



**Politecnico  
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.A. 2025/2026

Sessione di marzo 2026

# Analisi strutturale e LCA (Life Cycle Assessment) di pavimentazioni stradali flessibili

Confronto tra conglomerati bituminosi tradizionali  
e modificati con polimeri vergini e riciclati

**Relatori:**

Prof. Ing. Lucia Tsantilis

Prof. Ing. Orazio Baglieri

Prof. Ing. Pier Paolo Riviera

Ing. Mattia Di Sessa

**Candidato:**

Stefano Simone



## Sommario

### **ABSTRACT 1**

#### **CAPITOLO 1: INTRODUZIONE ALL'ANALISI DEL CICLO DI VITA ..... 4**

- 1.1. Funzione e unità funzionale dell'analisi LCA ..... 4
- 1.2. Confini del sistema..... 5
- 1.3. Implementazione su SimaPro..... 6
  - 1.3.1. SimaPro: premesse..... 6
  - 1.3.2. Categorie e indicatori di impatto ambientale ..... 6
  - 1.3.3. Processi non presenti nell'inventario EcoInvent ..... 7

#### **CAPITOLO 2: INTRODUZIONE ALLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI.....9**

- 2.1. Sovrastrutture stradali flessibili: caratteristiche generali..... 9
- 2.2. Calcolo della temperatura all'interno degli strati in conglomerato bituminoso..... 11
- 2.3. Calcolo dei moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso ...12
- 2.4. Funzioni di trasferimento.....14
  - 2.4.1. Fessurazione a fatica .....15
  - 2.4.2. Ormaiamento..... 17

#### **CAPITOLO 3: CONTESTO GEOGRAFICO E TECNICO ..... 18**

- 3.1. Premesse .....18
- 3.2. Caratteristiche progettuali della sovrastruttura stradale di riferimento 19
  - 3.2.1. Volumetria degli strati in conglomerato bituminoso .....22
- 3.3. Analisi meteorologica decennale del Lazio ..... 24
  - 3.3.1. Analisi delle precipitazioni ..... 25
  - 3.3.2. Analisi delle temperature atmosferiche ..... 28
- 3.4. Temperature della pavimentazione stradale ..... 30
- 3.5. Calcolo dei moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso ...31
  - 3.5.1. Bitume tal quale.....32
  - 3.5.2. Bitume modificato con polimero SBS radiale ..... 35

**CAPITOLO 4: ANALISI STRUTTURALE E LCA..... 39**

4.1. Premesse dell'analisi strutturale su KenPave .....	39
4.1.1. Parametri di input dell'analisi strutturale.....	39
4.1.2. Funzioni di trasferimento adottate .....	41
4.2. Costruzione del modello su SimaPro.....	42
4.2.1. Mezzi adoperati e trasporto dei materiali.....	43
4.2.2. Produzione dei materiali da costruzione non presenti nel database Ecoinvent.....	44
4.2.3. Elaborazioni non presenti nel database EcoInvent.....	45
4.2.4. Fasi del prodotto.....	47
4.3. Caso di riferimento: Bitume tal quale.....	51
4.3.1. Analisi strutturale .....	51
4.3.2. Analisi LCA.....	54
4.4. Bitume modificato con SBS radiale .....	58
4.4.1. Differenze rispetto al caso di riferimento .....	58
4.4.2. Analisi strutturale .....	59
4.4.3. Analisi LCA.....	61
4.5. Conglomerato con polimero di riciclo.....	67
4.5.1. Peculiarità del polimero di riciclo .....	67
4.5.2. Implementazione del polimero di riciclo su SimaPro .....	68
4.5.3. Analisi LCA.....	72

**CAPITOLO 5: CONFRONTO DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI FINALI.....76**

5.1. Raffronto numerico tra i tre casi.....	76
5.2. Considerazioni finali.....	79

**Bibliografia 81**



## ABSTRACT

Le pavimentazioni flessibili in conglomerato bituminoso sono di gran lunga le più diffuse a livello globale per la costruzione di infrastrutture stradali. L'utilizzo dei conglomerati bituminosi per la costruzione delle strade presenta innumerevoli benefici da un punto di vista pratico e funzionale, ma al tempo stesso comporta un impatto ambientale molto significativo. In quest'ottica, individuare delle soluzioni che consentano di ridurre l'impatto ambientale legato al ciclo di vita delle infrastrutture stradali diventa un obiettivo di primaria importanza.

Uno strumento molto valido per effettuare un'analisi oggettiva dell'impatto ambientale è l'analisi LCA (Life Cycle Assessment), che quantifica l'impatto di ogni materia prima e di ogni processo attraverso indicatori ambientali specifici.

Lo studio oggetto di questo lavoro prende in considerazione tre diversi casi: un caso di riferimento, nel quale il conglomerato bituminoso è ottenuto a partire da bitume non modificato; un secondo caso nel quale il bitume è modificato con l'aggiunta del polimero SBS (stirene-butadiene-stirene); un terzo caso in cui, rispetto al caso di riferimento, viene aggiunto in fase di miscelazione del conglomerato un compound polimerico commerciale derivato principalmente da prodotti riciclati. Nell'analisi si sono considerati i medesimi carichi veicolari e le medesime condizioni ambientali, nonché gli stessi spessori degli strati della pavimentazione derivanti dall'analisi strutturale dello scenario di riferimento. Per gli scenari alternativi è stato possibile stimare l'incremento di vita utile derivante dalla presenza dei materiali modificati. E' stata inoltre condotta un'analisi LCA: tra i vari indicatori ottenuti come output dell'analisi, è stata posta l'attenzione sull'emissione di gas serra, misurata in chilogrammi di CO<sub>2</sub> equivalenti.

Il confronto tra i tre casi ha portato a risultati molto interessanti per quanto riguarda l'incidenza dell'aggiunta di polimeri, sia in termini di vita utile della pavimentazione sia in termini di conseguenze per l'ambiente. In linea generale, è emerso che l'aggiunta di polimeri migliora sensibilmente le prestazioni della pavimentazione nei confronti della resistenza a fatica e dell'accumulo di deformazioni permanenti, aumentandone sensibilmente la vita utile. Tuttavia, le analisi LCA hanno messo in luce come l'impatto ambientale legato alla produzione e all'impiego dei polimeri nei conglomerati bituminosi richieda un'attenta valutazione, al fine di evitare

che un aumento della vita di servizio della pavimentazione venga compromesso da un maggiore impatto ambientale.



# **CAPITOLO 1: INTRODUZIONE ALL'ANALISI DEL CICLO DI VITA**

Questo elaborato illustra i principi metodologici e tecnici adottati per l'analisi strutturale e l'analisi del ciclo di vita (LCA – *Life Cycle Assessment*) di pavimentazioni stradali flessibili.

Nei capitoli iniziali vengono presentati i fondamenti teorici dell'LCA, le caratteristiche delle sovrastrutture flessibili e i metodi impiegati per la determinazione delle temperature operative, la conversione delle curve maestre in moduli elastici e le funzioni di trasferimento utilizzate nell'analisi strutturale.

La seconda parte dell'elaborato si focalizza sui tre casi di studio, attraverso l'analisi delle simulazioni e delle elaborazioni condotte. L'obiettivo è pervenire a un confronto quantitativo tra le diverse soluzioni esaminate, al fine di individuare quella che meglio coniuga le prestazioni strutturali e la sostenibilità ambientale.

L'obiettivo primario di questo lavoro di tesi è l'effettuazione dell'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) su pavimentazioni stradali con specifiche caratteristiche progettuali. L'analisi *Life Cycle Assessment*, come il nome stesso suggerisce, consiste in un'analisi di potenziale impatto ambientale che prende in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto analizzato. Nel contesto LCA, per "ciclo di vita" si intende l'insieme delle fasi consecutive e interconnesse della vita di un prodotto:

- Estrazione e lavorazione delle materie prime;
- Produzione dei materiali elaborati;
- Trasporto di materiali e mezzi di costruzione;
- Uso del prodotto finale e manutenzione;
- Riciclo dei materiali adatti;
- Smaltimento dei materiali non riciclabili.

## **1.1. Funzione e unità funzionale dell'analisi LCA**

Quando si effettua un'analisi LCA è essenziale specificare chiaramente le caratteristiche prestazionali (funzioni) del sistema che viene analizzato. Per poter effettuare un'analisi accurata, è necessario inoltre identificare un'unità funzionale coerente con l'obiettivo dell'analisi, utile a ottenere un riferimento in base a cui scalare in senso matematico i dati di input e di output. L'unità

funzionale deve essere misurabile, chiaramente definita e rappresentativa delle prestazioni del sistema.

Per questa tesi, l'unità funzionale scelta è una superficie di pavimentazione stradale pari a un metro quadro e con una vita utile di almeno 20 anni (inclusi i cicli di manutenzione ordinaria previsti).

## **1.2. Confini del sistema**

Prima di effettuare un'analisi LCA è necessario stabilire preliminarmente e in maniera inequivocabile quali fasi specifiche del ciclo di vita del sistema analizzato vadano prese in considerazione, e quali invece siano da trascurare. I risultati numerici dell'analisi LCA derivano da modelli di calcolo piuttosto complessi: in mancanza di dati sufficientemente affidabili relativamente a una specifica fase del ciclo di vita del sistema, è preferibile mantenere tale fase al di fuori dei confini dell'analisi, piuttosto che inserire dati di non comprovata validità che potrebbero falsare, con i risultati da essi derivanti, il resto dell'analisi condotta sulla base di dati affidabili.

L'analisi LCA condotta per questo lavoro di tesi riguarda gli strati di usura, collegamento, base e fondazione della sovrastruttura stradale. Il sottofondo ed eventuali opere d'arte e opere in terra non rientrano, invece, all'interno dei confini dell'LCA in questione. Per quanto riguarda il ciclo di vita del sistema, fanno parte dell'analisi LCA le seguenti fasi:

- Estrazione delle materie prime presenti in natura (es. aggregati);
- Produzione dei materiali da costruzione necessari (es. conglomerato bituminoso), compresi il trasporto in impianto delle materie prime e l'eventuale trasferimento intermedio da un impianto di produzione all'altro, nel caso in cui la produzione dei materiali richiedesse più fasi da effettuarsi in più impianti distanti tra loro;
- Trasporto delle materie prime naturali e dei materiali da costruzione dall'impianto di estrazione/produzione al sito di costruzione;
- Costruzione della pavimentazione stradale in sito, comprensiva di tutti gli strati sopra menzionati, comprendendo l'operatività dei macchinari specializzati impiegati nelle operazioni di costruzione;
- Manutenzione della pavimentazione, comprensiva di tutti gli aspetti della stessa (fresatura, trasporto in sito dei nuovi materiali necessari per la ricostruzione degli strati ammalorati etc.);

- End of Life (fresatura della pavimentazione al termine della sua vita utile e trasporto della pavimentazione fresata in impianto per accantonamento e futuro utilizzo).

