico
- Percentuale di veicoli commerciali
- Caratteristiche di portanza del sottofondo (Md) e tipologia e caratteristiche meccaniche della fondazione

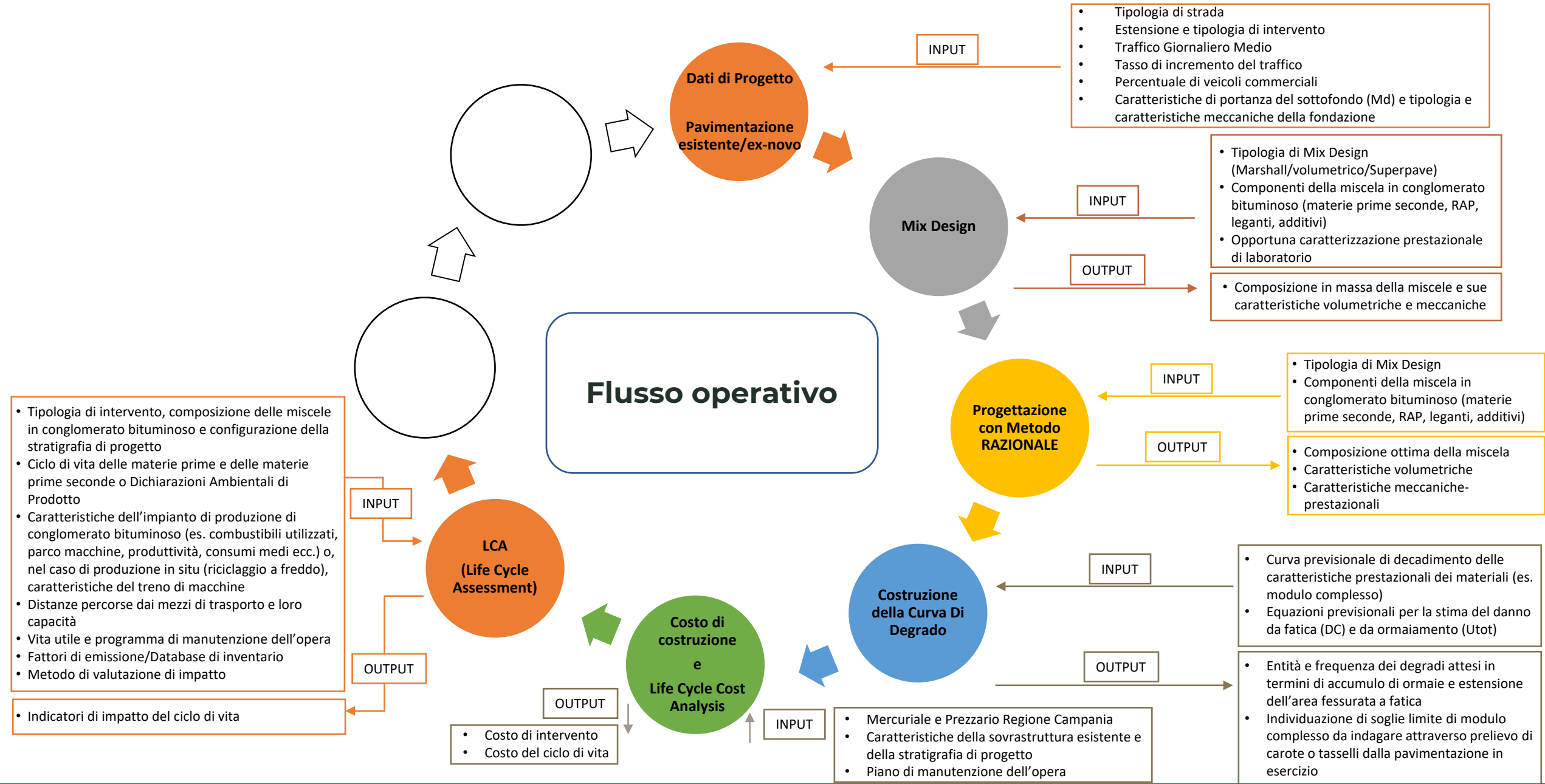


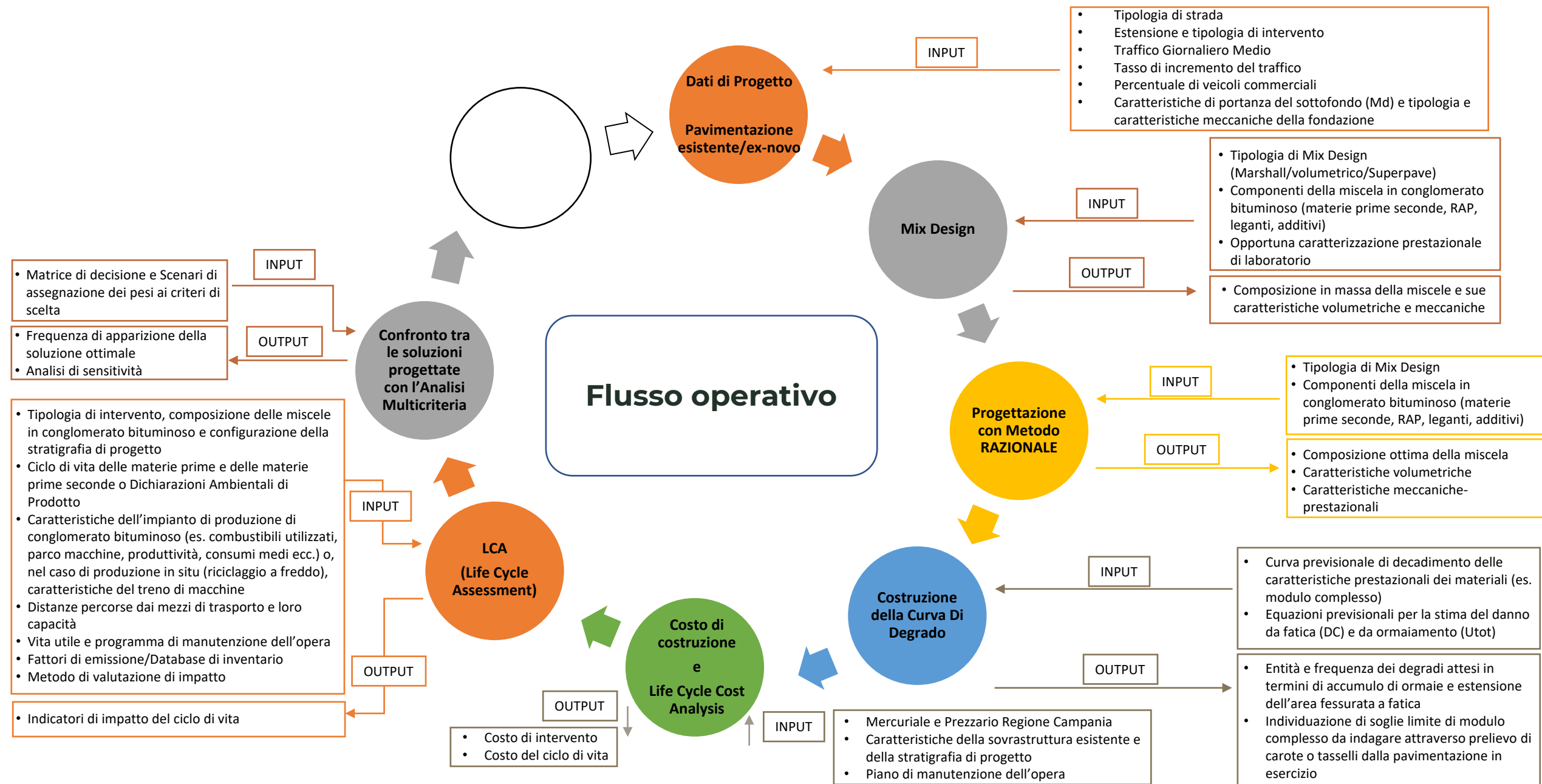


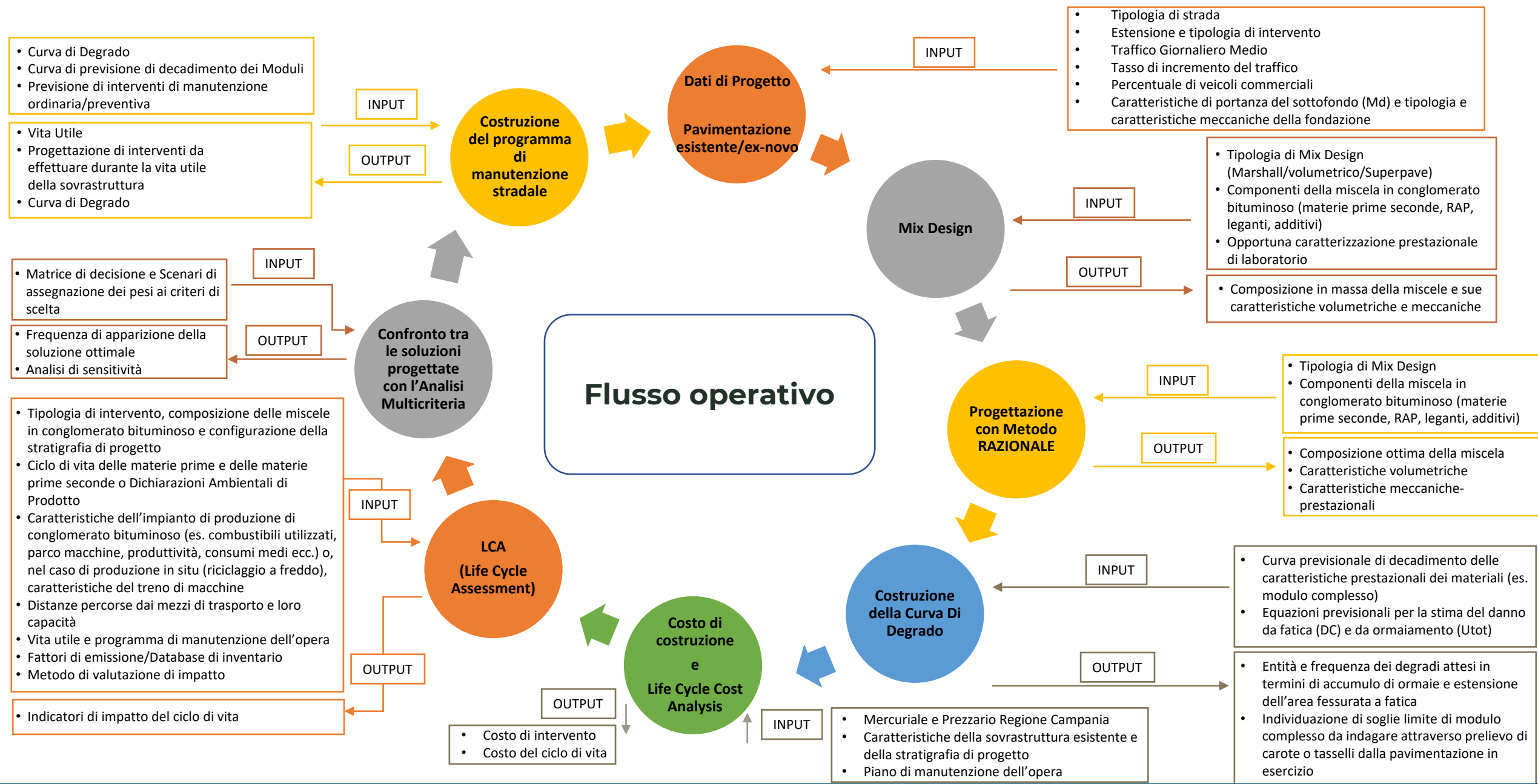












# Mix Design e caratterizzazione sperimentale

## Metodologia di Analisi

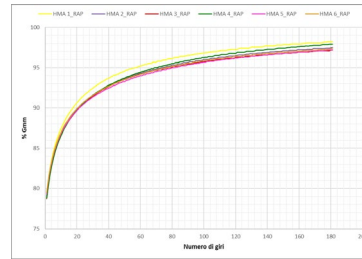
Processo per mix design



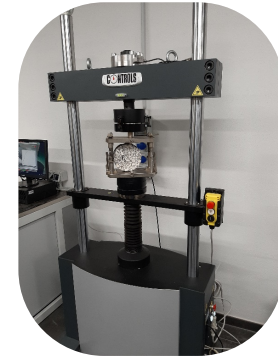
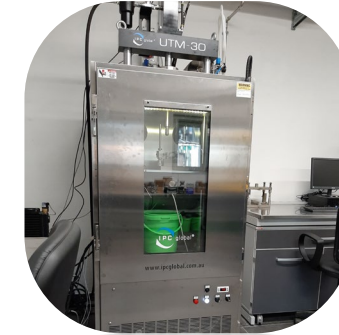
Progettazione con metodo volumetrico

Analisi del grado di compattazione

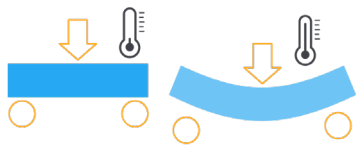
Analisi della Lavorabilità



$$CEI = \int_{N_1}^{N_3} a + b \ln(x)$$



Analisi delle prestazioni meccaniche



Moisture damage



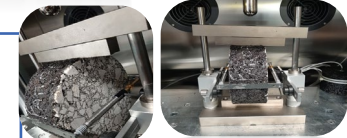
Resistenza all'acqua e Trazione indiretta (ITS - ITSr)  
(EN 12697-23 - EN 12697-12)  
Con calcolo dell'energia di frattura

Cracking



Innesco della frattura

Fatigue Test in configurazione di trazione indiretta  
(EN 12697-24-Annex E)



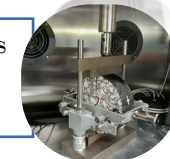
Propagazione della frattura

Semi Circular Bending Test (SCB)  
(EN 12697-44)



Stiffness

Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) @10,20,40,60°C  
(EN 12697-26 - Annex C)



Rutting

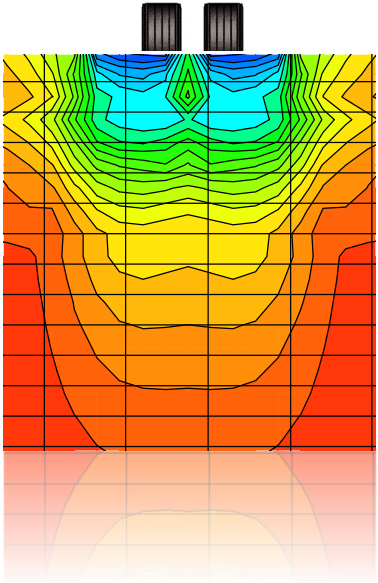


Suscettibilità alle deformazioni sotto traffico

Wheel Tracker test @60°C  
(EN 12697-22)



# Approccio razionale nel calcolo tenso-deformativo delle pavimentazioni (multistrato elastico)



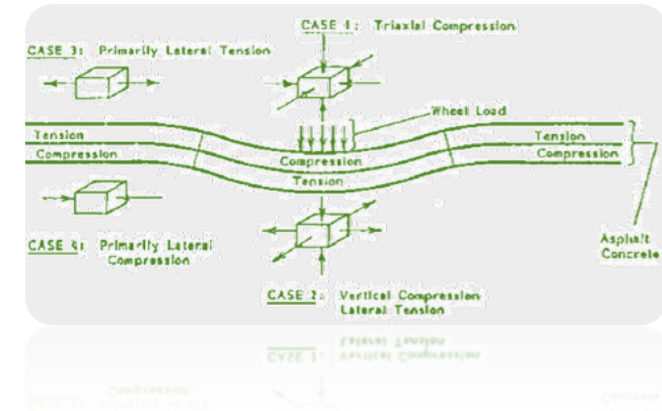
- **Verticali**

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.