## **1.3. Implementazione su SimaPro**

### 1.3.1. SimaPro: premesse

L'analisi LCA, come già accennato precedentemente, è complessa e piuttosto onerosa in termini computazionali. Per questi motivi, nella quasi totalità dei casi l'analisi LCA viene condotta con l'ausilio di software specializzati. Nel caso di questa tesi, il software utilizzato per i calcoli relativi ai processi e all'impatto ambientale generato dagli stessi è SimaPro.

SimaPro è un software specializzato nelle analisi di impatto ambientale, e per funzionare necessita di un database e di un modello di calcolo. Il database contiene una notevole quantità di entità di vario genere (processi tecnologici unitari nativi e flussi di sostanze ed energia che modellano gli input e gli output di tali processi), mentre il modello di calcolo converte i flussi elementari associati ai processi (nativi oppure costruiti dall'utente) in indicatori di impatto ambientale, applicando specifici coefficienti di proporzionalità alle emissioni o consumi derivanti da ciascuna materia prima o processo inserito come input.

Per questo lavoro di tesi è stato adoperato il database "Ecoinvent3\_11", mentre il metodo di calcolo adottato è il "EN15804 + A2 (adapted) V1.03 / EF 3,1 normalization and weighting set", escludendo in tutte le fasi di calcolo l'opzione relativa ai processi di infrastrutture: in tal modo, vengono esclusi dalle simulazioni i processi relativi alla costruzione degli edifici dove avvengono le varie lavorazioni e dei macchinari impiegati per la costruzione e manutenzione della sovrastruttura stradale.

### 1.3.2. Categorie e indicatori di impatto ambientale

L'analisi LCA ha come obiettivo primario la valutazione del potenziale impatto ambientale di un sistema. La locuzione "valutazione del potenziale impatto ambientale" è, in questo senso, piuttosto generica, poiché l'impatto ambientale può essere calcolato in molti modi differenti: per questo motivo, quando si va a effettuare un'analisi LCA è necessario stabilire a priori quali

fattori saranno oggetto di calcolo. Tali fattori sono chiamati "categorie", e tra i più noti e utilizzati figurano:

- Consumo di minerali;
- Uso di combustibili fossili;
- Cambiamento climatico;
- Acidificazione;
- Tossicità per l'essere umano;
- Tossicità per l'ambiente;
- Eutrofizzazione.

Questi sono solo alcuni esempi delle categorie di impatto ambientale che è possibile ottenere come output di una analisi LCA. A ciascuno di questi indicatori è attribuito un indicatore (ad esempio, l'indicatore per la categoria "Cambiamento climatico" è il "Potenziale di riscaldamento globale") e un'unità di misura (tipicamente la massa equivalente di una determinata sostanza che genera lo stesso effetto dell'indicatore in questione).

Per lo studio in oggetto, l'indicatore tenuto in considerazione nell'analisi dei risultati è il già menzionato potenziale di riscaldamento globale (universalmente noto come GWP, Global Warming Potential), avente come unità di misura il chilogrammo di anidride carbonica equivalente. Altri indicatori saranno comunque adoperati in alcune parti di questa tesi per ricavare alcuni dati utili per lo sviluppo della tesi stessa.

### 1.3.3. Processi non presenti nell'inventario EcoInvent

Alcuni materiali complessi e alcune lavorazioni non sono presenti nel database EcoInvent, per cui si è reso necessario ottenerli artificialmente combinando elementi presenti nel database.

Per quanto riguarda la produzione di materiali da costruzione non presenti nel database, si tratta di:

- Bitume modificato (nei casi studio dove è utilizzato);
- Emulsione bituminosa;
- Conglomerato bituminoso (produzione a caldo in impianto).

Per quanto riguarda le elaborazioni non presenti sul database, si hanno:

- Costruzione di uno strato di pavimentazione (a caldo);
- Manutenzione di uno strato di pavimentazione;
- End of life.

Tali elaborazioni e la loro implementazione su SimaPro sono trattate quantitativamente nei prossimi capitoli.

# **CAPITOLO 2: INTRODUZIONE ALLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI**

## **2.1. Sovrastrutture stradali flessibili: caratteristiche generali**

La costruzione di una strada può seguire molteplici approcci progettuali per quanto riguarda la scelta dei materiali da impiegare. Distinguere tutte le possibili combinazioni possibili in termini di scelta dei materiali per ogni strato, numero di strati impiegati, spessore degli strati ecc. è impossibile, visto il potenzialmente infinito numero di combinazioni generabili per combinazione delle caratteristiche precedentemente menzionate. Si può però fare una netta distinzione tra le due tipologie di sovrastruttura stradale più frequentemente adottate su scala globale:

- sovrastrutture stradali *flessibili*, caratterizzate dall'impiego, per gli strati più superficiali, di conglomerato bituminoso (comunemente noto come "asfalto");
- sovrastrutture stradali *rigide*, caratterizzate dall'utilizzo di lastre di calcestruzzo per gli strati più superficiali della pavimentazione.

Nonostante le pavimentazioni rigide garantiscano nella maggior parte dei casi prestazioni strutturali superiori rispetto a quelle flessibili, queste ultime sono più comunemente e capillarmente impiegate, in quanto generalmente più economiche e semplici da costruire e mantenere in servizio.

Le sovrastrutture stradali flessibili possono presentare un numero variabile di strati, i cui spessori possono variare enormemente in funzione di una quantità di fattori, tra cui la tipologia di strada, il traffico da sostenere ecc.

In linea di massima e nella maggior parte dei casi, le sovrastrutture flessibili sono composte, andando dalla sommità alla base della sovrastruttura, dai seguenti strati:

- strato di *usura*: in conglomerato bituminoso, ha la funzione di garantire ai veicoli un livello di aderenza sufficiente in tutte le condizioni per garantire la sicurezza della circolazione, senza al tempo stesso generare troppo attrito con gli pneumatici né deformarsi in

maniera permanente sotto il peso dei veicoli. Svolge inoltre una funzione drenante;

- strato di *collegamento* (o *binder*): in conglomerato bituminoso, svolge una funzione di distribuzione dei carichi generati dal traffico veicolare e provenienti dallo strato di usura;
- strato di *base*: può essere realizzato, a seconda dei casi, in misto granulare, usando misti stabilizzati oppure in conglomerato bituminoso (nel caso di strade con abbondante traffico). Svolge anch'esso, come lo strato di collegamento, una funzione strutturale, in quanto trasferisce i carichi dagli strati sovrastanti a quelli più profondi;
- strato di *fondazione*: in misto granulare (o in misto cementato: in tal caso, la sovrastruttura assume il nome di *semirigida*), ha anch'esso una funzione strutturale. Inoltre, nel caso in cui lo strato di base fosse realizzato adoperando materiali sciolti, funge anche da filtro a beneficio del sottofondo e del corpo del rilevato (o del terreno naturale, in caso di trincea).

Per garantire una sufficiente aderenza tra gli strati in conglomerato bituminoso, è necessario applicare due mani d'attacco di emulsione bituminosa, rispettivamente tra lo strato di usura e lo strato di collegamento e tra lo strato di collegamento e quello di base. Le mani di attacco hanno la funzione di impedire lo scorrimento superficiale dello strato di usura rispetto agli strati sottostanti (per quanto riguarda la mano di attacco tra usura e binder) e di garantire una corretta collaborazione a livello strutturale tra strato di base e strato di collegamento (mano di attacco tra binder e base). Vi è poi, tra lo strato di base e la fondazione in misto granulare, un ulteriore strato di emulsione bituminosa, chiamato anche "mano di ancoraggio", con lo scopo di creare una base di appoggio uniforme e stabile per lo strato di base, nonché per inserirsi nelle fessure tra i granuli del misto granulare e sigillarlo.

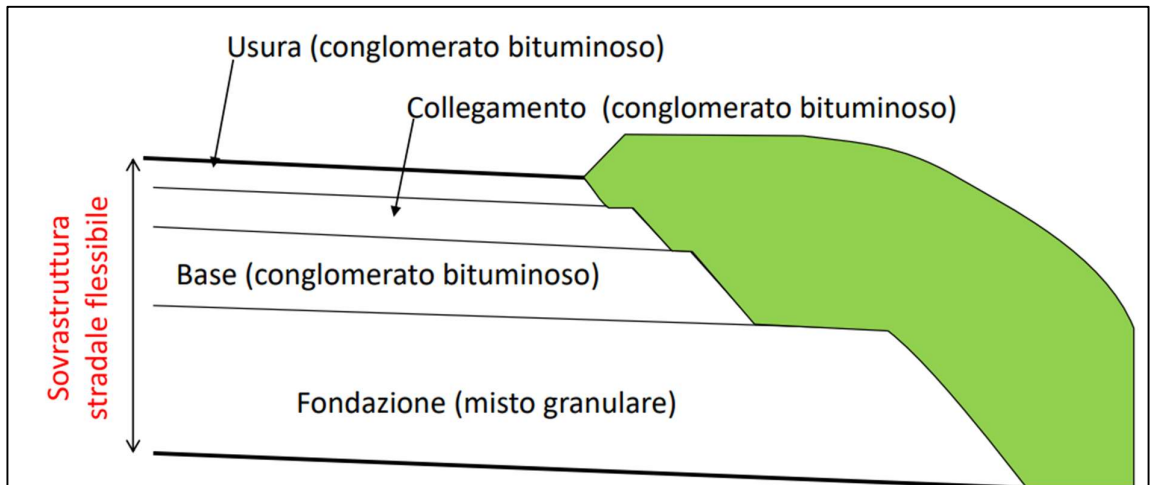


Figura 2.1. Strati tradizionali della sovrastuttura flessibile [1]

## 2.2. Calcolo della temperatura all'interno degli strati in conglomerato bituminoso

Per poter effettuare correttamente l'analisi strutturale di una pavimentazione stradale, è necessario conoscere nella maniera più accurata possibile la temperatura all'interno di ciascuno strato della pavimentazione stessa. Le proprietà strutturali del conglomerato bituminoso, infatti, sono fortemente influenzate dalla temperatura alla quale il materiale si viene a trovare.

Nel corso di questo lavoro di tesi verrà condotta un'estesa analisi delle temperature atmosferiche nella regione Lazio, al termine della quale si giungerà infine a un valore medio mensile considerato valido per tutta la regione. Tale approccio, però, non è sufficiente per determinare il regime termico degli strati della pavimentazione, poiché la temperatura in seno agli strati in conglomerato bituminoso non può essere considerata uguale a quella atmosferica: ciò comporterebbe gravi errori di valutazione dei moduli elastici, e conseguentemente valori della vita utile totalmente errati come output dell'analisi strutturale.

Per risolvere il problema della non corrispondenza tra le temperature atmosferiche e quelle all'interno della pavimentazione, Witczak [2] propone la seguente equazione:

$$MPT = MAT \left[ 1 + \left( \frac{1}{z + 4} \right) \right] - \frac{34}{z + 4} + 6$$

dove

- $MPT$  = temperatura media della pavimentazione [ $^{\circ}F$ ];
- $MAT$  = temperatura media dell'aria [ $^{\circ}F$ ];
- $z$  = profondità dalla sommità dello strato di usura [pollici].

Questa equazione permette di ottenere la temperatura a una profondità  $z$  dalla superficie stradale a partire dalla temperatura atmosferica. Bisogna però fare attenzione a due punti cruciali. In primis, le temperature  $MAT$ ,  $MPT$  vanno espresse in gradi Fahrenheit nell'equazione di Witczak: per questa ragione, se si lavora prevalentemente con le temperature espresse in gradi Celsius è necessario effettuare una conversione a monte e una conversione a valle dell'equazione di Witczak. Inoltre, la profondità  $z$  relativa a ogni strato della pavimentazione, oltre a essere espressa in pollici e a richiedere quindi una conversione dalle unità metriche, deve essere scelta in maniera appropriata. Gli approcci tipicamente impiegati in tal senso sono due:

- Considerare un punto a  $1/3$  della profondità dello strato interessato;
- Considerare un punto a metà della profondità dello strato interessato.

Per questa tesi, si sceglie di procedere con il secondo approccio: la profondità  $z$  di ciascuno strato è quindi pari alla distanza verticale tra la superficie dello strato di usura e la profondità mediana di ciascuno strato.

## 2.3. Calcolo dei moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso

Per calcolare il modulo elastico di uno strato in conglomerato bituminoso in funzione della temperatura e delle caratteristiche della miscela bituminosa sono disponibili in letteratura diversi metodi. Quello adottato per questo lavoro di tesi è il modello di Franken e Vanelstraete [3]. Attraverso la procedura descritta in seguito, il modello perviene alla formulazione del modulo elastico per il conglomerato bituminoso:

$$|E^*| = E_{\infty} \cdot R^*$$

Come detto, questo è solo l'ultimo passaggio di un procedimento su più fasi, che poggia le sue basi sui parametri derivati dalle curve maestre ottenute a partire da prove reologiche effettuate su campioni di bitume, secondo il modello di Christensen-Anderson [4].

La prima grandezza da trovare è il fattore di shift  $a(t)$ . Questo fattore ha lo scopo di adattare la curva maestra sperimentale alla temperatura della pavimentazione di cui si vuole ottenere il modulo elastico. Per temperature

superiori alla temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  (come generalmente accade per le temperature dei bitumi) il fattore di shift si calcola con l'equazione WLF (Williams-Landel-Ferry):

$$\log a(t) = \frac{-C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}$$

dove

- $T$  è la temperatura della pavimentazione di cui si vuole ricavare il modulo elastico [°C];
- $T_{ref}$  è la temperatura di riferimento della prova reologica [°C];
- $C_1, C_2$  sono i coefficienti della curva maestra ottenuta a partire dalla prova reologica [rispettivamente adimensionale e °C].

Dopodiché, è necessario calcolare la frequenza angolare  $\omega$  della prova reologica:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

dove  $f$  è la frequenza [Hz] a cui è stata effettuata la prova reologica. Ottenuta  $\omega$ , si può calcolare la frequenza angolare ridotta  $\omega_r$ :

$$\omega_r = \omega \cdot a(t)$$

La frequenza ridotta viene poi utilizzata, insieme ad altri parametri ricavati dalla curva maestra, per ricavare il modulo complesso del bitume:

$$G^* = G_g \cdot \left( 1 + \left( \frac{\omega_c}{\omega_r} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right)^{\frac{-R}{\log 2}}$$

dove

- $G_g$  è il modulo vetroso del bitume;
- $\omega_c$  è la frequenza di crossover;
- $\omega_r$  è la frequenza ridotta trovata nel passaggio precedente;
- $R$  è l'indice reologico.

Una volta ricavato il modulo complesso del bitume grazie al modello di Christensen-Anderson, si possono cominciare ad applicare le equazioni di Franken e Vanelstraete, a cominciare da quella per ricavare il modulo ridotto del bitume  $B^*$ :

$$B^* = \frac{G^*}{G_\infty}$$

dove

- $G^*$  è il modulo complesso del bitume ricavato in precedenza;
- $G_\infty$  è il modulo vetroso a taglio del bitume, tipicamente assunto pari a 1000 MPa.

Ottenuto il valore del modulo ridotto del bitume, vengono introdotte le variabili volumetriche relative alla miscela bituminosa. I volumi relativi delle varie fasi della miscela hanno una forte importanza nel calcolo del modulo elastico del conglomerato, e servono per calcolare il modulo vetroso della miscela  $E_\infty$  e il modulo ridotto della miscela  $R^*$ :

$$E_\infty = C \cdot \left(\frac{V_a}{V_l}\right)^{0.55} \cdot \exp(-0.0584 \cdot v)$$

$$\log R^* = \log B^* \cdot \left\{ 1 - 1.35 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-0.13 \cdot \frac{V_a}{V_l}\right) \right] \cdot (1 + 0.11 \cdot \log B^*) \right\}$$

dove

- $B^*$  è il modulo ridotto del bitume calcolato in precedenza;
- $C$  è una costante, pari a 14360 MPa;
- $V_a$  è la percentuale in volume di aggregati nella miscela;
- $V_l$  è la percentuale in volume di bitume nella miscela;
- $v$  è la percentuale in volume di vuoti nella miscela.

Infine, come già enunciato all'inizio di questo paragrafo, il modulo elastico di ciascuno strato di conglomerato bituminoso si può calcolare con la seguente formula, che coniuga il modulo vetroso e il modulo ridotto della miscela:

$$E^* = E_\infty \cdot R^*$$

## 2.4. Funzioni di trasferimento

Le funzioni di trasferimento sono equazioni di derivazione empirica, utilizzate per calcolare la vita utile di una pavimentazione in termini di passaggi di assi standard equivalenti (ESAL = Equivalent Standard Axle Load) in funzione delle caratteristiche tensionali e deformative della pavimentazione.

Le funzioni di trasferimento tipicamente utilizzate sono relative a due comportamenti tipici delle sovrastrutture stradali sottoposte al traffico veicolare: la fessurazione a fatica e l'ormaiamento.

## 2.4.1. Fessurazione a fatica

La funzione di trasferimento per la fessurazione a fatica assume la seguente forma:

$$N_f = f_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{f_2} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{f_3}$$

- $N_f$  è il numero di passaggi consentiti per limitare la fessurazione a fatica;
- $\varepsilon_t$  è la deformazione a trazione sul fondo dello strato di conglomerato bituminoso più in profondità (tipicamente, lo strato di base), pari a

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

dove le deformazioni assumono segno positivo in caso di tensione e negativo in caso di compressione;

- $E$  è il modulo elastico del conglomerato bituminoso;
- $f_1, f_2, f_3$  sono parametri di regressione.

Il valore dei parametri  $f_1, f_2, f_3$  è ciò che differenzia tra loro le svariate formulazioni della funzione di trasferimento legata alla fessurazione a fatica. Diversi studiosi e istituti specializzati hanno, infatti, attribuito a tali parametri i valori ricavati dall'interpolazione dei risultati ottenuti a partire dalle loro analisi. La tabella seguente raccoglie i parametri adottati da alcune organizzazioni e specialisti:

Tabella 2.1. Fattori di regressione applicati nelle funzioni di trasferimento per la fessurazione a fatica

Istituto/Studio	$f_1$	$f_2$	$f_3$
Shell [5]	$(0.856 \cdot V_b + 1.08)^5 \cdot (10^{-6})^{-1.8}$	5	1.8
Asphalt Institute [6]	$18.4 \cdot 4.32 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{4.84 \cdot (\frac{V_b}{V_b+V_a} - 0.69)} \cdot (6.9 \cdot 10^{-3})^{-0.854}$	3.291	0.854
Austrroads [7]	$(6918 \cdot (0.856 \cdot V_b + 1.08) \cdot 10^{-6})^5$	5	1.8
LCPC [8]	$(\epsilon_6 \cdot 10^6)^5$	5	0
UK TRRL [9]	$1.66 \cdot 10^{-10}$	4.32	0
BRRC [10]	$4.92 \cdot 10^{-14}$	4.72	0
Finn (10%) [11]	$5.79 \cdot 10^{-2}$	3.291	0.854

$V_b$  = volume percentuale di bitume (%)  
 $V_a$  = volume percentuale dei vuoti (%)  
 $\epsilon_6$  = deformazione che porta alla rottura a fatica dopo  $10^6$  cicli