$$\tau_{Max} \leq 5 \text{ Kg/cm}^2$$

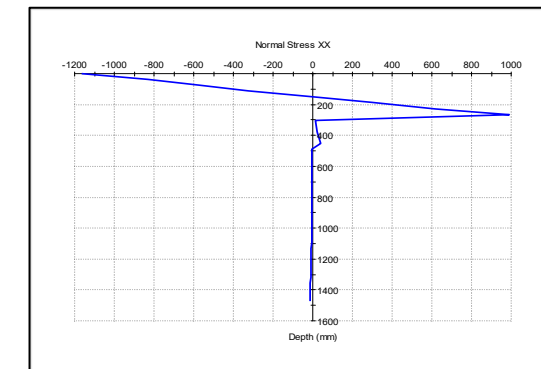
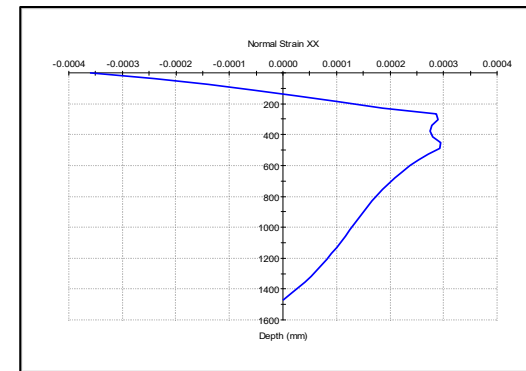


Modulo complesso  $E^*$ , coefficiente di Poisson complesso  $\nu^*$  per le miscele in conglomerato bituminoso

Modulo  $E_{Sottofondo}$  e  $E_{Fondazione}$ , coefficiente di Poisson  $\nu$  per gli strati non legati

Raggio dell'area d'impronta

Aderenza tra gli strati

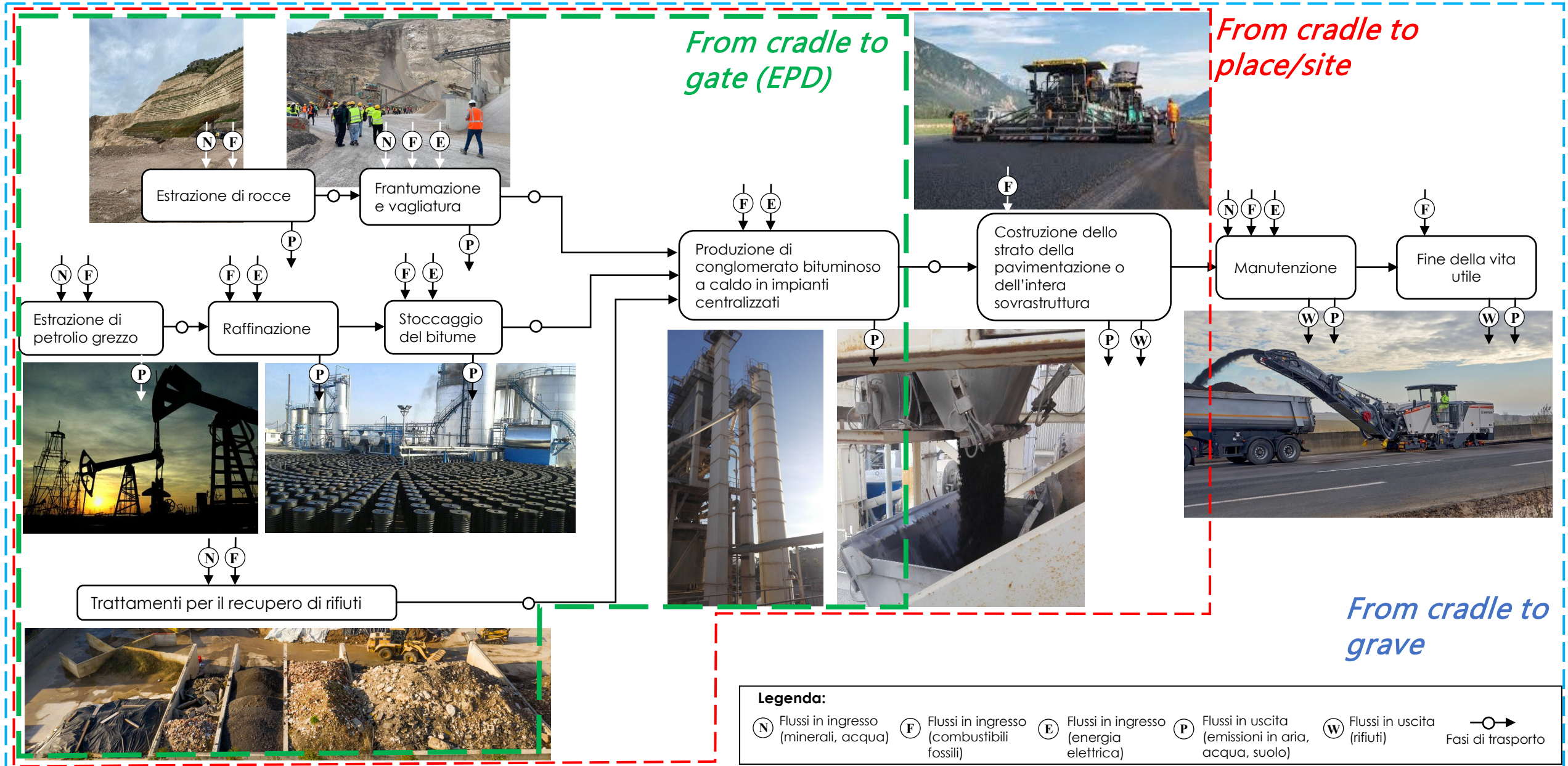




# Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA

La Valutazione del ciclo di vita (LCA) è una metodologia standardizzata internazionalmente dalle UNI EN 14040-14044





TIPOLOGIA	FONTE	VALORE
Quantità di materie prime	Laboratorio – Impianto di produzione	% di ciascuna pezzatura di inerti e % di bitume ottima
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 dozer: 400 m <sup>3</sup> /h Produttività escavatori: 210 m <sup>3</sup> /h Produttività dumper: 143 m <sup>3</sup> /h
Consumi energetici durante la produzione di inerti calcarei e basaltici	Impianti di frantumazione e vagliatura di inerti	2.9 kWh/t (calcarei) 5.9 kW/t (basalti)
Consumi energetici durante il trattamento e la riduzione granulometrica dei rifiuti da costruzione e demolizione	Impianti di trasformazione di rifiuti in materie prime seconde	9.03 MJ/t
Consumi elettrici e di gas naturale durante la produzione di miscele in conglomerato bituminoso	Impianto di produzione di conglomerato bituminoso	Consumo di gas naturale: 8.8 m <sup>3</sup> /t Consumo di elettricità: 4.4 kWh/t
Macchinari e produttività delle operazioni di produzione del conglomerato bituminoso a caldo	Impianto di produzione di conglomerato bituminoso	Produttività delle pale meccaniche: 435 m <sup>3</sup> /h
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)
Capacità dei veicoli per il trasporto di materiali	Multiple	Variabile
Macchinari e produttività delle operazioni di demolizione della pavimentazione	Imprese di costruzioni stradali	Produttività fresatrice: 150 t/h
Distanze percorse durante il trasporto di materiali	-	bitume (450 Mn nave + 22 km strada); Aggregati (60 km); miscele in c.b. (25 km); CDW e PW (35 km)

TIPOLOGIA		Metodo
a) Stima dei consumi di combustibile di macchine operatrici	$LMHP = \frac{k \cdot GHP \cdot LF}{KPL}$	LMHP è il consumo di combustibile espresso in [l/h] k è il consumo specifico del motore espresso in [kg/(hp h)] GHP è la potenza nominale del motore [hp] LF è il fattore di carico della macchina KPL è il peso specifico del combustibile espresso in [kg/l]
b) Stima della produttività di macchine operatrici	$Produttività = \frac{Volume\ lavorato \cdot OE}{CT}$	Volume lavorato = capacità al colmo OE efficienza operativa (operational efficiency) [min/h] CT tempo di ciclo (cycle time) [s]
c) Stima dei consumi di combustibile dei mezzi di trasporto	$C = \sum_i n^{\circ}viaggi_i \cdot C_{1i}$	C è il consumo di carburante dei mezzi di trasporto i sono le materie prime, i conglomerati bituminosi e i rifiuti C <sub>1</sub> è il consumo unitario di carburante per t/km, distinto in consumo di carburante a pieno carico ( <i>viaggio di andata</i> ), e consumo di carburante a cassone vuoto ( <i>viaggio di ritorno</i> )

# Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA

Esempio: Produzione in impianto di 1 t di miscela in conglomerato bituminoso tradizionale a caldo

## Processi unitari

Caricamento del bitume nei silos di stoccaggio

Movimentazione di aggregati dai punti di stoccaggio all'impianto

Essiccazione e riscaldamento di aggregati nel tamburo essiccatore

Immissione del bitume al mescolatore

Immissione di filler al mescolatore

Miscelazione del conglomerato

Dati (verifica sussistenza di dati primari e/o secondari)

- **Tipologia di ciascuna macchina operatrice coinvolta nel processo unitario** (modello, vita utile, potenza, frequenza di manutenzione ecc.)

Occorre una stima od una misura diretta del **consumo di carburante complessivo per le quantità di materiale movimentato o per ora di lavoro**

In alternativa si procede, per arrivare alla valutazione del consumo di carburante, attraverso l'analisi della produttiva della macchina (**ore di lavoro** complessive o per unità funzionale (tonnellata miscela nel caso di studio o mc di materiale/ pezzatura movimentata)

## Scheda di Inventario del processo unitario

Dati Ecoinvent 3.0 per 1 h di lavoro di una macchina operatrice di specificata potenza, fattore di carico medio e proprio consumo unitario di carburante

Si costruisce il database per ciascun processo unitario

Documentazione	Input/Output	Parametri	Descrizione c.
Input noti da natura (risorse)		Sottocompartimento	
Oxygen		in air	
Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)		Quantità fisica	Unità di m
Building machine (GLO) market for [ Cut-off, U		4.4943048989011]	p
Diesel (GLO) market group for [ Cut-off, U		7.8434640469479]	kg
Lubricating oil (RER) market for lubricating oil [ Cut-off, U		0.0300242212607]	kg
Lubricating oil (RoW) market for lubricating oil [ Cut-off, U		0.1425319877721]	kg
Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)			
Emissioni nell'aria		Sottocompartimento	
Acenaphthene			
Acenaphthylene			
Acetaldehyde			
Acrolein			
Ammonia			
Anthracene			
Benzene			
Benzene, ethyl-			
Benzo(a)anthracene			
Benzo(a)pyrene			

# Impatti ambientali del ciclo di vita - LCA

CATEGORIA DI IMPATTO AMBIENTALE	DESCRIZIONE	UNITÀ DI MISURA	FLUSSI DI INVENTARIO PRINCIPALI
<i>Potenziale di Riscaldamento globale</i>	Fenomeno osservato in misurazione della temperatura che mostra in media un aumento della temperatura dell'atmosfera terrestre e degli oceani negli ultimi decenni.	kg CO <sub>2</sub> eq.	CO <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>
Riduzione dello strato di ozono	Effetti negativi dipendenti dalla riduzione di capacità di protezione dello strato di ozono contro le radiazioni ultraviolette del sole.	kg. CFC-11 eq.	N <sub>2</sub> O, Clorofluorocarburi
Formazione di smog fotochimico	Formazione di precursori dall'inquinamento fotochimico. L'impatto della luce solare naturale su quei precursori, causa la formazione di una serie di composti noti come ossidanti fotochimici (ad esempio Ozono-O <sub>3</sub> ).	kg. NO <sub>x</sub> eq.	NO <sub>x</sub> , NMVOC
<i>Formazione di particolato</i>	Formazione di inquinamento atmosferico costituito da particelle di dimensioni inferiori a 2.5 micrometri che comportano effetti negativi sulla salute umana	kg. PM2.5 eq.	Ammoniaca, NO <sub>x</sub> , PM2.5, SO <sub>2</sub>
Eutrofizzazione	Crescita eccessiva della popolazione di alghe per l'arricchimento artificiale dei fiumi e delle riserve idriche in conseguenza all'uso massivo di fertilizzanti e detersivi. Questo porta ad un alto consumo dell'ossigeno nelle acque.	kg. P eq. kg N eq.	Fosforo, fosfati, azoto, ammoniaca, NO <sub>2</sub>
Acidificazione	Perdita della capacità di neutralizzazione del suolo e dell'acqua come conseguenza degli ossidi di zolfo e di azoto scaricati nell'atmosfera che ritornano in superficie sotto forma di acidi.	kg SO <sub>2</sub> eq.	NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>
<i>Ecotossicità (acque dolci, marine e terrestre)</i>	Impatto delle sostanze tossiche emesse nell'ambiente sugli organismi d'acqua dolce, marina e terrestri in termini di tossicità acuta o cronica.	kg 1,4-DCB eq.	1,4 DCB, Metalli e altre sostanze cancerogene
<i>Tossicità umana (carcinogenica e non)</i>	Impatto sulla salute umana delle sostanze tossiche emesse nell'ambiente.	kg 1,4-DCB eq.	1,4 DCB, Metalli e altre sostanze cancerogene

# Valutazione dei costi del ciclo di vita - LCCA

Definizione dell'obiettivo

Identificazione delle componenti di costo

Acquisizione dei dati per unità funzionale

Calcolo indicatore di LCCA

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

- $C_{CON}$ : costo di costruzione
- $C_M$ : costo di manutenzione attualizzato
- $C_{EOL}$ : costo di fine vita attualizzato

$$NPV = C_0 + \sum_{k=1}^T \frac{C_k}{(1+i)^k}$$

- $C_0$ : costo presente
- $C_k$ : costo futuro
- $T$ : periodo di analisi
- $i$ : discount rate
- $k$ : anno di riferimento
- $S$ : valore residuo al termine del periodo di analisi

# Valutazione dei costi del ciclo di vita - LCCA

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



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

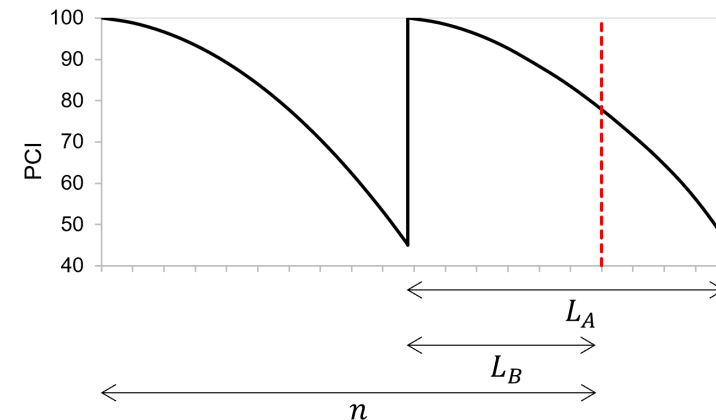
$$C_{(PV)}^M = \sum_{i=1}^a \left[ Q_i^A \cdot \left( \sum_{j=1}^b Q_{i,j}^M \cdot C_j^M + \sum_{k=1}^c \frac{Q_i^A}{P_{i,k}^E} \cdot C_k^E + \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{Q_i^A}{P_{i,k,l}^E} \cdot n_l^W \cdot C_l^W \right) \right] \cdot m_i \cdot \frac{1}{(1+r)^{n_i}}$$

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

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

## 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)







CONFRONTO SOLUZIONI  
PROGETTUALI

# Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

1 Definizione della **matrice di decisione**

	ALTERNATIVA		
	1	...	n
Indicatori di stato	IS <sub>1,1</sub>		IS <sub>1,n</sub>
	⋮		⋮
Costo del ciclo di vita	C <sub>1</sub>		C <sub>n</sub>
Impatti ambientali del ciclo di vita	IA <sub>1,1</sub>		IA <sub>1,n</sub>
	⋮		⋮
	IA <sub>m,1</sub>		IA <sub>m,n</sub>

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)

$$n_{ij} = \frac{\text{Normalizzazione di indicatori a massimizzare } a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}{\max_i a_{i,j} - \min_i a_{i,j}} \quad n_{ij} = 1 - \frac{\text{Normalizzazione di indicatori a minimizzare } a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}{\max_i a_{i,j} - \min_i a_{i,j}}$$