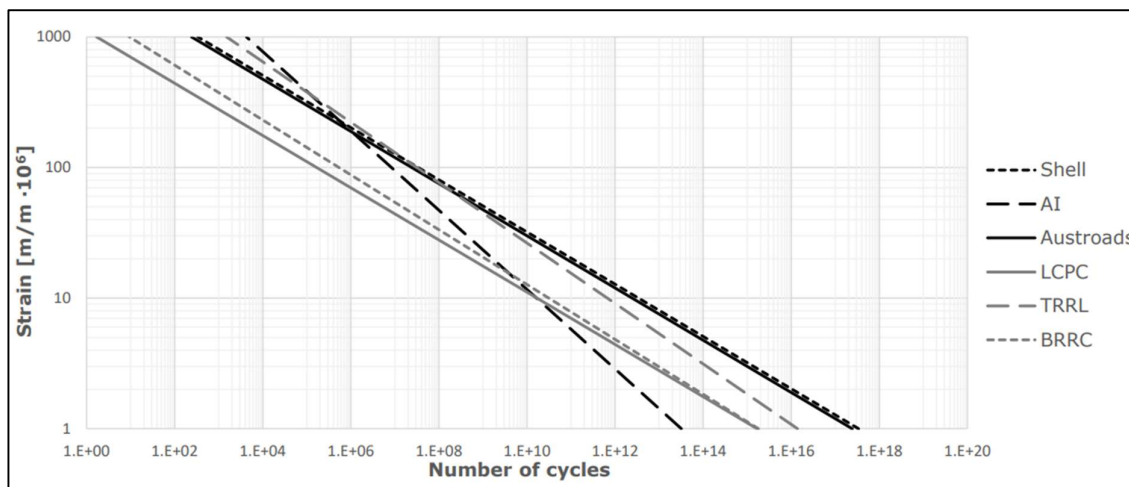


Figura 2.2. Correlazione tra deformazione e numero di passaggi per la funzione di trasferimento per la fessurazione a fatica, assumendo  $E=7000$  MPa,  $V_b=11\%$ ,  $V_a=5\%$ ,  $\epsilon_6=70 \cdot 10^{-6}$  [12]

È fondamentale specificare che tutti i coefficienti presenti nella tabella soprastante sono validi esclusivamente se il modulo elastico  $E$  viene espresso in psi (pound per square inch). Se invece  $E$  è espresso in unità di misura del Sistema Internazionale (Pascal o, più frequentemente, un suo multiplo) i coefficienti devono essere modificati di conseguenza, tenendo conto della conversione tra psi e unità di misura del Sistema Internazionale.

## 2.4.2. Ormaiamento

La funzione di trasferimento per l'ormaiamento assume la seguente forma:

$$N_d = f_4 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{f_5}$$

- $N_d$  è il numero di passaggi consentiti per limitare l'ormaiamento;
- $\varepsilon_c$  è la deformazione verticale di compressione alla sommità del sottofondo;
- $f_4, f_5$  sono parametri di regressione.

Anche per quanto riguarda l'ormaiamento, così come per la fessurazione a fatica, sono presenti in letteratura diversi modelli empirici:

Tabella 2.2. Fattori di regressione applicati nelle funzioni di trasferimento per l'ormaiamento

Istituto	$f_1$	$f_2$
Shell [5]	$6.15 \cdot 10^{-7}$	4
Asphalt Institute [6]	$1.365 \cdot 10^{-9}$	4.477
Austrroads [7]	$5.37 \cdot 10^{-15}$	7
LCPC [8]	$2.227 \cdot 10^{-9}$	4.505
UK TRRL [9]	$1.66 \cdot 10^{-10}$	4.32
BRR [10]	$4.92 \cdot 10^{-14}$	4.72

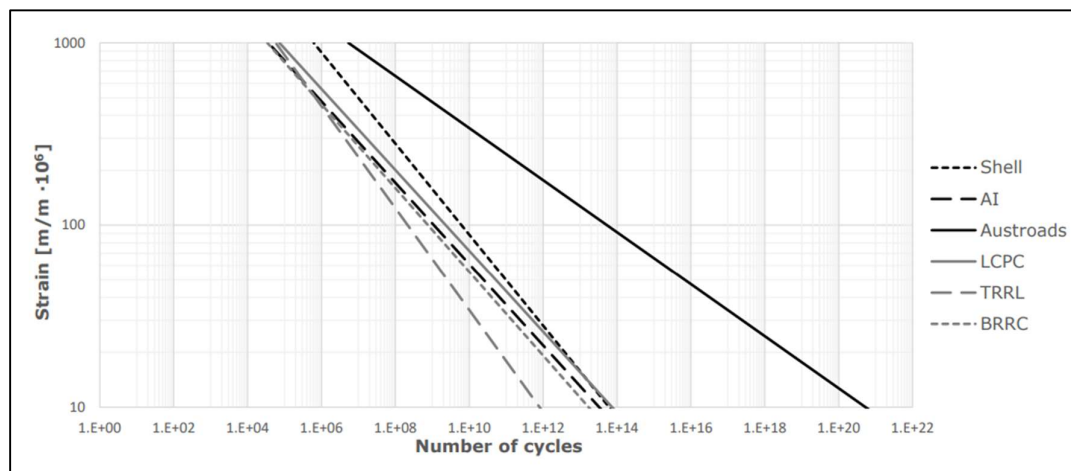


Figura 2.3. Correlazione tra deformazione e numero di passaggi per la funzione di trasferimento a ormaiamento [12]

# CAPITOLO 3: CONTESTO GEOGRAFICO E TECNICO

## 3.1. Premesse

Questo lavoro di tesi pone le sue basi su un progetto di ricerca effettuato dal Comitato Nazionale Italiano del PIARC (Associazione Mondiale della Strada).

Tale progetto, in corso di svolgimento tra il Politecnico di Torino, l'Università degli Studi di Napoli Federico II e l'Università Politecnica delle Marche, si è posto come primo obiettivo l'analisi LCA (Life Cycle Assessment) dell'impatto ambientale di una pavimentazione assunta come standard, definita "Caso di riferimento". Una volta ottenuti i risultati dell'LCA sul caso di riferimento, l'obiettivo del progetto consiste nel trovare soluzioni progettuali che permettano di decarbonizzare i processi costruttivi, sia incrementando le prestazioni a livello strutturale garantendo una maggiore vita utile dell'infrastruttura, sia adoperando materiali che consentano di ridurre l'impatto ambientale relativo ai processi produttivi, estrattivi, costruttivi e manutentivi.

I casi analizzati differiscono dal caso di riferimento unicamente per quanto riguarda i materiali impiegati per la costruzione degli strati di usura, di collegamento e di base; le altre caratteristiche della sovrastruttura (stratigrafia, granulometria, volume di traffico, localizzazione geografica, temperature, precipitazioni) non cambiano tra il caso di riferimento e gli altri due casi presi in esame. Nel caso di riferimento viene utilizzato un bitume tal quale, mentre i due altri casi differiscono dal caso di riferimento per via dell'aggiunta di materiali polimerici:

- Nel primo caso, il bitume viene modificato con l'aggiunta del polimero SBS (stirene-butadiene-stirene) vergine con una percentuale in massa pari al 3,5% rispetto al bitume;
- Nel secondo caso, viene aggiunto un polimero di riciclo direttamente in fase di miscelazione del conglomerato, con una percentuale in massa di polimero pari al 3,5% rispetto alla miscela.

L'aggiunta dei polimeri al bitume o alla miscela di conglomerato bituminoso si pone l'obiettivo di migliorare le prestazioni degli strati superficiali della pavimentazione, consentendo in questo modo un allungamento della vita utile. Il polimero di riciclo viene impiegato, inoltre, nel tentativo di abbattere

l'impatto ambientale riguardante la produzione di materiale plastico vergine.

La strada oggetto di analisi è una strada extraurbana secondaria con un traffico annuo pari a 692500 ESAL (assili standard equivalenti da 80 kN) situata all'interno della regione Lazio. Come si vedrà più avanti, il collocamento geografico della strada ha un impatto rilevante sulla determinazione di alcuni valori fondamentali per l'analisi strutturale, come ad esempio il modulo elastico degli strati in conglomerato bituminoso: tale valore, infatti, tende a variare molto rapidamente al variare della temperatura.

### **3.2. Caratteristiche progettuali della sovrastruttura stradale di riferimento**

La pavimentazione stradale assunta come caso di riferimento è formata dai seguenti strati, dall'alto verso il basso:

- strato di usura in conglomerato bituminoso, con uno spessore di 4 cm;
- strato di collegamento (o binder) in conglomerato bituminoso, con uno spessore di 6 cm;
- strato di base in conglomerato bituminoso, con uno spessore di 12 cm;
- strato di fondazione in misto granulare, con uno spessore di 20 cm e un modulo elastico pari a 400 MPa;
- sottofondo, con modulo elastico pari a 200 MPa.

È prevista l'applicazione di una mano d'attacco all'interfaccia tra gli strati di conglomerato bituminoso e di una mano di ancoraggio all'interfaccia tra lo strato di base e la fondazione in misto granulare, per garantire una buona adesione tra i vari strati. La mano d'attacco consiste in un'emulsione bituminosa tradizionale al 60% di bitume. Il bitume utilizzato per tutti gli strati in conglomerato bituminoso è bitume tal quale (non modificato).

La produzione dei materiali stradali avviene esclusivamente in impianto (è quindi esclusa la produzione in situ). L'impianto di produzione dei conglomerati bituminosi è alimentato con olio combustibile denso a basso tenore di zolfo (BTZ). Inoltre, si adoperano solo materiali di primo utilizzo.

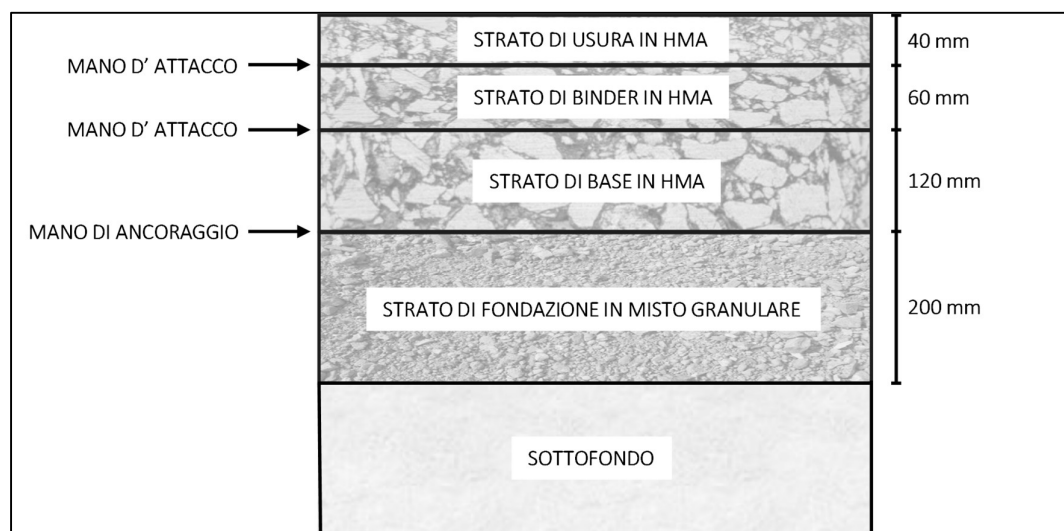


Figura 3.1. Schema degli strati della pavimentazione

Nella tabella sottostante è riportata la granulometria dei singoli strati:

Tabella 3.1. Granulometria degli strati

MATERIALI	HMA per strato di usura	HMA per strato di binder	HMA per strato di base	Misto granulare per fondazione
	(kg/tonnellata di miscela)			
<b>Aggregati grossi calcarei</b>	220,5 (22,05%)	534 (53,4%)	589 (58,9%)	965 (96,5%)
<b>Aggregati grossi basaltici</b>	220,5 (22,05%)	---	---	---
<b>Sabbia calcarea</b>	450 (45,0%)	400 (40,0%)	350 (35,0%)	35 (3,5%)
<b>Filler apporto calcareo</b>	57 (5,7%)	20 (2,0%)	19 (1,9%)	---
<b>Bitume tal quale</b>	52 (5,2%)	46 (4,6%)	42 (4,2%)	---
<b>Filler di recupero</b>	31	28	27	---
<b>Densità [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,38	2,36	2,35	1,90

La composizione granulometrica è fondamentale per ottenere la quantità di materiale che è necessario ricavare o produrre per la costruzione di ognuno degli strati della pavimentazione. Sono qui riportate le curve granulometriche dei tre strati in conglomerato bituminoso, accompagnate dalle raccomandazioni di conformità di ANAS [13] e ASPI [14]:

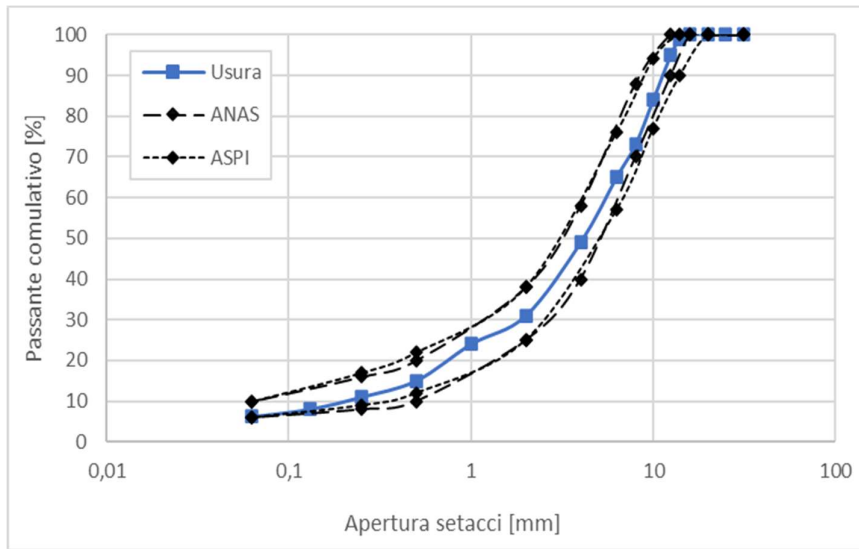


Figura 3.2. Curva granulometrica dello strato di usura

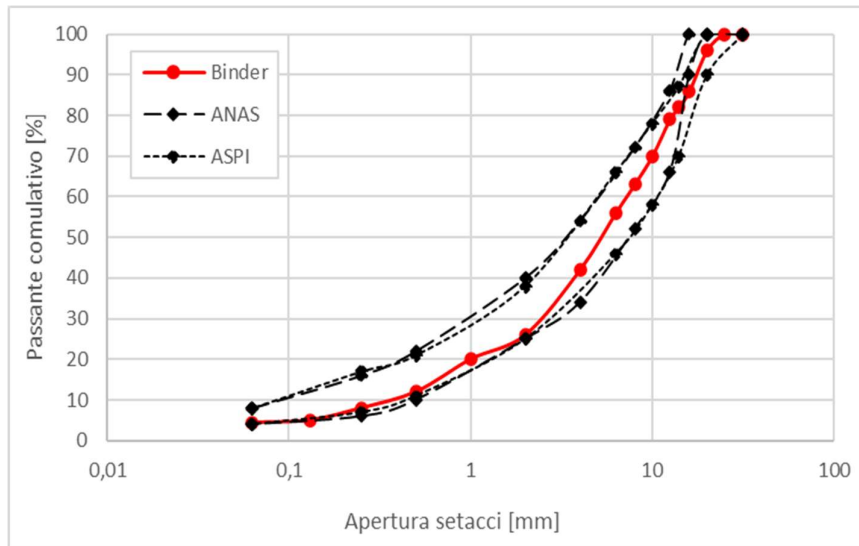


Figura 3.3. Curva granulometrica dello strato di collegamento

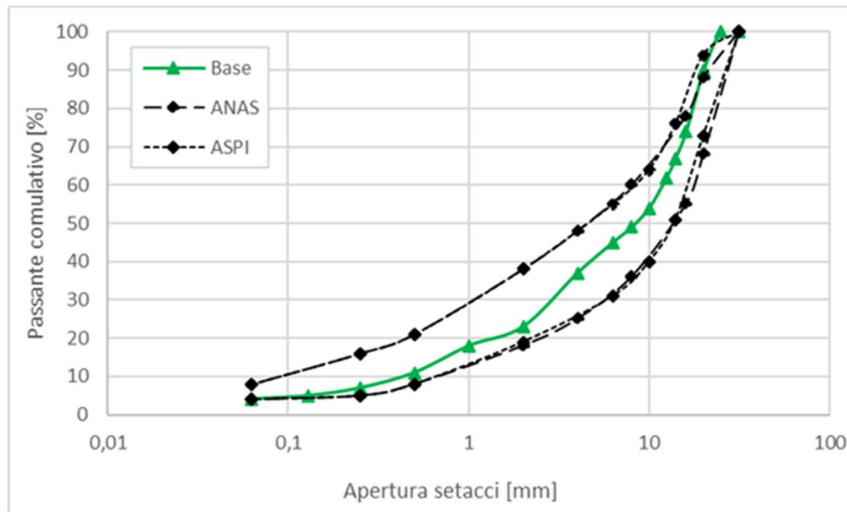


Figura 3.4. Curva granulometrica dello strato di base

La strada oggetto di studio è sottoposta a un traffico annuo pari a 13.850.000 ESAL (Equivalent Standard Axle Load) da 8,2 tonnellate, e deve garantire una vita utile di almeno 20 anni. Da questi dati si ricava con una semplice divisione che il numero annuo di ripetizioni di carico a cui è sottoposta la pavimentazione è pari a 692.500.

### 3.2.1. Volumetria degli strati in conglomerato bituminoso

Le quantità relative di ciascun materiale nei vari strati della pavimentazione sono state espresse finora in termini di percentuale in massa. Per poter svolgere alcuni calcoli dell'analisi strutturale (ad esempio il calcolo dei moduli elastici) è necessario convertire le percentuali in massa in percentuali in volume. Conoscendo le densità di ciascuno strato e la composizione percentuale degli strati (riportate nella tabella precedente), è possibile risalire tramite calcolo numerico alla densità di ciascun materiale:

Tabella 3.2. Densità dei materiali degli strati in conglomerato bituminoso

Materiale	Densità (kg/dm <sup>3</sup> )
Aggregato grosso calcareo	2.65
Aggregato grosso basaltico	2.9
Sabbia calcarea	2.5
Filler	2.68
Bitume	1.04

Conoscendo la densità dei singoli materiali e la composizione percentuale degli strati, è possibile calcolare per ciascuno strato la Massima Massa Volumica Teorica (MMVT), pari alla densità che avrebbe il materiale se non avesse vuoti:

$$MMVT = \frac{m_{tot}}{\sum_{i=1}^5 \frac{m_i}{\rho_i}}$$

dove

- $m_{tot}$  è la massa totale dello strato interessato;
- $m_i$  è la massa dell' $i$ -esimo materiale all'interno dello strato interessato;
- $\rho_i$  è la densità dell' $i$ -esimo materiale.

A partire dalla Massima Densità Teorica è possibile calcolare per ciascuno strato  $V_{MDT}$ , il volume che avrebbe lo strato se non fossero presenti vuoti:

$$V_{MDT} = \frac{m_{tot}}{MMVT}$$

Un'altra grandezza molto importante ai fini del calcolo è il volume effettivo  $V$  dello strato:

$$V = \frac{m_{tot}}{\rho}$$

dove  $\rho$  è la densità dello strato interessato. Confrontando il volume relativo alla Massima Densità Teorica e il volume effettivo  $V$  è possibile risalire alla percentuale in volume dei vuoti all'interno di uno strato:

$$v(\%) = 100 \cdot \frac{V_{MMVT}}{V}$$

La percentuale in volume di bitume si ottiene poi col seguente calcolo:

$$V_l(\%) = 100 \cdot \frac{m_{bitume}}{\rho_{bitume} \cdot V}$$

Infine, la percentuale in volume degli aggregati si ottiene con la seguente equazione:

$$V_a(\%) = 100 - (v + V_l)$$

A seguire lo svolgimento dei calcoli per quanto riguarda i tre strati in conglomerato bituminoso:

Tabella 3.3. Caratteristiche volumetriche degli strati in conglomerato bituminoso

Densità materiale [kg/dm <sup>3</sup> ]	Grandezza	Simbolo	Usura	Binder	Base
$\rho_1 = 2.65$	Massa aggregato grosso calcareo [g]	$m_1$	220.5	534	589
$\rho_2 = 2.90$	Massa aggregato grosso basaltico [g]	$m_2$	220.5		
$\rho_3 = 2.50$	Massa sabbia calcarea [g]	$m_3$	450	400	350
$\rho_4 = 2.68$	Massa filler [g]	$m_4$	57	20	19
$\rho_5 = 1.04$	Massa bitume [g]	$m_5$	52	46	42
	Massa totale strato [g]	$m_{tot}$	1000	1000	1000
	Densità strato [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$	2.38	2.36	2.35
	Massima massa volumica teorica strato [g/cm <sup>3</sup> ]	$MMVT$	2.43599	2.420119	2.440582
	Volume MMVT [cm <sup>3</sup> ]	$V_{MMVT}$	0.410511	0.413203	0.409738
	Volume effettivo [cm <sup>3</sup> ]	$V$	0.420168	0.423729	0.425532
	% volume vuoti	$v$	2.30	2.48	3.71
	% volume bitume	$V_l$	11.90	10.44	9.49
	% volume aggregati	$V_a$	85.80	87.08	86.80

### 3.3. Analisi meteorologica decennale del Lazio

L'analisi delle temperature di progetto della pavimentazione è un passaggio fondamentale per l'analisi strutturale e la determinazione della vita utile. I moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso, infatti, variano in maniera considerevole al variare della temperatura, a causa del

comportamento viscoelastico di tale materiale. Inoltre, un'analisi dei dati pluviometrici si rende utile per verificare che le precipitazioni non costituiscano un fattore di rischio per quanto riguarda il contenuto d'acqua del sottofondo stradale: se il contenuto d'acqua diventasse particolarmente elevato, infatti, le prestazioni a livello strutturale della pavimentazione stradale ne risentirebbero pesantemente.