4 Definizione di un **vettore dei pesi**

5 Definizione metodo

# Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

MATRICE NORMALIZZATA				
Criteri	Alternative			
	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4
DC	0.600	1	0	0.329
Utot	0	0.947	0.684	1
Vita utile	0	1	0	0
GWP	0.946	0	0.765	1
POCP	0	0	0.857	1
AP	1	0	0.676	0.919
EP	0.4	0	0.88	1
TSP	0.002	0	0.999	1
Risorse ener. Primar. non rinnovabili	1	0	0.731	0.947
Risorse energ. Secon. non rinnovabili	0.436	0	0.874	1
Consumo di risorse - acqua	1	0.164	0	0.168
Consumo di risorse - bitume	0	0.091	0.909	1
Consumo di risorse - minerali	0	0	1	0.996
Rifiuti non pericolosi	0	0	1	1
Costo del ciclo di vita dell'intervento	0.301	0	0.938	1

INFLUENZA DEL DECISORE E CONTETSI DI SCLTA- Analisi di Sensitività attraverso una variazione della matrice dei pesi																									
Criteri	Scenario 1	Scenario 2															Scenario 3			Scenario 4					
	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	2	3	1	2	3	4	5	6
DC	6%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	23%	8%	2%	3%	10%	9%	13%	5%	2%
Utot	6%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	23%	8%	2%	3%	10%	9%	13%	5%	2%
Vita utile	6%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	23%	8%	2%	3%	10%	9%	13%	5%	2%
GWP	6%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
POCP	6%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
AP	6%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
EP	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
TSP	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Ris. ener. prim. non rinnovabili	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Ris. ener. secon. non rinnovabili	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Consumo di risorse - acqua	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Consumo di risorse - bitume	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Consumo di risorse - minerali	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Rifiuti non pericolosi	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	3%	2%	6%	2%	7%	5%	6%	4%	7%	7%
Costo del ciclo di vita dell'intervento	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	50%	2%	8%	70%	10%	14%	3%	9%	2%	5%

# Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

MULTIPOL

TOPSIS

ELECTRE

$$U_j = \sum_k w_k \cdot n_{i,k,j}$$

$w_k$  · è il valore del peso appartenente al k-esimo criterio  
 $n_{i,k,j}$  è il valore normalizzato della i-esima misura appartenente al k-esimo criterio con riferimento alla j-esima soluzione progettata

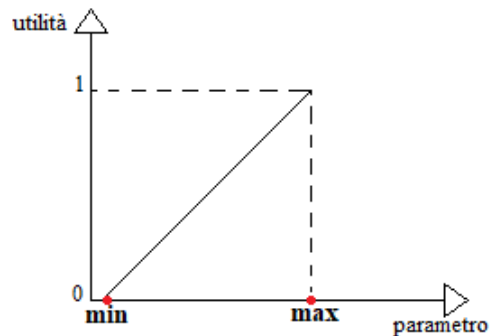
$U_j$  utilità alternativa

## ANALISI DI SENSITIVITA'

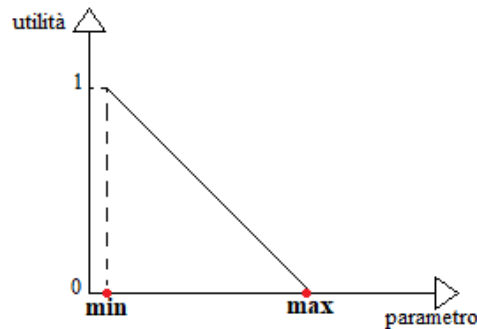
Dal posizionamento dei punti si individuano 4 zone:

- ❑ **zona A:** zona delle soluzioni che ci interessano, in quanto hanno media alta e varianza bassa;
- ❑ **zona C:** la varianza è bassa ma lo è anche la media, quindi le scartiamo;
- ❑ **zone B e D:** hanno alte varianze, dunque sono soluzioni molto sensibili alla variazione dei parametri, e per tale motivo vanno scartate

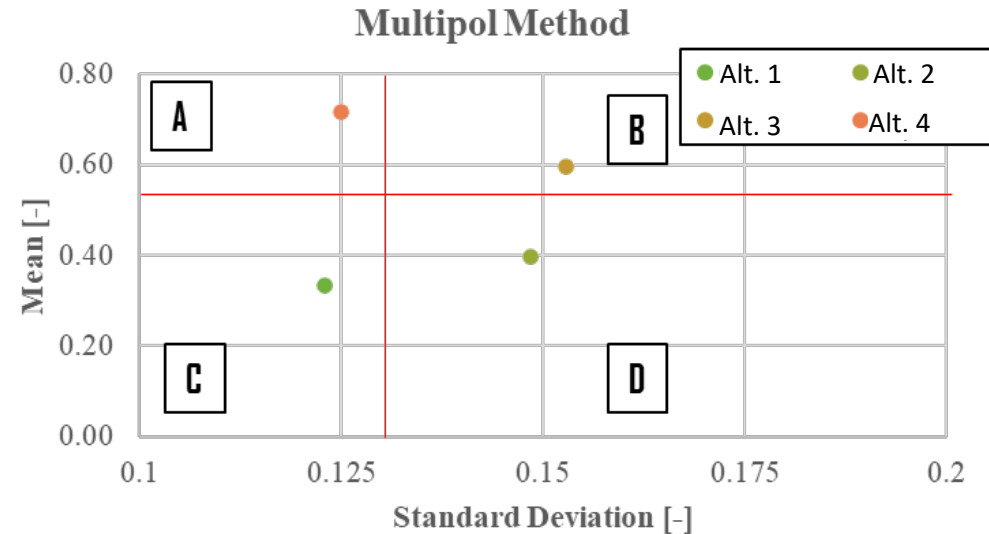
## Normalizzazione delle misure degli indicatori secondo modelli lineari di utilità



Indicatori da massimizzare



Indicatori da minimizzare



# Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

MULTIPOL

TOPSIS

ELECTRE

L'alternativa ideale è quella che presenta il massimo valore di utilità in corrispondenza di tutti i criteri di scelta:

$$X^* = U_{iX^*} = \max_j \{U_{ij}\}$$



La distanza di ciascuna alternativa dall'alternativa ideale è valutata come:

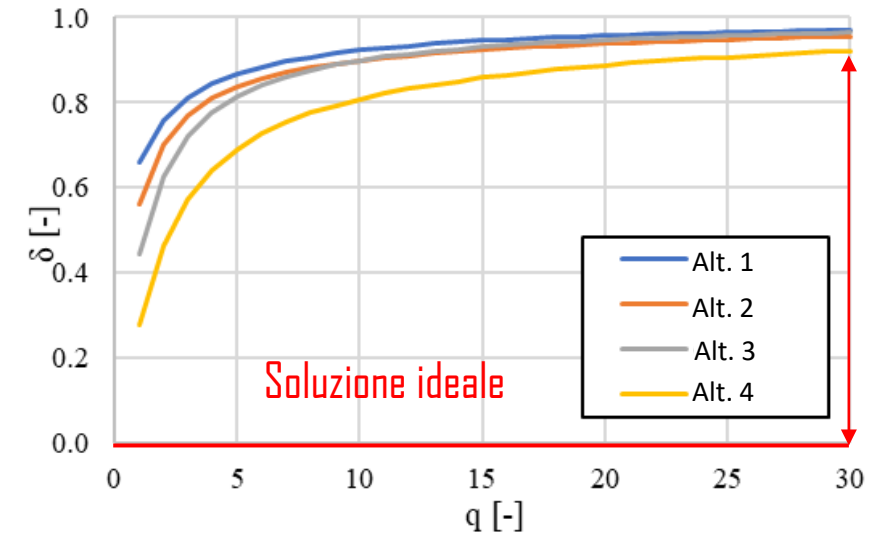
$$\delta_j = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^n d_i \cdot |U_{ij} - U_{iX^*}|^q} \quad q \geq 1$$

$d_i$  = peso relativo al criterio i-esimo  
 $U_{ij}$  = utilità della soluzione j-esima in corrispondenza del criterio i-esimo

$U_{iX^*}$  = utilità ideale = 1  
 $q$  = assume valori da 1 a 30

Normalizzazione vettoriale:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$



# Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento

MULTIPOL

TOPSIS

ELECTRE

**ELECTRE I** Prevede che vengano confrontati a coppie gli indicatori di tutte le alternative.

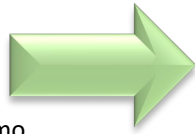


Per ciascuna coppia A-B si calcola:

## Indice di Concordanza

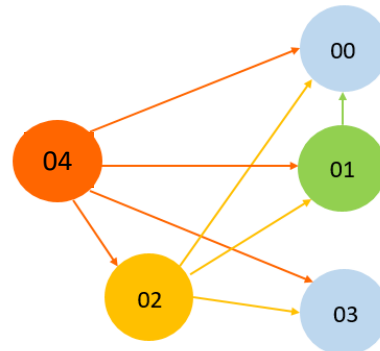
$$c_{AB} = \sum_i d_i : U_{iA} > U_{iB}$$

$d_i$  = peso relativo al criterio i-esimo



Per stabilire la soglia di concordanza minima e quella di discordanza massima si considerano inizialmente i valori medi su tutte le coppie di alternative, fino a restringere il campo a una soluzione univoca:

$$c^* = \frac{\sum c_{ij}}{n} \quad d^* = \frac{\sum d_{ij}}{n}$$



## Indice di Discordanza

$$d_{AB} = \max_i \{(U_{iB} - U_{iA}) : U_{iA} < U_{iB}\}$$

Si costruisce un grafo delle soluzioni, considerando quelle coppie per cui risulta contemporaneamente

$$C_{ij} > C^* \text{ e } D_{ij} < D^*$$

Per ogni coppia si confrontano i singoli indici di concordanza e discordanza con i rispettivi valori soglia:

$$\begin{array}{l} C_{ij} > C^* \longrightarrow 1 \\ D_{ij} < D^* \longrightarrow 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} C_{ij} < C^* \longrightarrow 0 \\ D_{ij} > D^* \longrightarrow 0 \end{array}$$

Alternative		$C_{ij} > C^*$	$D_{ij} < D^*$
Layout 00 vs	Layout 01	0	1
	Layout 02	0	1
	Layout 03	1	0
	Layout 04	0	0
Layout 01 vs	Layout 00	1	1
	Layout 02	0	0
	Layout 03	1	0
	Layout 04	0	0
Layout 02 vs	Layout 00	1	1
	Layout 01	0	0
	Layout 03	0	0
	Layout 04	1	1
Layout 04 vs	Layout 00	1	1
	Layout 01	1	1
	Layout 02	1	1
	Layout 03	1	1

# **Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento**

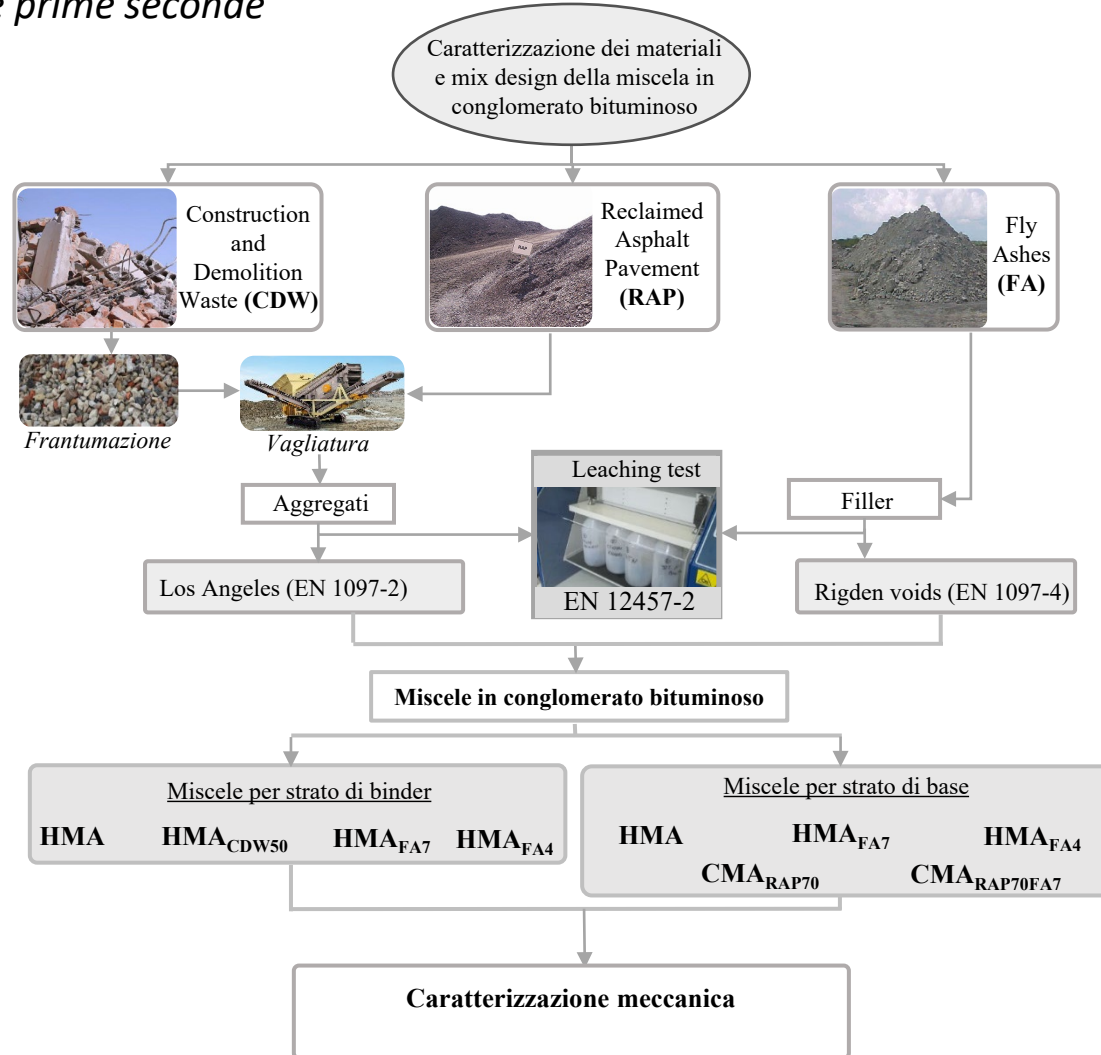
**Influenza dei pesi assegnati ai criteri nella scelta della migliore alternativa**

**Influenza del metodo di analisi multicriteria sulla scelta della migliore alternativa**

*Valutazione prestazionale e ambientale di miscele in conglomerato bituminoso a caldo e a freddo per strati di binder e base di una pavimentazione flessibile contenenti materie prime seconde*

**Integration of life cycle assessment into a decision support system for selecting sustainable road asphalt pavement mixtures prepared with waste**

Cristina Oreto<sup>1</sup> · Rosa Veropalumbo<sup>1</sup> · Nunzio Viscione<sup>1</sup> · Salvatore Antonio Biancardo<sup>1</sup> · Marilisa Botte<sup>2</sup> · Francesca Russo<sup>1</sup>



Performance indicator	Standard	Test Temperature
Marshall stability (S)	EN 12697-34	60 °C
Marshall stiffness (MS)	EN 12697-34	60 °C
Rut depth (RD)	EN 12697-22 Procedure B	60 °C
Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)	EN 12697-26-Annex C	40 °C
Indirect tensile strength (ITS)	EN 12697-23	25 °C
Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)	EN 12697-26-Annex C	10-20 °C
Fatigue life (Nf)	EN 12697-24 – Annex E	10 °C
Indirect tensile strength ratio (ITSR)	EN 12697-12	25 °C