Per ottenere valori di temperature e precipitazioni affidabili e riferiti a un periodo di tempo sufficientemente lungo (e quindi dotato di validità statistica), è stato consultato il sito web dell'ARSIAL (Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio) [15]. L'ARSIAL, tramite il suo Servizio Integrato Agrometeorologico, mette a disposizione dati mensili relativi alle temperature dell'aria minime, medie e massime, all'umidità relativa e alle precipitazioni. Tutti questi dati sono disponibili a partire dal 2004.

Per questo studio sono stati analizzati i dati meteorologici del periodo decennale compreso tra il 2015 e il 2024: gli anni precedenti al 2015, infatti, sono stati considerati poco significativi, per via della rapida evoluzione del clima dovuta al riscaldamento globale.

Sono stati raccolti i dati di cinque stazioni meteorologiche, una per Provincia:

- per la Provincia di Frosinone, la stazione di Alatri – Basciano;
- per la Provincia di Latina, la stazione di Pontinia – Cotarda;
- per la Provincia di Rieti, la stazione di Rieti – Piana di Rieti;
- per la Città Metropolitana di Roma, la stazione di Roma – Ponte di Nona;
- per la Provincia di Viterbo, la stazione di Viterbo – Pisello.

Ove possibile, sono state prese in considerazione stazioni meteorologiche situate nel capoluogo di Provincia. Nel caso in cui il capoluogo di Provincia non disponesse di stazioni meteorologiche, sono state prese in considerazione stazioni situate in località con caratteristiche altimetriche e climatiche il più possibile simili a quelle del capoluogo.

### 3.3.1. Analisi delle precipitazioni

La raccolta dei dati pluviometrici nel periodo 2015-2024 ha portato alle seguenti risultanze:

Tabella 3.4. Precipitazioni medie mensili nel Lazio nel decennio 2015–2024

Precipitazioni mensili (mm)	Frosinone	Latina	Rieti	Roma	Viterbo	MEDIA REGIONALE
Gennaio	102.4	82.4	107.5	56.2	42.5	<b>78.2</b>
Febbraio	109.9	64.1	85.0	59.3	49.4	<b>73.6</b>
Marzo	97.5	72.8	96.5	70.3	53.5	<b>78.1</b>
Aprile	68.1	51.3	68.3	55.2	34.3	<b>55.5</b>
Maggio	110.1	70.6	96.2	61.7	46.0	<b>76.9</b>
Giugno	62.5	31.9	50.5	38.6	27.9	<b>42.3</b>
Luglio	45.7	14.3	23.4	24.0	16.8	<b>24.8</b>
Agosto	69.1	26.0	51.8	38.7	27.3	<b>42.6</b>
Settembre	110.4	72.8	99.9	77.6	62.6	<b>84.7</b>
Ottobre	119.3	79.7	111.5	75.5	57.5	<b>88.7</b>
Novembre	176.0	139.8	156.4	104.1	81.7	<b>131.6</b>
Dicembre	128.9	100.3	129.5	63.4	56.9	<b>95.8</b>

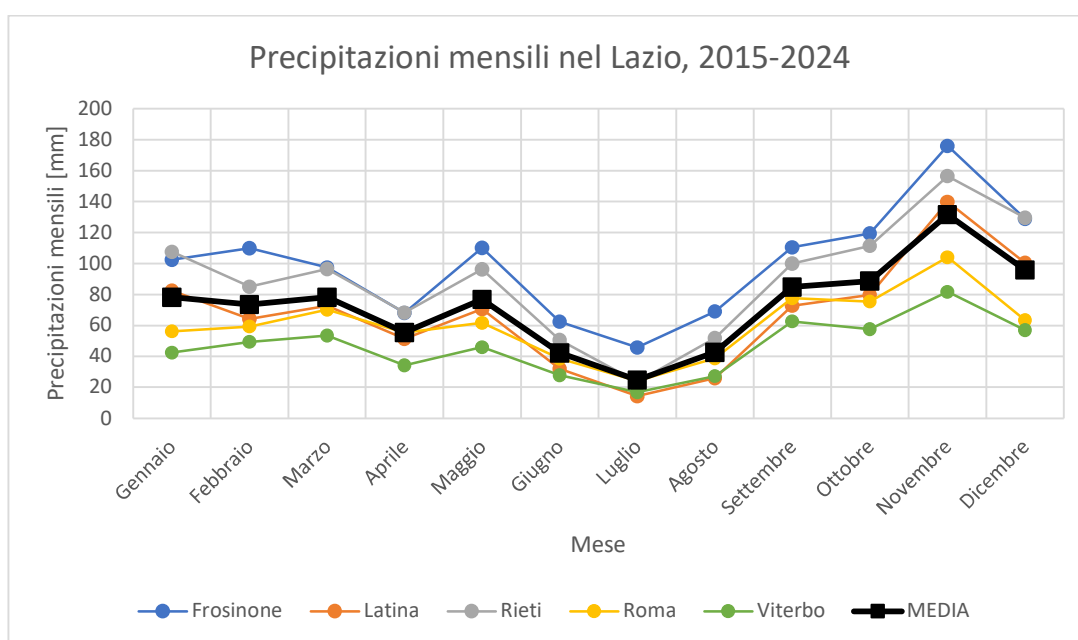


Figura 3.5. Precipitazioni medie mensili nel Lazio nel decennio 2015–2024

I dati rilevati nel Lazio dal 2015 al 2024 mostrano una quantità di precipitazioni sicuramente non trascurabile, specialmente nei mesi autunnali. Ciononostante, la pavimentazione, se costruita a regola d'arte e con le opportune opere di drenaggio, non risente di questo livello di precipitazioni. Uno studio pubblicato nel 2014 da Helen Fairweather e John Yeaman [16], infatti, ha analizzato l'evoluzione del contenuto d'acqua del sottofondo di una strada australiana sottoposta a piogge cicloniche. Lo studio si è focalizzato su una perturbazione ciclonica che ha colpito l'Australia Orientale (nello specifico il sobborgo di Sippy Downs) nel mese di gennaio 2013, e ha mostrato che il contenuto d'acqua del sottofondo stradale preso sotto esame ha subito forti variazioni solo dopo diversi giorni di pioggia molto intensa: nonostante le forti piogge, infatti, il contenuto d'acqua è rimasto sostanzialmente invariato attorno al 18% per i primi tre giorni della perturbazione ciclonica. Come è possibile comprendere dalla tabella e dal grafico sottostante, il contenuto d'acqua del sottofondo ha cominciato ad aumentare in maniera apprezzabile solo durante il quarto giorno consecutivo di pioggia, caratterizzato da una quantità di precipitazioni paragonabile alle precipitazioni di un intero mese autunnale nel Lazio, e ha raggiunto poi un picco attorno al 20% nel corso del quinto giorno consecutivo caratterizzato da piogge consistenti:

Tabella 3.5. Pioggia caduta a Sippy Downs (Queensland, Australia) durante la perturbazione ciclonica di gennaio 2013

<b>Giorno</b>	<b>Data</b>	<b>Precipitazioni (mm)</b>
Giovedì	24/01	42
Venerdì	25/01	52
Sabato	26/01	92
Domenica	27/01	198
Lunedì	28/01	95

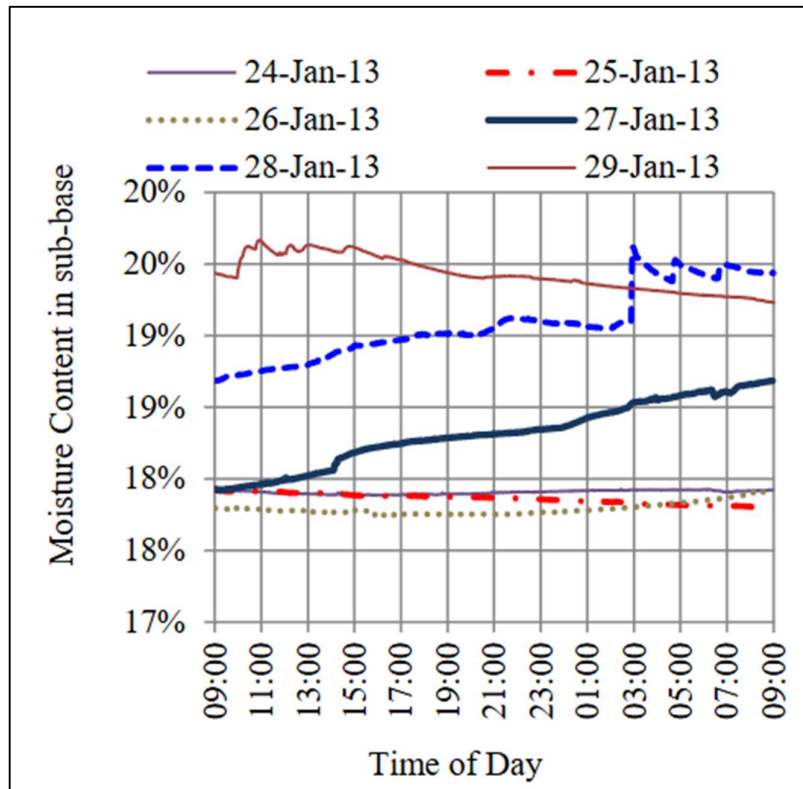


Figura 3.6. Contenuto d'acqua del sottofondo registrato tra il 24 e il 29 gennaio 2013 a Sippy Downs (Queensland, Australia)

Grazie ai risultati di questa ricerca, si può affermare con ragionevole sicurezza che, fatto salvo il verificarsi di fenomeni temporaleschi o ciclonici di eccezionale portata e/o durata, non è necessario adottare precauzioni particolari per quanto riguarda il contenuto d'acqua del sottofondo, dando per scontato che la pavimentazione stradale e i sistemi di drenaggio vengano realizzati a regola d'arte.

### 3.3.2. Analisi delle temperature atmosferiche

Una ricerca simile a quella delle precipitazioni è stata condotta per quanto riguarda le temperature minime e massime. Sono stati aggregati i dati riguardanti le temperature minime e massime mensili nelle cinque stazioni meteorologiche precedentemente menzionate, una per Provincia. Per ricavare la temperatura media è stata calcolata la media aritmetica tra la temperatura minima e la massima.

Tabella 3.6. Temperature minime, massime e medie mensili nel Lazio nel decennio 2015–2024

Temperature mensili (°C)	Frosinone			Latina			Rieti			Roma			Viterbo			MEDIA		
	m	M	A	m	M	A	m	M	A	m	M	A	m	M	A	m	M	A
Gennaio	3.6	12.7	8.1	2.5	15.2	8.8	-1.6	10.7	4.6	3.1	12.9	8.0	2.9	10.8	6.9	2.1	12.4	<b>7.3</b>
Febbraio	4.7	15.4	10.1	3.1	16.8	9.9	0.1	13.7	6.9	4.4	15.3	9.9	3.8	12.9	8.3	3.2	14.8	<b>9.0</b>
Marzo	5.8	18.3	12.0	4.3	18.5	11.4	1.6	15.9	8.7	5.9	17.4	11.6	4.7	14.5	9.6	4.5	16.9	<b>10.7</b>
Aprile	8.3	21.6	15.0	6.7	21.7	14.2	4.0	19.8	11.9	8.2	21.0	14.6	6.9	18.1	12.5	6.8	20.4	<b>13.6</b>
Maggio	11.8	24.6	18.2	11.5	25.9	18.7	8.7	23.3	16.0	12.6	25.0	18.8	10.7	22.2	16.5	11.1	24.2	<b>17.6</b>
Giugno	16.4	31.8	24.1	15.2	30.9	23.1	12.4	29.1	20.7	16.9	30.9	23.9	15.2	28.2	21.7	15.2	30.2	<b>22.7</b>
Luglio	19.6	36.0	27.8	17.0	33.4	25.2	14.4	32.8	23.6	19.8	34.5	27.1	18.2	32.1	25.1	17.8	33.7	<b>25.8</b>
Agosto	19.4	35.6	27.5	17.5	33.1	25.3	13.9	32.2	23.1	19.9	34.0	27.0	18.3	31.7	25.0	17.8	33.3	<b>25.6</b>
Settembre	15.6	29.5	22.5	15.1	29.4	22.3	10.6	26.7	18.7	16.4	28.8	22.6	14.9	26.1	20.5	14.5	28.1	<b>21.3</b>
Ottobre	12.2	23.6	17.9	11.2	25.6	18.4	7.1	22.0	14.6	12.6	23.8	18.2	11.7	21.3	16.5	11.0	23.2	<b>17.1</b>
Novembre	8.3	17.1	12.7	8.1	20.3	14.2	3.5	15.6	9.5	8.5	17.9	13.2	7.7	15.7	11.7	7.2	17.3	<b>12.3</b>
Dicembre	5.1	14.0	9.5	3.5	17.0	10.3	-0.7	11.4	5.3	4.2	14.2	9.2	4.4	12.3	8.3	3.3	13.8	<b>8.5</b>

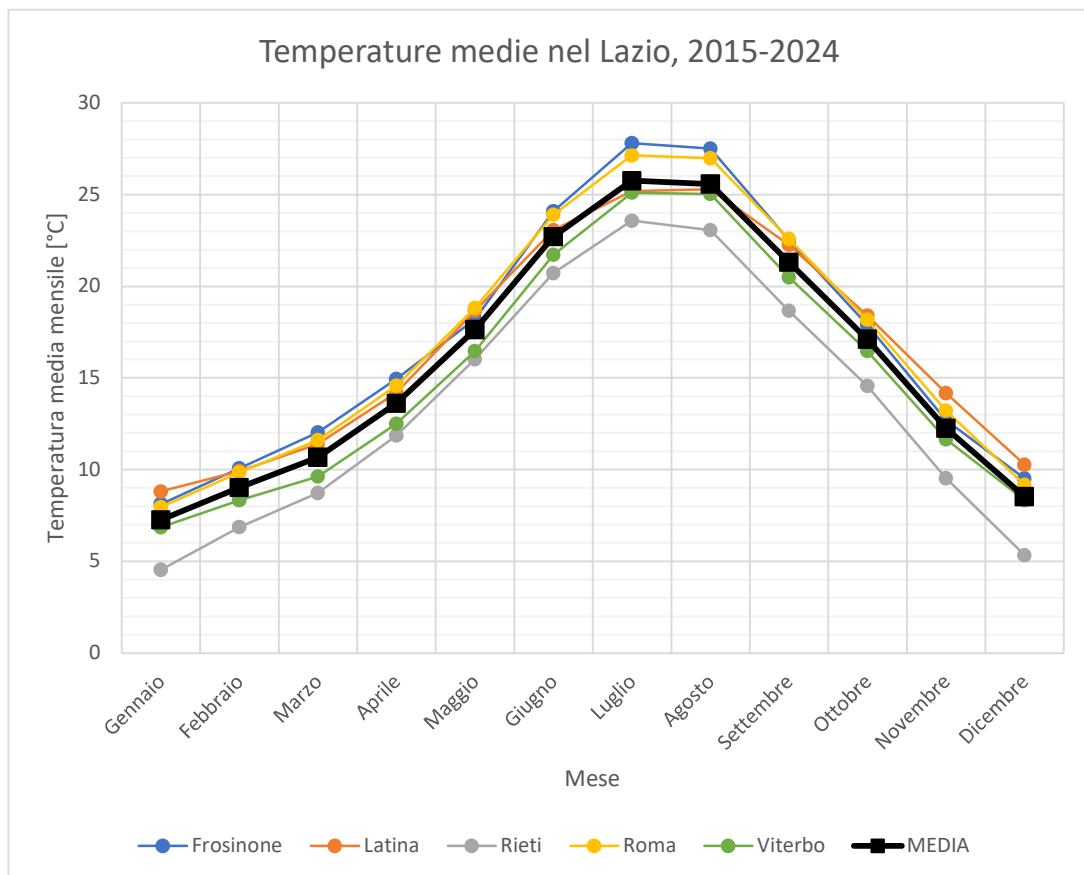


Figura 3.7. Temperature medie mensili nel Lazio nel decennio 2015–2024

È stata assunta come temperatura di riferimento per l'intera regione la media aritmetica delle temperature medie mensili delle cinque Province. Come si può desumere dalla tabella soprastante, le temperature dell'aria considerate per la progettazione della pavimentazione stradale variano da un minimo di 7.3 °C nel mese di gennaio a un massimo di 25.8 °C nel mese di luglio.

### 3.4. Temperature della pavimentazione stradale

Per poter svolgere i calcoli strutturali della pavimentazione stradale, si rende necessario ricavare la temperatura dei vari strati della pavimentazione a partire dalla temperatura atmosferica. Per fare ciò, bisogna per prima cosa stabilire le profondità a cui calcolare le temperature degli strati in conglomerato bituminoso. Si decide in questo caso di considerare per ciascuno strato il punto intermedio tra la sommità e il punto più in profondità:

Tabella 3.7. Profondità di calcolo delle temperature per gli strati in conglomerato bituminoso

	Usura	Binder	Base
Spessore [cm]	4	6	12
Profondità z [cm]	2	7	16
Profondità z [in]	0.787402	2.7559055	6.299213

La conversione da centimetri a pollici è necessaria per l'applicazione della formula di Witczak [2]:

$$MPT = MAT \left[ 1 + \left( \frac{1}{z + 4} \right) \right] - \frac{34}{z + 4} + 6$$

dove

- $MPT$  = temperatura media della pavimentazione [°F];
- $MAT$  = temperatura media dell'aria [°F];
- $z$  = profondità dalla sommità dello strato di usura [pollici].

Combinando le profondità calcolate e le temperature atmosferiche ricavate dai dati storici, grazie alla formula di Witczak si ottengono le seguenti temperature per i tre strati della pavimentazione oggetto dello studio:

Tabella 3.8. Calcolo delle temperature negli strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione

Mese	Aria [°C]	Aria [°F]	Usura [°F]	Binder [°F]	Base [°F]	Usura [°C]	Binder [°C]	Base [°C]
Gennaio	7.3	45.1	53.4	52.7	52.1	11.9	11.5	11.2
Febbraio	9.0	48.2	57.2	56.3	55.6	14.0	13.5	13.1
Marzo	10.7	51.2	60.8	59.8	58.9	16.0	15.4	14.9
Aprile	13.6	56.5	67.2	65.8	64.7	19.6	18.8	18.2
Maggio	17.6	63.7	76.0	74.2	72.6	24.4	23.4	22.6
Giugno	22.7	72.9	87.0	84.6	82.6	30.5	29.2	28.1
Luglio	25.8	78.4	93.6	90.9	88.7	34.2	32.7	31.5
Agosto	25.6	78.0	93.2	90.5	88.3	34.0	32.5	31.3
Settembre	21.3	70.3	83.9	81.7	79.9	28.9	27.6	26.6
Ottobre	17.1	62.8	74.8	73.0	71.6	23.8	22.8	22.0
Novembre	12.3	54.1	64.3	63.0	62.0	17.9	17.2	16.7
Dicembre	8.5	47.3	56.1	55.3	54.6	13.4	13.0	12.6