# Caso studio A

Composition	Strato di binder				Strato di base				
	HMA	HMA <sub>CDW50</sub>	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	HMA	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	CMA <sub>RAP70</sub>	CMA <sub>RAP70FA7</sub>
Limestone 18/31.50 mm	-	-	-	-	9%	9%	9%	16%	16%
Limestone 12/18 mm	25%	25%	23%	23%	32%	32%	32%	7%	7%
Limestone 6/12 mm	33%	-	29%	29%	31%	31%	31%	-	-
Limestone 3/6 mm	-	-	13%	13%	-	-	-	-	-
Limestone sand	38%	21%	28%	31%	21%	21%	24%	-	-
Limestone filler	4%	4%	-	-	7%	-	-	7%	-
FA	-	-	7%	4%	-	7%	4%	-	7%
CDW	-	50%	-	-	-	-	-	-	-
RAP	-	-	-	-	-	-	-	70%	70%
Bitumen %wt.	5.00%	6.00%	5.75%	4.75%	4.50%	4.85%	4.25%	-	-
Bitumen emulsion %wt.	-	-	-	-	-	-	-	3.75%	5.00%
Cement %wt.	-	-	-	-	-	-	-	1.50%	0.50%
%air voids	4.00%	5.40%	5.51%	5.51%	4.50%	5.85%	5.76%	9.00%	9.00%

Dati di input per analisi LCA sul metro cubo di miscela prodotta e messa in opera



Unità funzionale

Variabili stimate per la definita unità funzionale

- Consumi di combustibile
- Consumi di elettricità
- Consumi di materie prime
- (misurate con rilievi diretti e/o stimate)*
- Emissioni di macchine operatrici
- Emissioni di veicoli
- Emissioni al camino
- Emissioni di impianti industriali
- Flussi di rifiuti

**Stilati i Flussi Principali per ogni processo del ciclo di vita**

Gas naturale  
Petrolio/petrolio grezzo  
Carbone  
Minerali  
Acqua  
Energia  
Consumo di suolo



Sistema

**Output: Stilati i composti di cui si elencano i principali**

CO  
CO2  
CH4  
NOx  
NMVOC  
IPA  
Particolato  
SO2  
BOD  
COD  
N-compounds  
P-compounds  
TOC  
Metalli



**Tutte queste sostanze sono state poi convertite in indicatori di impatto**

Metodo di trasformazione dei flussi di inventario in indicatori

SimaPro

Inventario del ciclo di vita

Caratterizzazione di indicatori di impatto midpoint



Documentazione	Input/Output	Parametri	Descrizione
<b>Input noti da natura (risorse)</b>			
Oxygen			Sottocompartimento in air
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>			
Building machine [GLO] market for   Cut-off, U	4.49430489890111	p	Quantità fisica Unità di m
Diesel [GLO] market group for   Cut-off, U	7.8434640469479	kg	
Lubricating oil [RER] market for lubricating oil   Cut-off, U	0.0300242212607	kg	
Lubricating oil [RoW] market for lubricating oil   Cut-off, U	0.1425319877721	kg	
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)</b>			
<b>Emissioni nell'aria</b>			
Acenaphthene			Sottocompartimento
Acenaphthylene			
Acetaldehyde			
Acrolein			
Ammonia			
Anthracene			
Benzene			
Benzene, ethyl-			
Benzo(a)anthracene			
Benzo(a)pyrene			

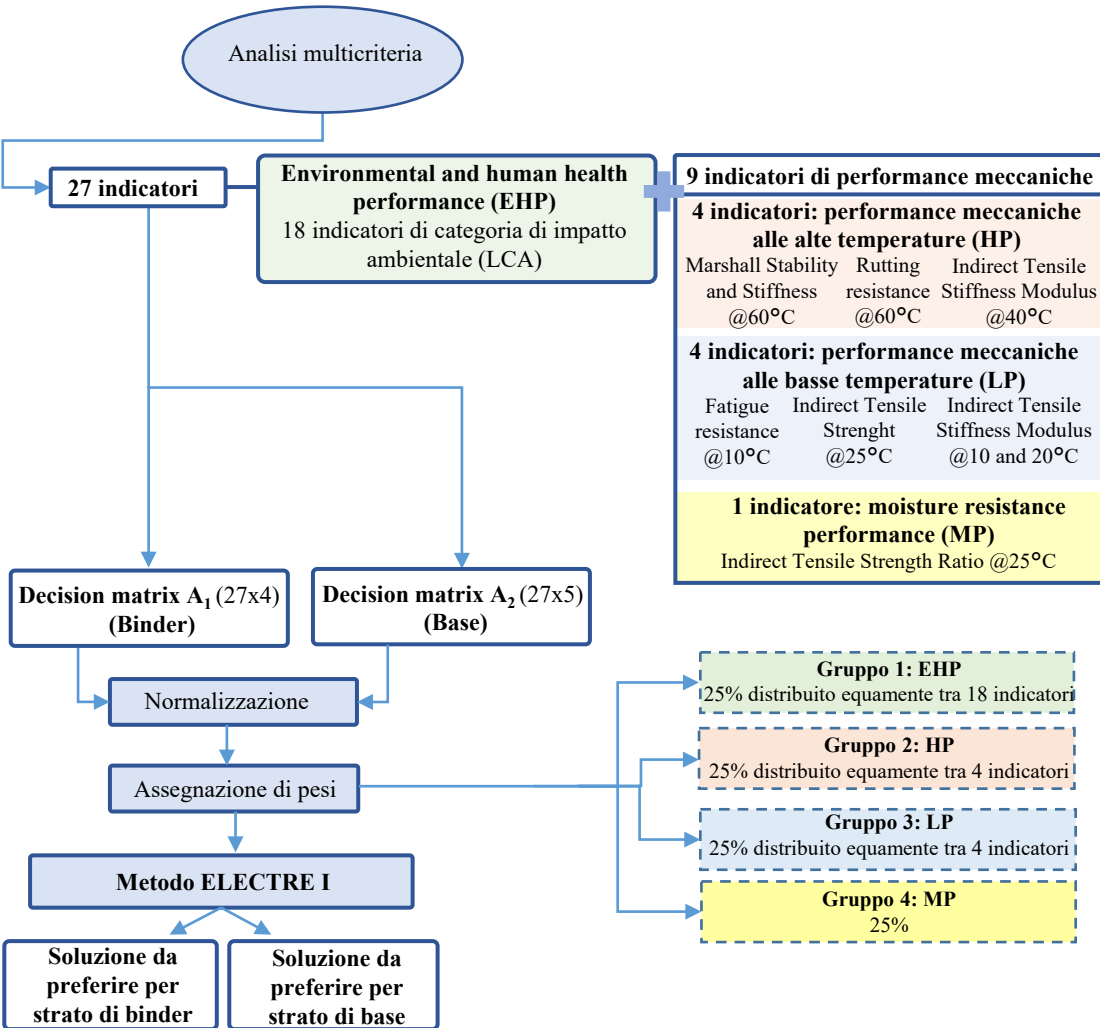
Energia  
Materie prime  
Acqua  
Suolo

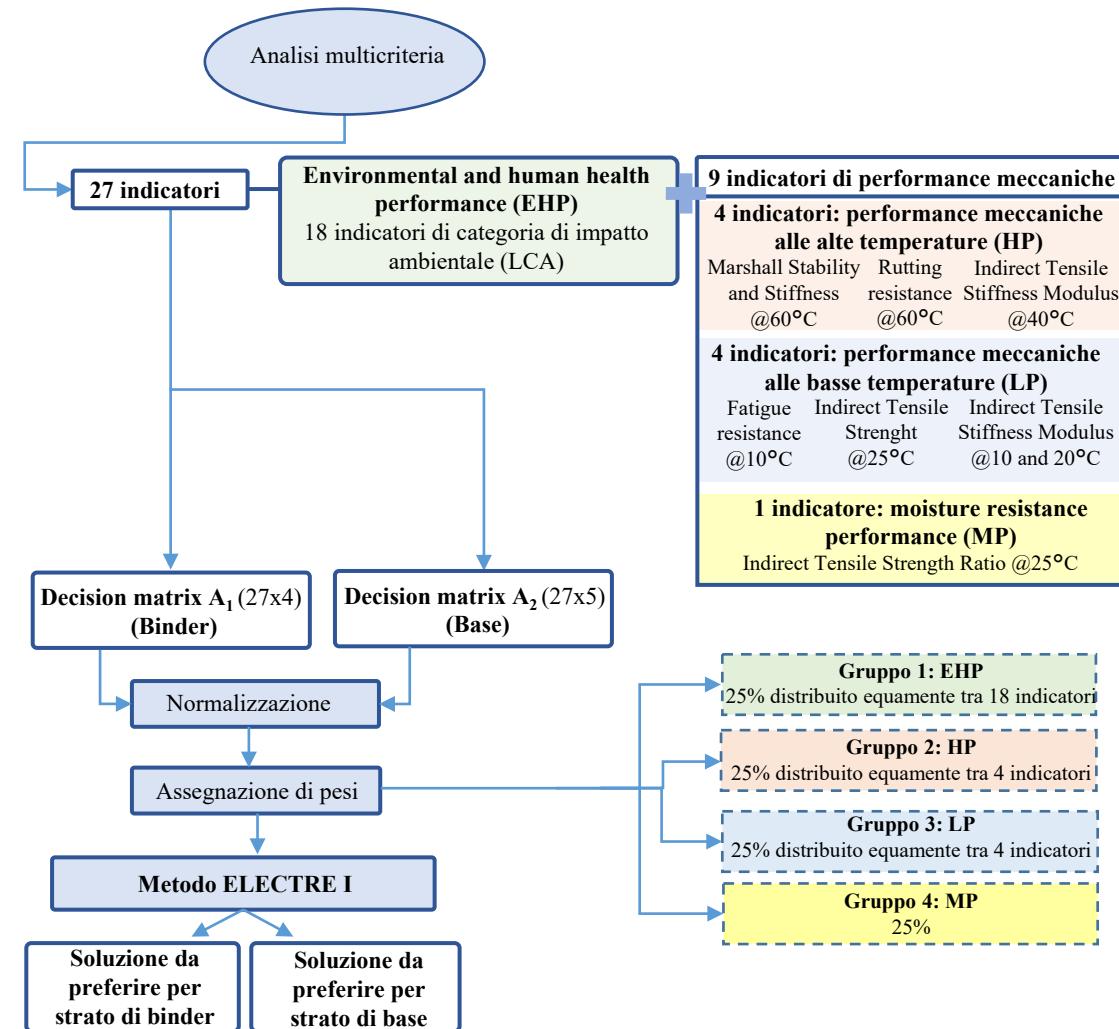
CO<sub>2</sub>  
NO<sub>x</sub>  
SO<sub>2</sub>  
PM2.5  
PM10  
NMVOC  
PAH  
P  
N  
CFC  
Metalli pesanti  
Rifiuti

- Riscaldamento globale - kg CO<sub>2</sub> eq.
- Riduzione dello strato di ozono - kg. CFC-11 eq.
- Radiazione ionizzante - Kg Co-60 eq.
- Formazione di smog fotochimico (salute umana) - kg NO<sub>x</sub> eq.
- Formazione di smog fotochimico (ecosistemi terrestri) - kg NO<sub>x</sub> eq.
- Particolato - kg PM2.5
- Acidificazione - kg SO<sub>2</sub> eq.
- Eutrofizzazione di acque dolci - kg. P eq.
- Eutrofizzazione di acque marine - kg. P eq.
- Ecotossicità terrestre - kg 1,4-DB eq.
- Ecotossicità per acque marine - kg 1,4-DCB eq.
- Ecotossicità per acque dolci - kg 1,4-DCB eq.
- Tossicità carcinogena - kg 1,4-DCB eq.
- Tossicità non carcinogena - kg 1,4-DCB eq.
- Consumo di suolo - m<sup>2</sup>a crop eq.
- Scarsità di risorse minerali - kg Cu eq.
- Scarsità di risorse fossili - kg oil eq.
- Consumo di acqua - m<sup>3</sup>

### Matrici di decisione

Gruppo	Indicatore	Unità di misura	Strato di binder				Strato di base				
			HMA	HMA <sub>CDW50</sub>	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	HMA	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	CMA <sub>RAP70</sub>	CMA <sub>RAP70FA7</sub>
HP	S	daN	7.72E+02	1.25E+03	1.65E+03	7.95E+02	7.50E+02	8.64E+02	9.90E+02	9.02E+02	9.56E+02
HP	MS	daN/mm	2.86E+02	3.66E+02	5.33E+02	3.06E+02	3.41E+02	3.20E+02	3.14E+02	2.82E+02	3.08E+02
HP	ITSM 40 °C	MPa	7.73E+02	1.15E+03	1.24E+03	1.11E+03	9.60E+02	1.20E+03	1.04E+03	1.49E+03	1.61E+03
HP	RD	mm	2.00E+00	1.92E+00	1.86E+00	1.90E+00	2.00E+00	1.97E+00	1.98E+00	1.76E+00	1.63E+00
LP	ITS	MPa	7.70E-01	6.60E-01	9.50E-01	7.90E-01	7.30E-01	8.10E-01	9.20E-01	7.20E-01	8.00E-01
LP	ITSM 10 °C	MPa	1.46E+04	1.54E+04	1.65E+04	1.71E+04	1.47E+04	1.79E+04	1.70E+04	7.94E+03	8.44E+03
LP	ITSM 20 °C	MPa	8.12E+03	7.56E+03	9.58E+03	9.31E+03	8.95E+03	9.83E+03	9.26E+03	3.37E+03	3.43E+03
LP	Nf	n of cycles	1.01E+05	9.04E+04	1.81E+05	9.50E+05	3.16E+05	1.20E+06	1.55E+05	9.20E+04	1.50E+05
MP	ITSR		93%	95%	100%	97%	94%	96%	96%	94%	95%
EHP	GWP	kgCO <sub>2</sub> eq	1.63E+02	1.70E+02	1.62E+02	1.55E+02	1.64E+02	1.59E+02	1.58E+02	1.30E+02	1.24E+02
EHP	ODP	kgCFC11eq	6.20E-02	6.30E-02	6.10E-02	5.90E-02	6.50E-02	6.00E-02	6.00E-02	4.00E-02	3.80E-02
EHP	IR	kBqCo-60eq	6.29E+00	5.01E+00	6.12E+00	5.75E+00	7.16E+00	6.02E+00	5.82E+00	4.25E+00	3.73E+00
EHP	OFH	kgNO <sub>x</sub> eq	8.20E-01	9.20E-01	8.40E-01	7.92E-01	8.23E-01	8.22E-01	8.10E-01	4.97E-01	5.00E-01
EHP	PM	kgPM2.5eq	1.25E+00	1.28E+00	1.24E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.60E-01	1.60E-01
EHP	OFT	kgNO <sub>x</sub> eq	9.10E-01	1.00E+00	8.90E-01	8.64E-01	8.96E-01	8.71E-01	8.83E-01	5.08E-01	5.11E-01
EHP	A	kgSO <sub>2</sub> eq	5.90E-01	6.43E-01	5.97E-01	5.52E-01	5.89E-01	5.89E-01	5.68E-01	3.95E-01	4.03E-01
EHP	FE	kgPeq	2.00E-02	1.60E-02	1.90E-02	1.80E-02	2.10E-02	1.90E-02	1.90E-02	1.50E-02	1.30E-02
EHP	ME	kgNeq	1.98E-01	1.98E-01	1.97E-01	1.97E-01	1.98E-01	1.98E-01	1.97E-01	1.97E-01	1.97E-01
EHP	T-ECO	kg1,4-DCBeq	1.14E+03	1.11E+03	1.14E+03	1.13E+03	1.15E+03	1.13E+03	1.14E+03	6.30E+02	6.08E+02
EHP	F-ECO	kg1,4-DCBeq	5.71E+00	5.82E+00	5.64E+00	5.62E+00	5.82E+00	5.63E+00	5.64E+00	4.58E+00	4.43E+00
EHP	M-ECO	kg1,4-DCBeq	8.18E+00	8.35E+00	8.11E+00	8.07E+00	8.48E+00	8.10E+00	8.08E+00	6.44E+00	6.22E+00
EHP	CT	kg1,4-DCBeq	4.35E+00	3.96E+00	4.26E+00	4.26E+00	4.66E+00	4.25E+00	4.28E+00	2.88E+00	2.72E+00
EHP	NCT	kg1,4-DCBeq	9.59E+01	1.13E+02	9.30E+01	9.20E+01	1.02E+02	9.08E+01	9.34E+01	6.68E+01	6.29E+01
EHP	LU	m <sup>2</sup> a crop eq	1.22E+01	1.22E+01	1.08E+01	1.08E+01	1.33E+01	1.06E+01	1.08E+01	1.06E+01	1.02E+01
EHP	MR	kgCueq	5.39E-01	4.52E-01	5.44E-01	5.35E-01	5.71E-01	5.32E-01	5.48E-01	4.55E-01	3.93E-01
EHP	FR	kgOileq	1.68E+02	2.04E+02	1.85E+02	1.49E+02	1.57E+02	1.64E+02	1.61E+02	8.86E+01	1.07E+02
EHP	W	m <sup>3</sup>	2.91E+00	2.16E+00	2.61E+00	2.23E+00	2.56E+00	2.43E+00	2.64E+00	1.39E+00	1.29E+00





### Matrici di decisione normalizzata

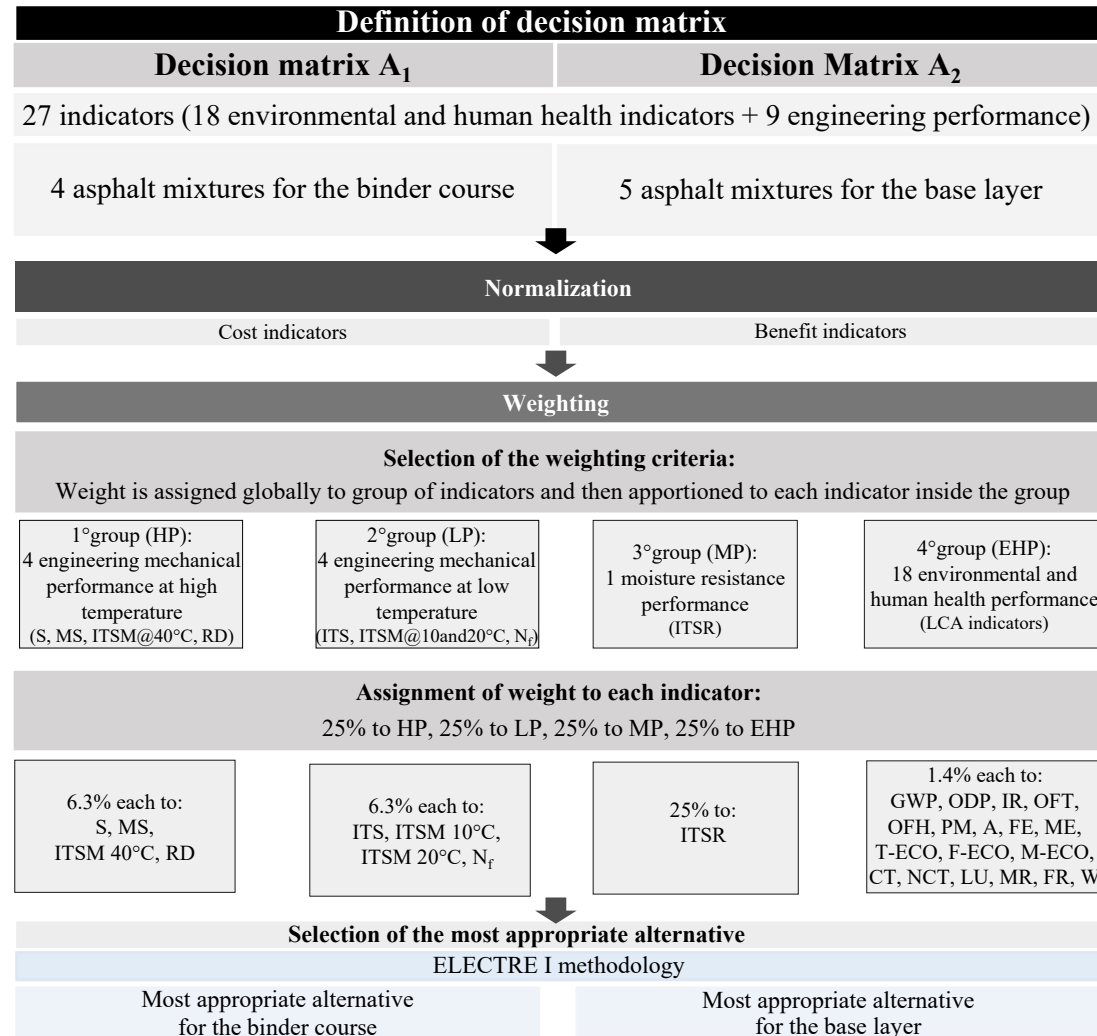
Gruppo	Indicatore	Strato di binder				Strato di base				
		HMA	HMA <sub>CDW50</sub>	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	HMA	HMA <sub>FA7</sub>	HMA <sub>FA4</sub>	CMA <sub>RAP70</sub>	CMA <sub>RAP70FA7</sub>
HP	S	0.47	0.75	1.00	0.60	0.78	0.90	0.83	0.94	1.00
HP	MS	0.54	0.69	1.00	0.59	1.00	0.94	0.90	0.83	0.90
HP	ITSM 40 °C	0.63	0.93	1.00	0.84	0.59	0.75	0.69	0.92	1.00
HP	RD	0.93	0.97	1.00	0.94	0.82	0.83	0.86	0.93	1.00
LP	ITS	0.81	0.69	1.00	0.97	0.90	1.00	0.98	0.89	0.99
LP	ITSM 10 °C	0.86	0.91	0.97	1.00	0.82	1.00	0.95	0.44	0.47
LP	ITSM 20 °C	0.85	0.79	1.00	0.97	0.91	1.00	0.95	0.34	0.35
LP	Nf	0.56	0.50	1.00	0.86	0.26	1.00	0.79	0.08	0.13
MP	ITSR	0.91	0.93	1.00	0.94	0.96	0.99	1.00	0.97	0.98
EHP	GWP	0.97	0.93	0.97	1.00	0.75	0.76	0.80	0.95	1.00
EHP	ODP	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.60	0.63	0.95	1.00
EHP	IR	0.80	1.00	0.88	0.87	0.52	0.55	0.64	0.88	1.00
EHP	OFH	0.99	0.88	0.96	1.00	0.60	0.60	0.63	1.00	0.99
EHP	PM	0.99	0.96	0.99	1.00	0.13	0.13	0.13	1.00	1.00
EHP	OFT	0.98	0.88	0.97	1.00	0.57	0.57	0.59	1.00	0.99
EHP	A	0.96	0.88	0.95	1.00	0.67	0.67	0.72	1.00	0.98
EHP	FE	0.80	1.00	0.84	0.84	0.57	0.59	0.68	0.87	1.00
EHP	ME	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
EHP	T-ECO	0.98	1.00	0.98	0.97	0.53	0.54	0.54	0.97	1.00
EHP	F-ECO	0.98	0.97	1.00	1.00	0.75	0.76	0.78	0.97	1.00
EHP	M-ECO	0.98	0.96	1.00	1.00	0.73	0.75	0.77	0.97	1.00
EHP	CT	0.91	1.00	0.93	0.93	0.58	0.60	0.63	0.94	1.00
EHP	NCT	0.97	0.83	1.00	1.00	0.62	0.63	0.67	0.94	1.00
EHP	LU	0.89	0.89	1.00	1.00	0.76	0.81	0.94	0.96	1.00
EHP	MR	0.84	1.00	0.83	0.82	0.69	0.70	0.71	0.86	1.00
EHP	FR	0.96	0.79	0.87	1.00	0.57	0.54	0.59	1.00	0.83
EHP	W	0.74	1.00	0.83	0.82	0.50	0.53	0.58	0.93	1.00

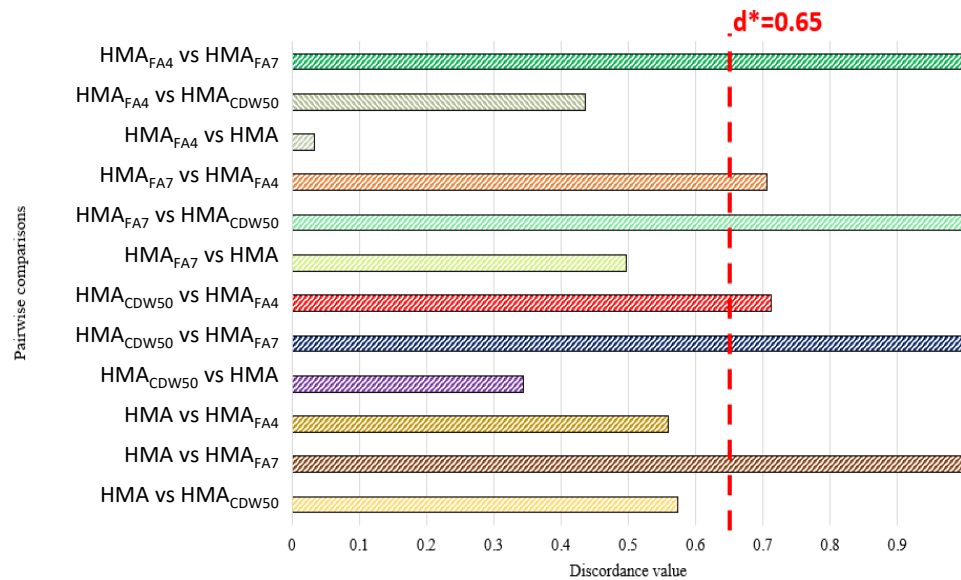
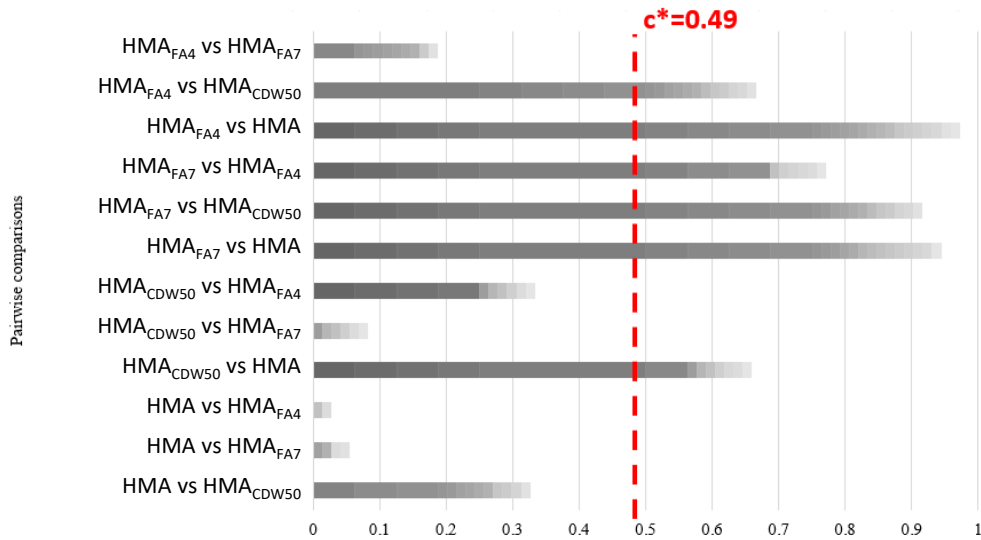
$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{1,1,1} & \dots & a_{1,1,4} \\ \vdots & a_{1,ij} & \vdots \\ a_{1,27,1} & \dots & a_{1,27,4} \end{pmatrix}_{27 \times 4}$$

$$N_1 = \begin{pmatrix} n_{1,1,1} & \dots & n_{1,1,4} \\ \vdots & n_{1,ij} & \vdots \\ n_{1,27,1} & \dots & n_{1,27,4} \end{pmatrix}_{27 \times 4}$$

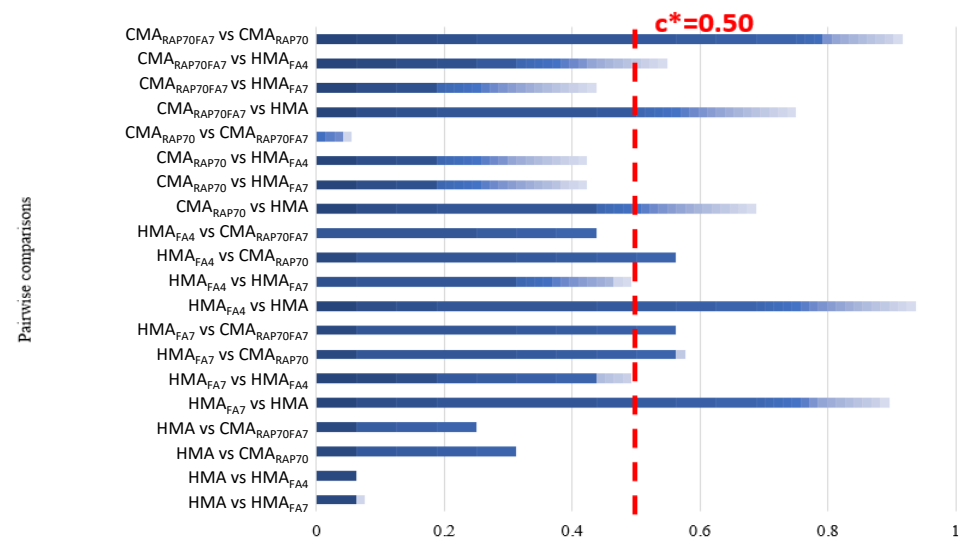
$$A_2 = \begin{pmatrix} a_{2,1,1} & \dots & a_{2,1,5} \\ \vdots & a_{2,ik} & \vdots \\ a_{2,27,1} & \dots & a_{2,27,5} \end{pmatrix}_{27 \times 5}$$

$$N_2 = \begin{pmatrix} n_{2,1,1} & \dots & n_{2,1,5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{2,27,1} & \dots & n_{2,27,5} \end{pmatrix}_{27 \times 5}$$

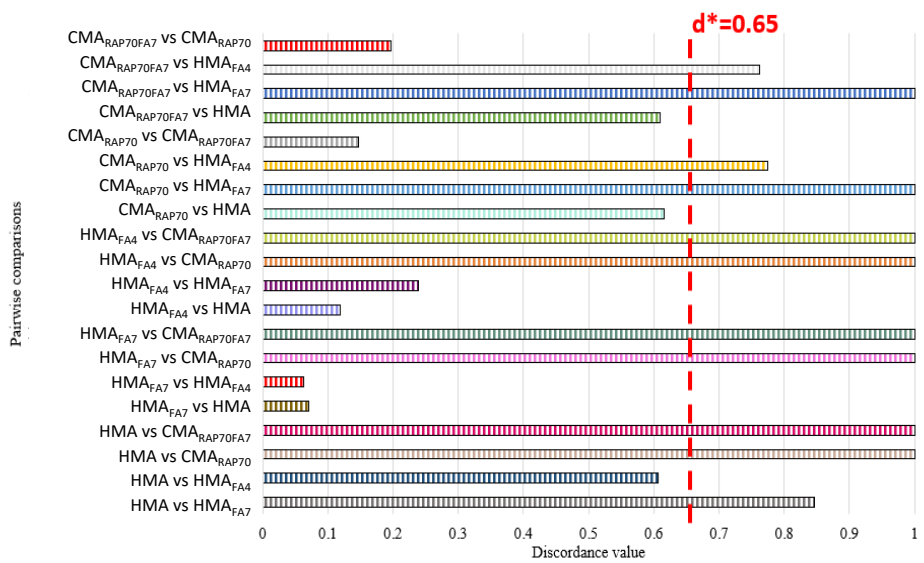


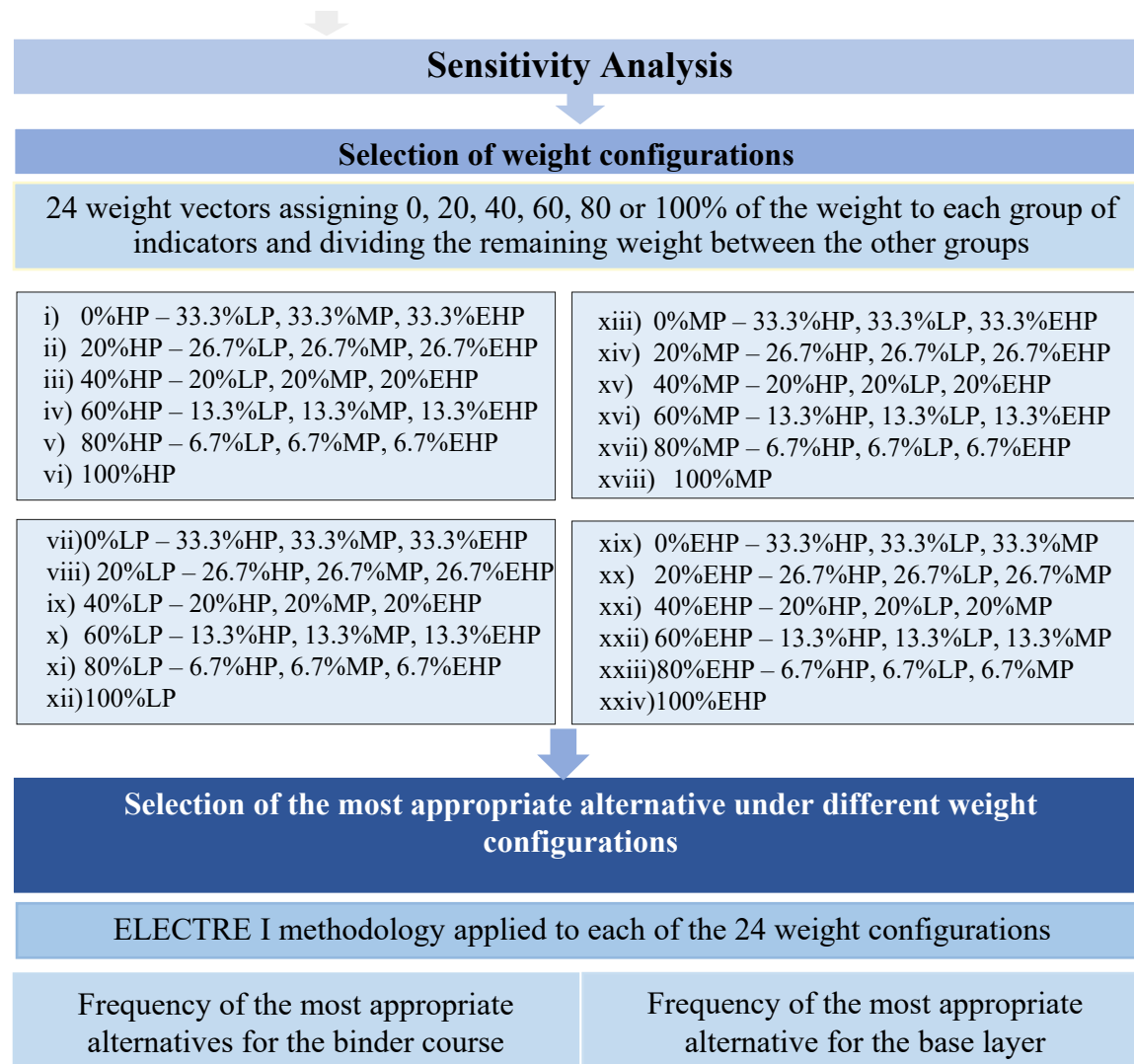


- HMA<sub>FA4</sub> presenta i valori più elevati di concordanza a confronto con la soluzione tradizionale HMA e HMA<sub>CDW50</sub> e i valori più bassi di discordanza in corrispondenza di alcuni indicatori ambientali (TE e MR) influenzata dalla bassa distanza di trasporto delle FA
- HMA<sub>FA7</sub> presenta valori di concordanza elevati ma risente di una riduzione delle massime prestazioni meccaniche alle alte temperature (MS, M) ed in termini di prestazioni ambientali a causa di un più elevato contenuto di bitume rispetto a HMA e HMA<sub>FA4</sub>



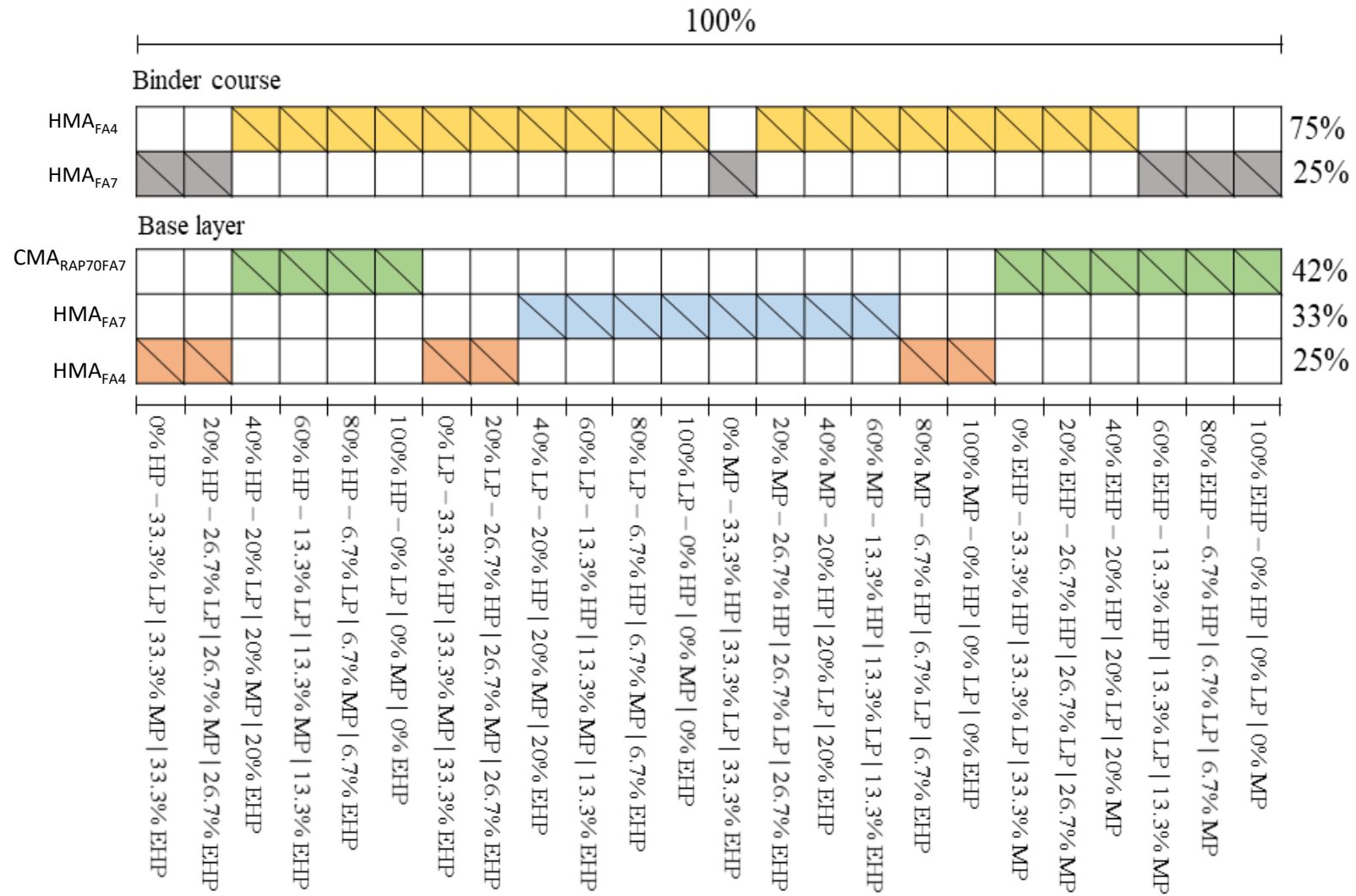
- a) Tra le miscele a caldo, HMA<sub>FA7</sub> è preferita nei confronti a coppie rispetto a HMA e HMA<sub>FA4</sub>
- b) CMA<sub>RAP70FA7</sub> somma ai benefici ambientali del riciclaggio a freddo l'incremento delle caratteristiche meccaniche della miscela alle basse temperature.





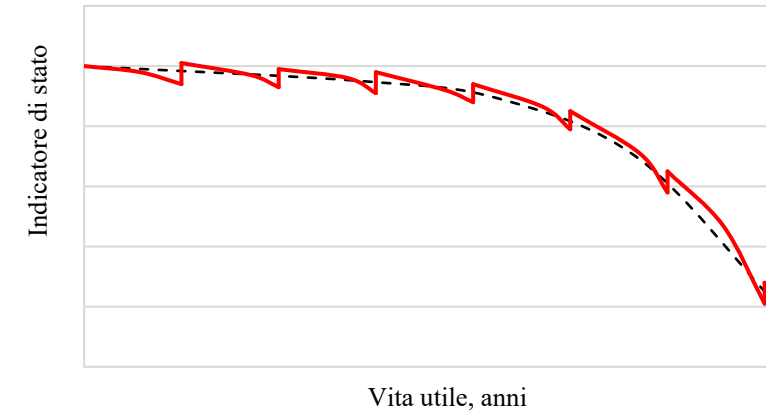


Weight configuration	(0) 25% to HP, LP, MP, EHP	(1) 0% HP	(2) 20% HP	(3) 40% HP	(4) 60% HP	(5) 80% HP	(6) 100% HP	(7) 0% LP	(8) 20% LP	(9) 40% LP	(10) 60% LP	(11) 80% LP	(12) 100% LP	(13) 0% EHP	(14) 20% EHP	(15) 40% EHP	(16) 60% EHP	(17) 80% EHP	(18) 100% EHP	(19) 0% MP	(20) 20% MP	(21) 40% MP	(22) 60% MP	(23) 80% MP	(24) 100% MP
S	6.25	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
MS	6.25	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
ITSM 40°C	6.25	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
RD	6.25	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
ITSR	25.00	33.33	26.67	20.00	13.33	6.67	0.00	33.33	26.67	20.00	13.33	6.67	0.00	33.33	26.67	20.00	13.33	6.67	0.00	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00
RTI	6.25	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
ITSM 10°C	6.25	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
ITSM 20°C	6.25	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
Nf	6.25	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00	8.33	6.67	5.00	3.33	1.67	0.00
GWP	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
ODP	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
IR	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
OFH	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
PM	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
OFT	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
A	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
FE	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
ME	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
T-ECO	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
F-ECO	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
M-ECO	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
CT	0.83	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00	0.00	0.67	1.33	2.00	2.67	3.33	3.33	2.67	2.00	1.33	0.67	0.00
NCT	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
LU	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
MR	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
FR	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00
W	1.94	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00	0.00	1.56	3.11	4.67	6.22	7.78	7.78	6.22	4.67	3.11	1.56	0.00



# Caso studio B

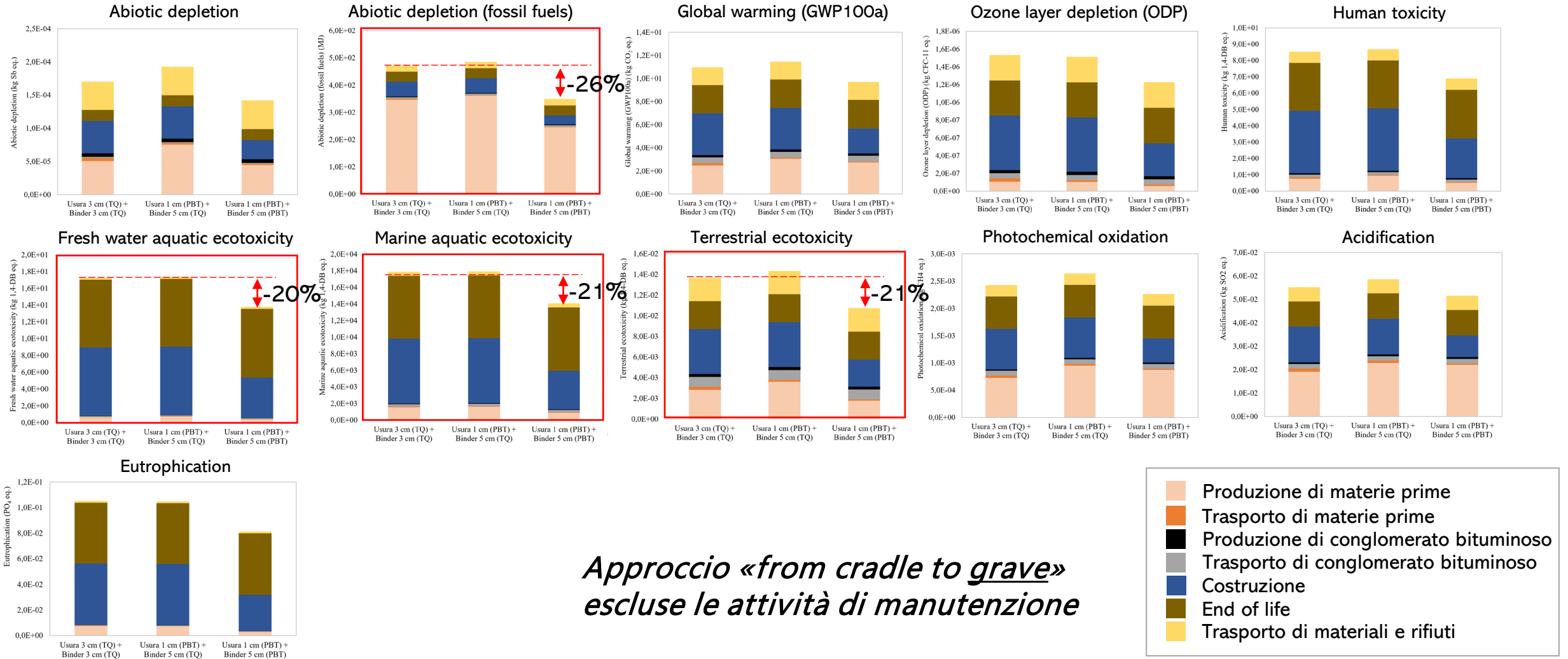
**Costruzione e manutenzione di una unità funzionale:**  
*m<sup>2</sup> di pavimentazione costituito da usura e binder*



		<b>Soluzione</b>	<b>Frequenza di manutenzione ordinaria dello strato di usura</b>	<b>Frequenza di manutenzione dello strato di binder</b>
<b>Soluzione tradizionale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 cm usura con bitume tal quale</li> <li>• 3 cm binder con bitume tal quale</li> </ul>	Usura: AC12 TQ 3 cm Binder: AC16 TQ 3 cm	Ogni 3 anni	Ogni 3 anni
<b>Soluzione 5+1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 cm usura con bitume modificato</li> <li>• 5 cm binder con bitume tal quale</li> </ul>	Usura: AC12 PMB 1 cm Binder: AC16 TQ 5 cm	Ogni 3 anni	Ogni 6 anni
<b>Soluzione 5+1 RAP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 cm usura con bitume modificato</li> <li>• 5 cm binder con il 50% di conglomerato bituminoso e bitume modificato</li> </ul>	Usura: AC12 PMB 1 cm Binder: AC16 PMB+RAP 5 cm	Ogni 3 anni	Ogni 9 Anni

# Caso studio B

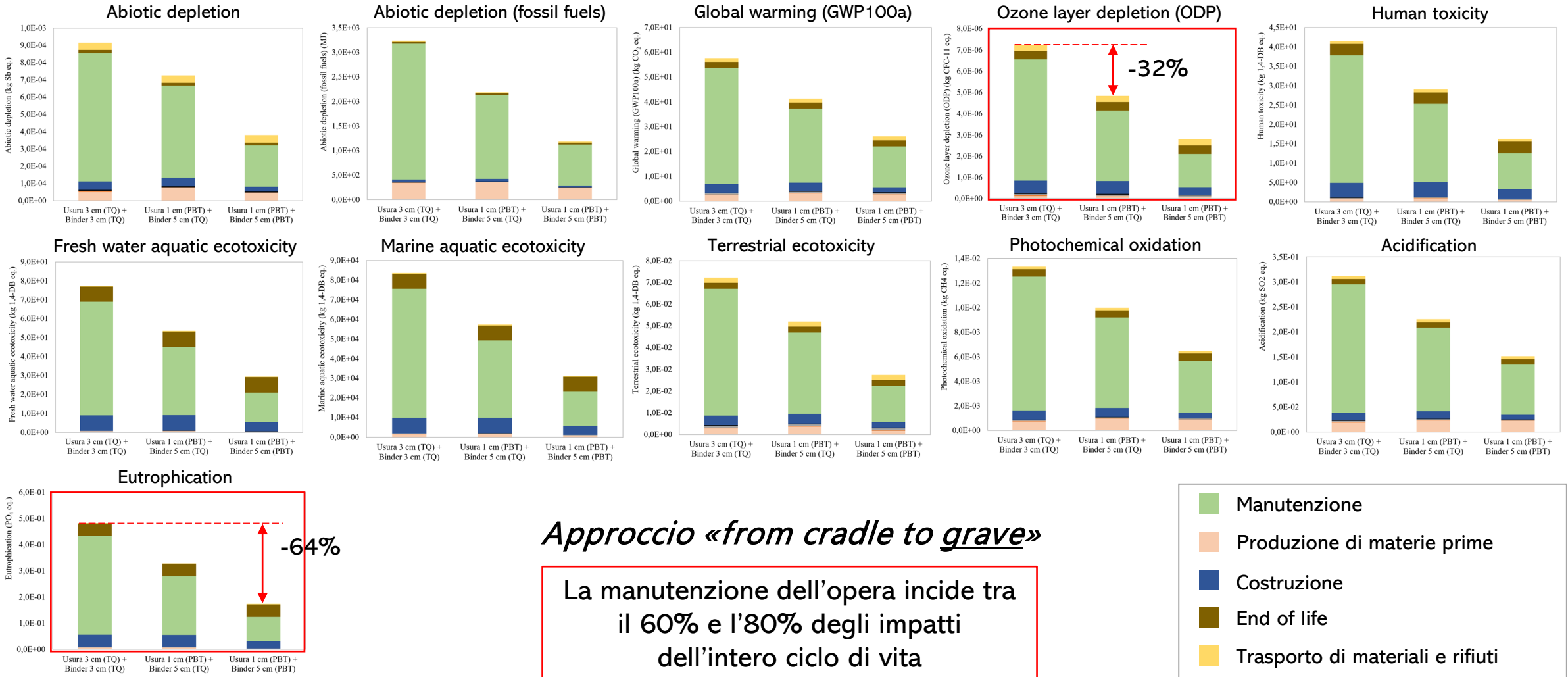
Valutazione di 11 indicatori di categoria di impatto ambientale secondo il metodo CML-IA baseline 2000



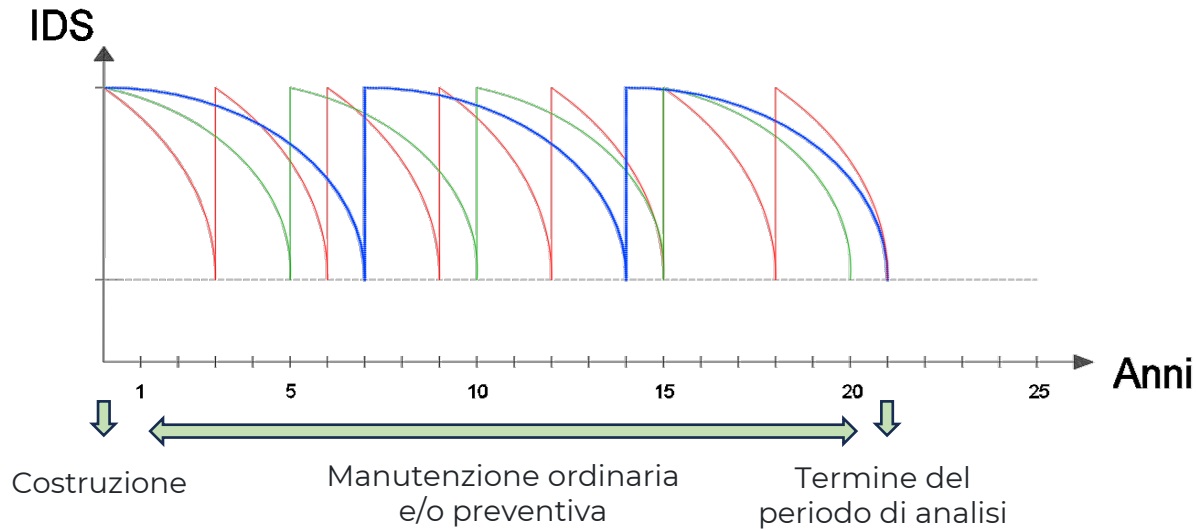
*Approccio «from cradle to grave»  
escluse le attività di manutenzione*

# Caso studio B

Valutazione di 11 indicatori di categoria di impatto ambientale secondo il metodo CML-IA baseline 2000



# Caso studio B

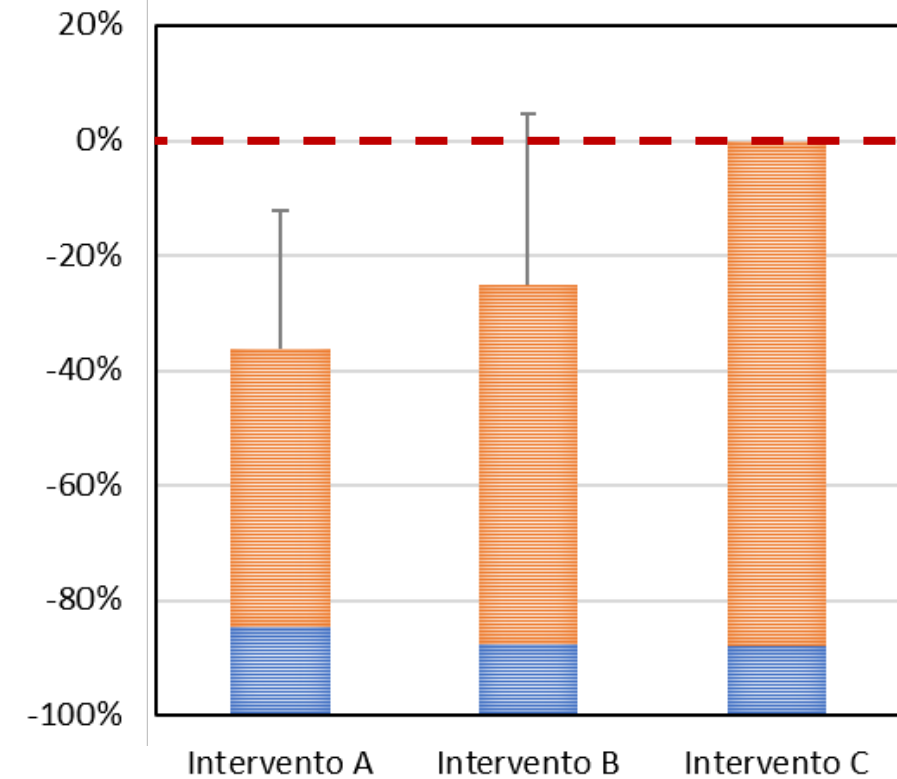


	Soluzione	Frequenza di manutenzione ordinaria dello strato di usura	Frequenza di manutenzione dello strato di binder
A	AC16 PMB+RAP 5 cm AC12 PMB 1 cm	Ogni 3 anni	Ogni 9 Anni
B	AC16 TQ 5 cm AC12 PMB 1 cm	Ogni 3 anni	Ogni 6 anni
C	AC16 TQ 3 cm AC12 TQ 3 cm	Ogni 3 anni	Ogni 3 anni

$$LCC = C^{CON} + C^M$$

■ Costo di costruzione

■ Costo di manutenzione



Vita utile prevista 20 anni

# Caso studio B

Indicatori	Unit	Soluzione tradizionale	Soluzione 5+1	Soluzione 5+1 con RAP
Abiotic depletion	kg Sb eq	9.15E-04	7.30E-04	3.85E-04
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	3.24E+03	2.28E+03	1.28E+03
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	5.77E+01	4.24E+01	2.73E+01
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	7.24E-06	4.88E-06	2.84E-06
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4.15E+01	2.92E+01	1.65E+01
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	7.73E+01	5.37E+01	2.95E+01
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	8.37E+04	5.78E+04	3.16E+04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	7.21E-02	5.27E-02	2.82E-02
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1.33E-02	1.03E-02	6.80E-03
Acidification	kg SO2 eq	3.12E-01	2.34E-01	1.60E-01
Eutrophication	kg PO4--- eq	4.83E-01	3.30E-01	1.75E-01
LCC/mq (20 anni)	€	174.18	130.20	111.04

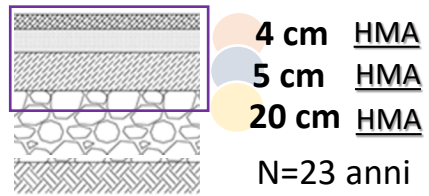
alternativa migliore

dal punto di vista tecnico, economico ed ambientale

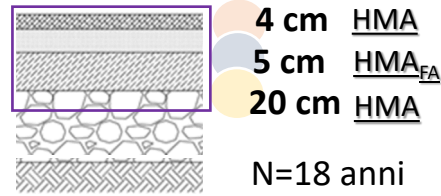
# Caso studio C

Stratigrafie di pavimentazioni flessibili progettate secondo approccio razionale

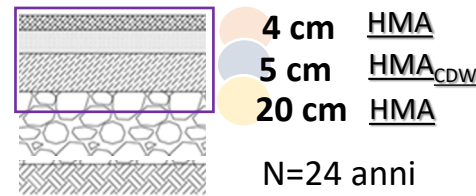
Soluzione n.1



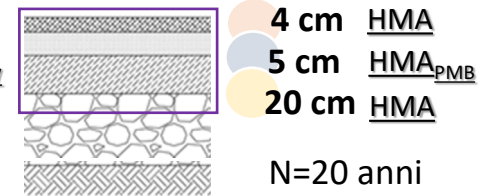
Soluzione n.2



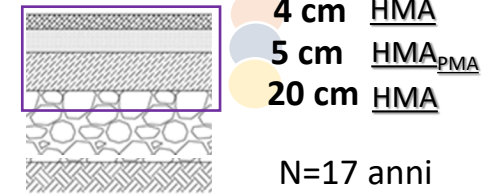
Soluzione n.3



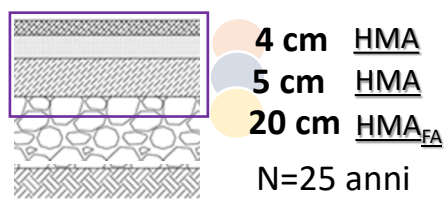
Soluzione n.4



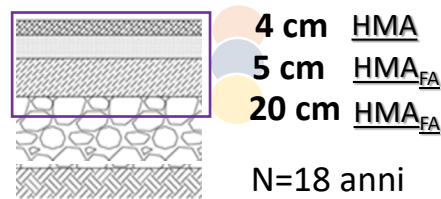
Soluzione n.5



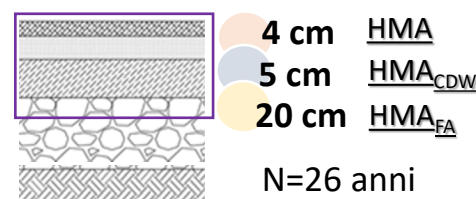
Soluzione n.6



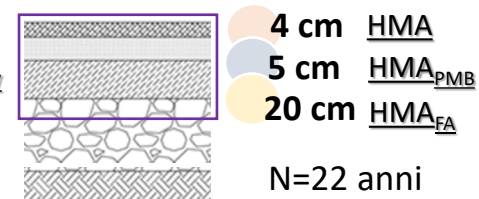
Soluzione n.7



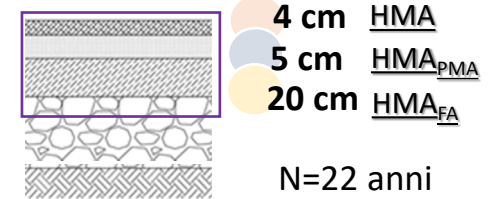
Soluzione n.8



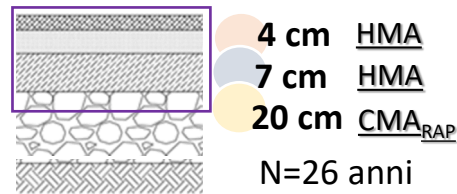
Soluzione n.9



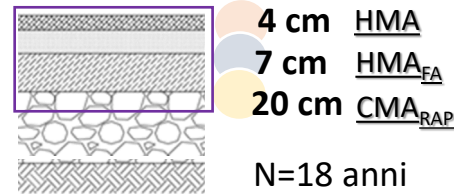
Soluzione n.10



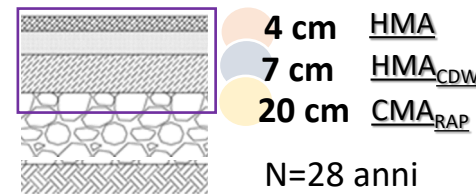
Soluzione n.11



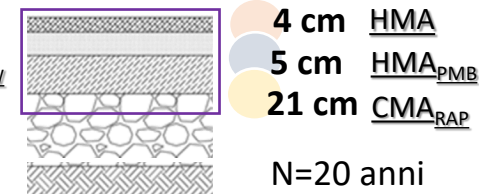
Soluzione n.12



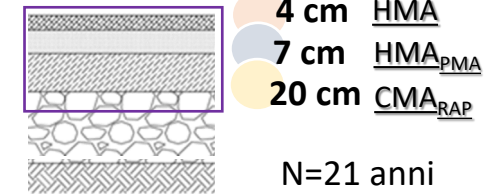
Soluzione n.13



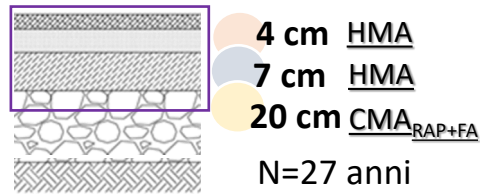
Soluzione n.14



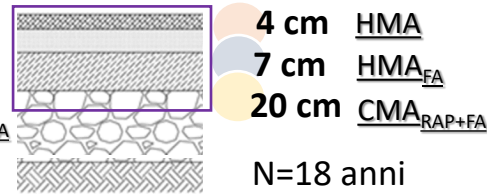
Soluzione n.15



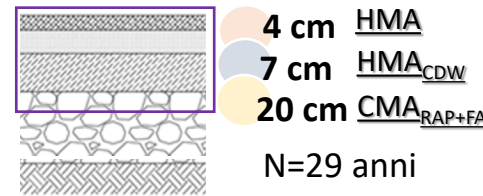
Soluzione n.16



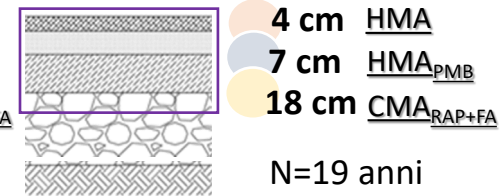
Soluzione n.17



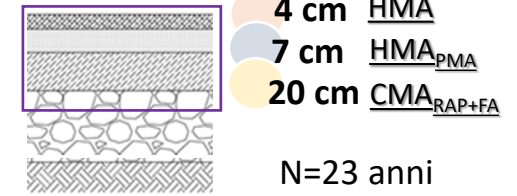
Soluzione n.18



Soluzione n.19



Soluzione n.20





# Caso studio C

Stratigrafie di pavimentazioni flessibili progettate secondo approccio razionale

20 alternative

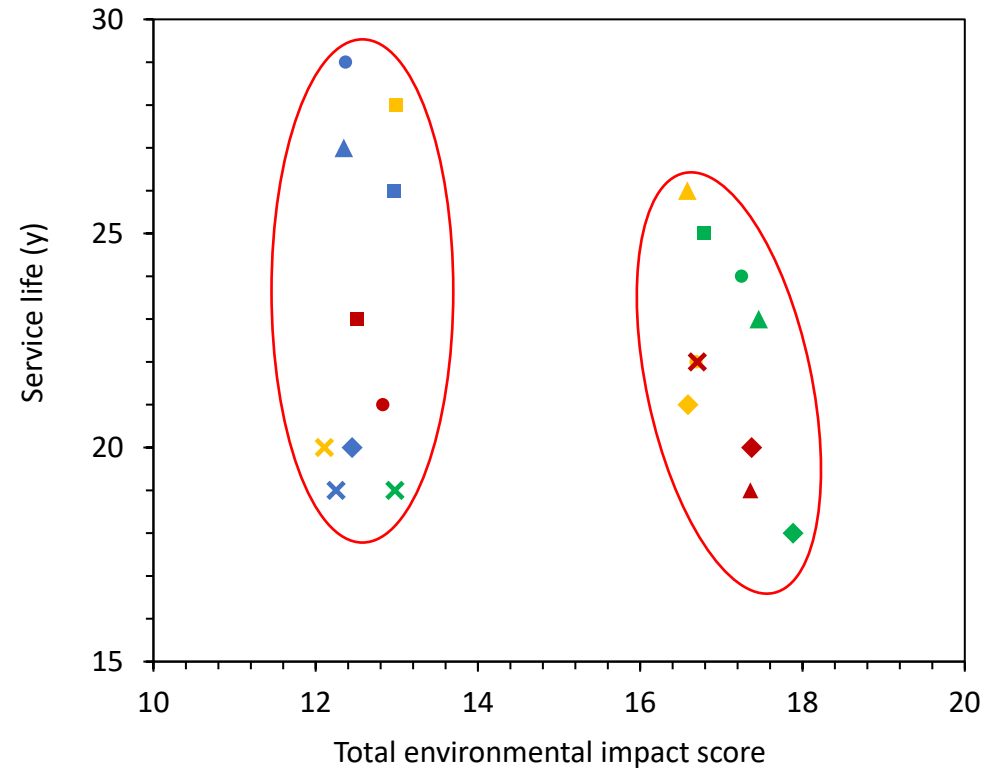
2 criteri di valutazione

Vita utile

Indicatore sintetico di impatto ambientale

Peso uguale assegnato ai criteri di scelta

Stratigrafia			Vita utile	Indicatore di impatto ambientale
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(HMA)	18	17.9
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	21	16.6
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(CMA)	19	13
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	20	12.1
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(HMA)	20	17.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	22	16.7
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(CMA)	20	12.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	19	12.3
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(HMA)	19	17.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	22	16.7
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(CMA)	21	12.8
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	23	12.5
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(HMA)	24	17.2
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	26	16.6
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(CMA)	28	13
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	29	12.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(HMA)	23	17.5
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	25	16.8
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(CMA)	26	13
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	27	12.3

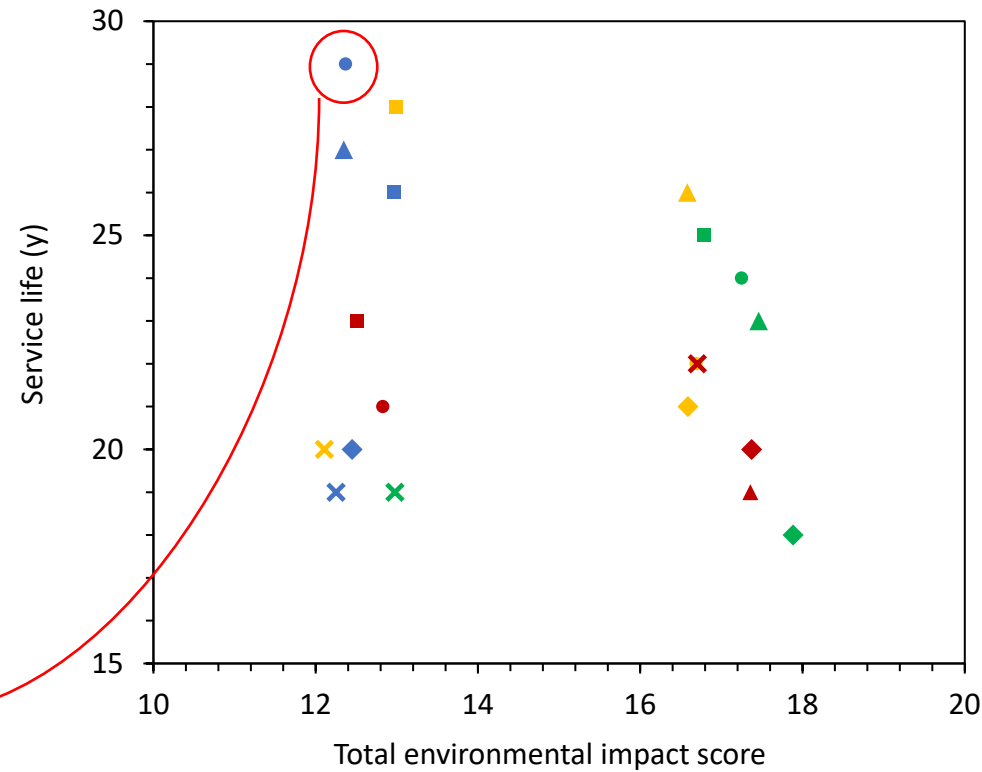


- W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(HMA-FA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA),Ba(HMA)
- × W(HMA),Bi(HMA),Ba(CMA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(CMA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA),Ba(HMA-FA)
- × W(HMA),Bi(HMA),Ba(CMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(HMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(HMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(CMA-FA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(HMA)
- × W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(HMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(CMA)
- W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(CMA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(CMA)
- × W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(CMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(CMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(CMA-FA)

# Caso studio C

## Stratigrafie di pavimentazioni flessibili progettate secondo approccio razionale

Stratigrafia			Indicatore di	
			Vita utile	impatto ambientale
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(HMA)	18	17.9
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	21	16.6
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(CMA)	19	13
W(HMA)	Bi(HMA)	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	20	12.1
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(HMA)	20	17.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	22	16.7
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(CMA)	20	12.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMB</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	19	12.3
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(HMA)	19	17.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	22	16.7
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(CMA)	21	12.8
W(HMA)	Bi(HMA <sub>PMA</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	23	12.5
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(HMA)	24	17.2
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	26	16.6
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(CMA)	28	13
W(HMA)	Bi(HMA <sub>CDW</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	29	12.4
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(HMA)	23	17.5
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(HMA <sub>FA</sub> )	25	16.8
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(CMA)	26	13
W(HMA)	Bi(HMA <sub>FA</sub> )	Ba(CMA <sub>FA</sub> )	27	12.3



- W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(HMA-FA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA),Ba(HMA)
- ✕ W(HMA),Bi(HMA),Ba(CMA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(CMA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA),Ba(HMA-FA)
- ✕ W(HMA),Bi(HMA),Ba(CMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(HMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(HMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(CMA-FA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(HMA)
- ✕ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(HMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(HMA)
- W(HMA),Bi(HMA-PMA),Ba(CMA)
- W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(CMA)
- ◆ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(CMA)
- ✕ W(HMA),Bi(HMA-PMB),Ba(CMA-FA)
- ▲ W(HMA),Bi(HMA-FA),Ba(CMA-FA)
- W(HMA),Bi(HMA-CDW),Ba(CMA-FA)

# Metodologia per la verifica di pavimentazioni sostenibili



Valutazione dello stato della pavimentazione



Ipotesi Scenari di Intervento (i.e. definizione di Mix design e caratterizzazione meccanica avanzata, stabilizzazione sottofondo)



Progettazione e verifica delle stratigrafie di intervento e Calcolo della Vita Utile



Analisi dei costi e degli impatti ambientali del ciclo di vita



Analisi a criteri multipli degli scenari di intervento



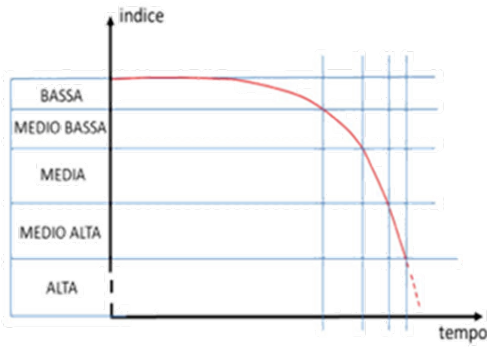
Redazione PMS



**MANUTENZIONE  
PREVENTIVA**



**MANUTENZIONE PREDITTIVA**



# LA MANUTENZIONE PREVENTIVA

---

Scelta degli indicatori di Stato

---

Valuzione delle caratteristiche prestazionali e funzionali

---

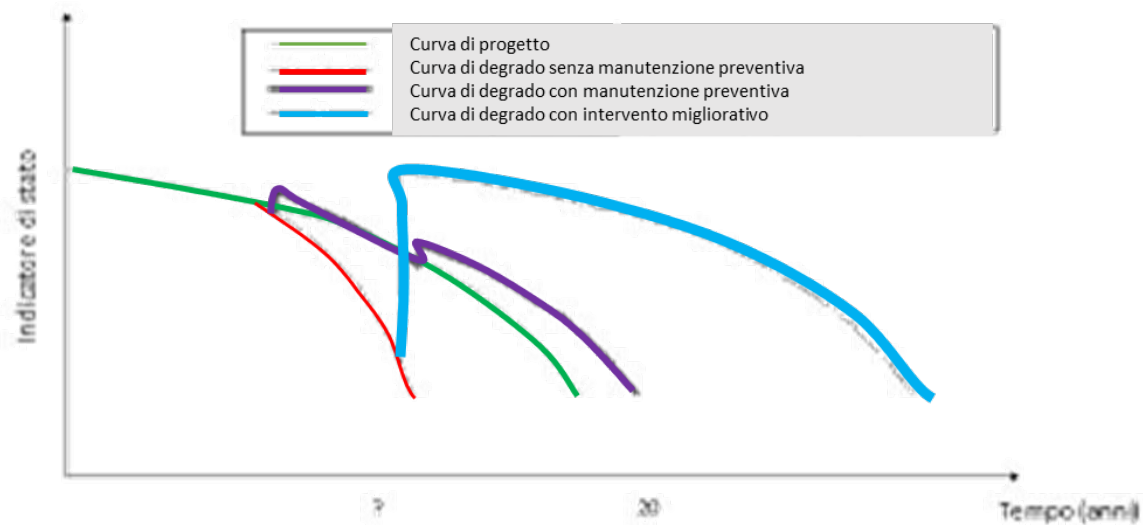
Definizione intervalli temporali di riferimento

---

Confronto con soglie di attenzione di decadimento

---

Superata la soglia di attenzione di uno o più indici, e per una determinata unità di indagine o gruppo di unità, si interviene



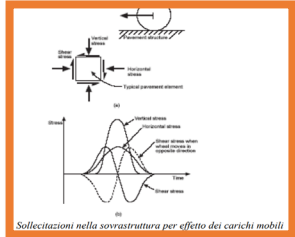
# LA MANUTENZIONE PREDITTIVA

consente, sulla base di analisi di laboratorio o modelli disponibili in letteratura, di restituire una previsione nel tempo del decadimento di una specifica variabile esplicativa della pavimentazione e/o singola miscela caratterizzante lo strato

## RESISTENZA ALL'ACCUMULO DI DEFORMAZIONI PERMANENTI

### EQUAZIONI PREDITTIVE (VERSTRAETEN)

$$u_{tot} = \sum_i \sum_j \varepsilon_{ij} \cdot h_j \leq 2cm$$

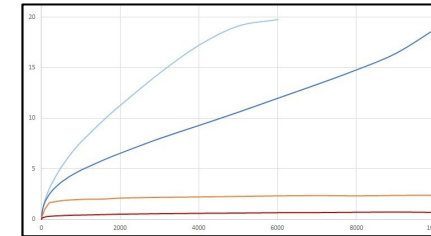


$$\varepsilon_4 = A_4 \left[ \left( \frac{N_4}{10^3 \cdot f} + \left( \frac{A_3}{A_4} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{N_3}{10^3 \cdot f} + \left( \frac{A_2}{A_4} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{N_2}{10^3 \cdot f} + \left( \frac{A_1}{A_4} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{N_1}{10^3 \cdot f} \right) \right]$$

### WHEEL TRACKING TEST

EN 12697-33 – Advanced Asphalt Slab Roller Compactor

EN 12697-22 – Wheel Tracking Test



## RESISTENZA AI FENOMENI DI FATICA

### EQUAZIONI PREDITTIVE (MINER)



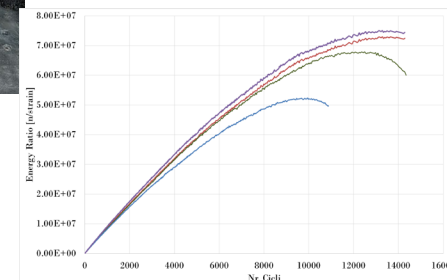
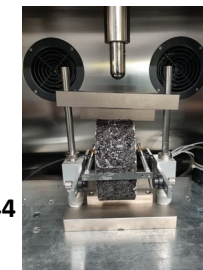
$$DC = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^A \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \leq 1$$

$$N_{i,j} = N_{i,j}^I + N_{i,j}^{F_{10}}$$

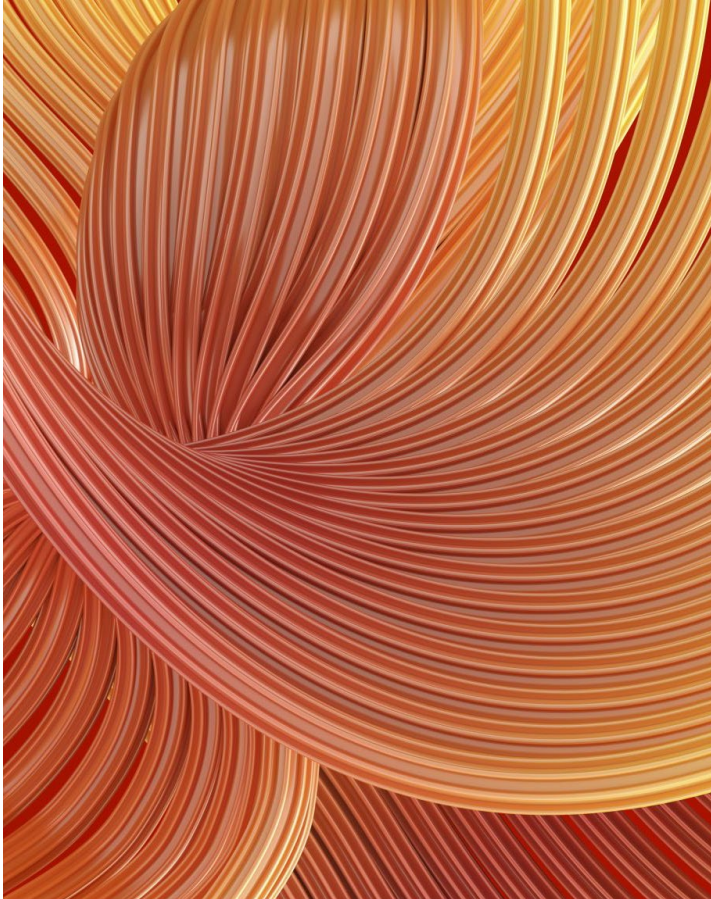
### PROVA DI FATICA IN LABORATORIO

EN 12697-24

SEMI CIRCULAR BENDING (SCB) EN 12697-44



# Conclusioni



---

Integrazione/revisione dei CSdA alla luce di parametri prestazionali da garantire alla pavimentazione

---

Soluzioni ecosostenibili di progettazione di sovrastrutture

---

Riduzione di materie prime

---

Monitoraggio delle caratteristiche funzionali e strutturali delle pavimentazioni

---

Redazione di Piani di Manutenzione

---

Ottimizzazione del budget per interventi di costruzione ex novo/manutenzione



## Grazie per l'attenzione

**Prof.ssa Ing. Francesca Russo**

Responsabile tecnico-scientifico del Laboratorio di strade Luigi Tocchetti

Università degli Studi di Napoli Federico II

francesca.russo2@unina.it



**Laboratorio di Strade Luigi Tocchetti**



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
**FEDERICO II**