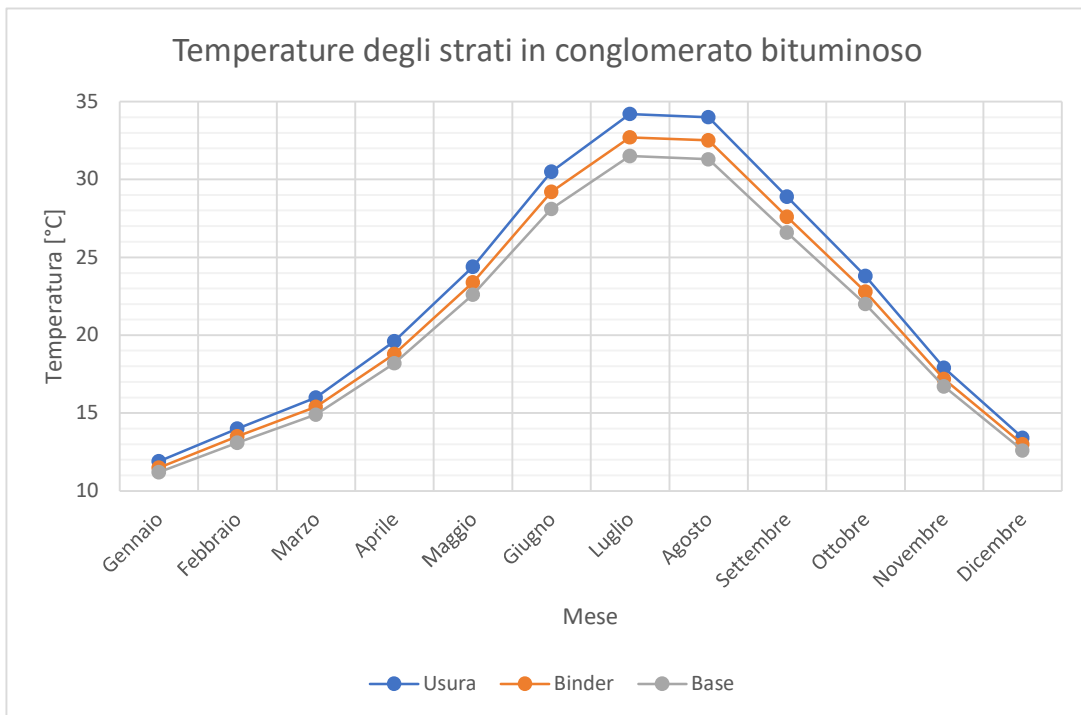


Figura 3.8. Temperature degli strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione

### 3.5. Calcolo dei moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso

Per il calcolo dei moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso vengono seguiti i passaggi previsti dal modello di Franken e Vanelstraete [3]

a partire da dati provenienti dalle curve maestre sperimentali di prove DSR (Dynamic Shear Rheometer) svolte durante la fase sperimentale della Tesi di Laurea Magistrale di Sayra Ivette Portilla Moncayo presso il Politecnico di Torino [17]. I fattori utilizzati nelle formule del modello di Franken e Vanelstraete vengono calcolati seguendo le indicazioni dettate dal modello di Christensen e Anderson [4] a partire dai dati sperimentali provenienti dalle prove di laboratorio.

Per il suo lavoro di tesi, Portilla Moncayo ha svolto prove DSR sia su campioni bituminosi tal quali sia su campioni bituminosi modificati con polimero SBS radiale. I due casi verranno ora trattati separatamente.

### 3.5.1. Bitume tal quale

Le prove di laboratorio effettuate da Portilla Moncayo sul bitume tal quale hanno portato alle seguenti risultanze sperimentali:

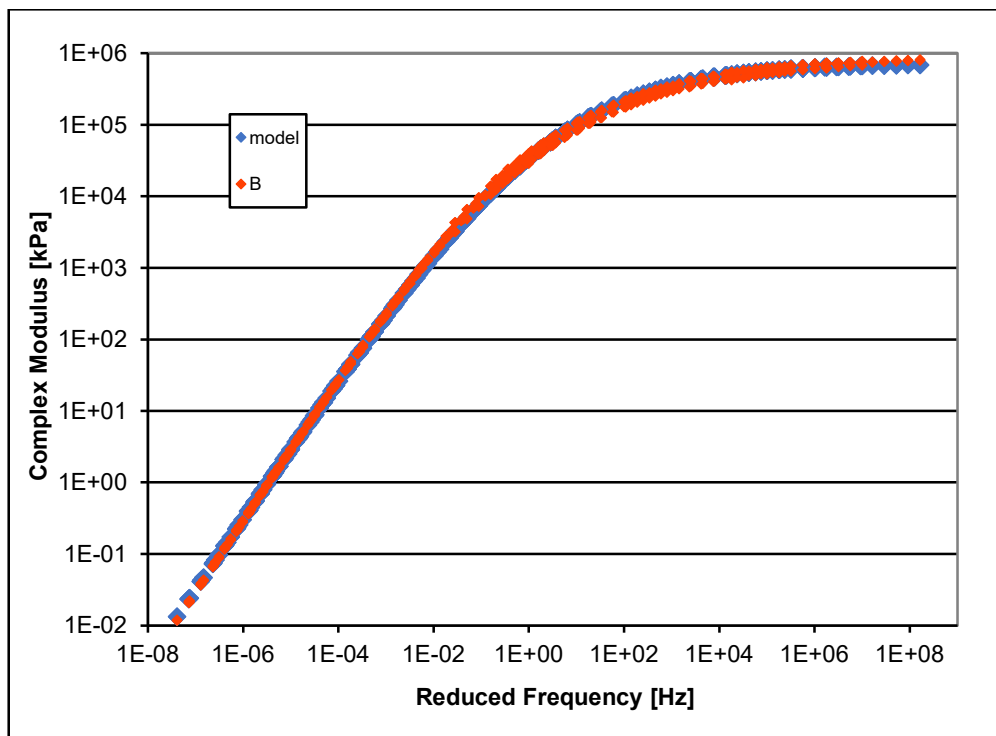


Figura 3.9. Curva maestra del Modulo Complesso del bitume tal quale

Tabella 3.9. Parametri sperimentali di Christensen e Anderson del bitume tal quale

Grandezza sperimentale	Simbolo	Valore	Unità di misura
Frequenza della prova DSR	$f$	10	Hz
Temperatura di riferimento	$T_{ref}$	0	°C
Coefficiente della curva maestra	$C_1$	21.7	-
Coefficiente della curva maestra	$C_2$	151.7	°C
Logaritmo del modulo vetroso del bitume	$\log G_g$	5.854026642	(kPa)
Frequenza di crossover	$\omega_c$	2.113316132	rad/s
Indice reologico	$R$	1.151986468	-

Per ottenere i moduli elastici  $E^*$  dei conglomerati bituminosi, i dati sperimentali vengono elaborati con le equazioni di Christensen-Anderson e Franken-Vanelstraete, qui nuovamente riportate per completezza (per le spiegazioni esplicite sul significato di ciascun termine si rimanda al capitolo 2):

$$\log a(t) = \frac{-C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$\omega_r = \omega \cdot a(t)$$

$$G^* = G_g \cdot \left( 1 + \left( \frac{\omega_c}{\omega_r} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right)^{\frac{-R}{\log 2}}$$

$$B^* = \frac{G^*}{G_\infty}$$

$$E_\infty = C \cdot \left( \frac{V_a}{V_l} \right)^{0.55} \cdot \exp(-0.0584 \cdot v)$$

$$\log R^* = \log B^* \cdot \left\{ 1 - 1.35 \cdot \left[ 1 - \exp \left( -0.13 \cdot \frac{V_a}{V_l} \right) \right] \cdot (1 + 0.11 \cdot \log B^*) \right\}$$

$$E^* = E_\infty \cdot R^*$$

Considerando le diverse temperature e diverse composizioni volumetriche percentuali dei tre strati in conglomerato bituminoso, i moduli elastici degli strati di usura, binder e base vanno calcolati separatamente:

Tabella 3.10. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di usura nei 12 mesi, bitume tal quale

USURA	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.9	-1.5760587	0.0265425	62.83185307	1.6677126	44.65018	0.04465	0.392611	37216.08	<b>14611</b>
Febbraio	14.0	-1.8335526	0.0146706	62.83185307	0.92178	32.51808	0.032518	0.342015	37216.08	<b>12728</b>
Marzo	16.0	-2.0716726	0.0084787	62.83185307	0.5327301	23.76942	0.023769	0.29611	37216.08	<b>11020</b>
Aprile	19.6	-2.4785544	0.0033224	62.83185307	0.2087495	13.3194	0.013319	0.222316	37216.08	<b>8274</b>
Maggio	24.4	-3.0089983	0.0009795	62.83185307	0.0615434	5.790624	0.005791	0.140572	37216.08	<b>5232</b>
Giugno	30.5	-3.6360459	0.0002312	62.83185307	0.0145256	1.95495	0.001955	0.071266	37216.08	<b>2652</b>
Luglio	34.2	-3.995512	0.000101	62.83185307	0.0063485	1.005318	0.001005	0.044911	37216.08	<b>1671</b>
Agosto	34.0	-3.9741695	0.0001061	62.83185307	0.0066682	1.046618	0.001047	0.04623	37216.08	<b>1720</b>
Settembre	28.9	-3.467484	0.0003408	62.83185307	0.0214139	2.64345	0.002643	0.086873	37216.08	<b>3233</b>
Ottobre	23.8	-2.9398589	0.0011485	62.83185307	0.0721641	6.48524	0.006485	0.150093	37216.08	<b>5586</b>
Novembre	17.9	-2.2921246	0.0051036	62.83185307	0.3206677	17.48435	0.017484	0.255196	37216.08	<b>9497</b>
Dicembre	13.4	-1.7615548	0.0173159	62.83185307	1.0879905	35.61437	0.035614	0.356109	37216.08	<b>13253</b>

Tabella 3.11. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di collegamento nei 12 mesi, bitume tal quale

BINDER	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.5	-1.52989	0.029519	62.83185	1.85475	47.14754	0.047148	0.485139	39888.55	<b>19352</b>
Febbraio	13.5	-1.7757	0.016761	62.83185	1.053126	34.98854	0.034989	0.433164	39888.55	<b>17278</b>
Marzo	15.4	-2.00328	0.009925	62.83185	0.62359	26.0594	0.026059	0.384413	39888.55	<b>15334</b>
Aprile	18.8	-2.39276	0.004048	62.83185	0.254346	15.11713	0.015117	0.302335	39888.55	<b>12060</b>
Maggio	23.4	-2.90165	0.001254	62.83185	0.078801	6.900196	0.0069	0.204615	39888.55	<b>8162</b>
Giugno	29.2	-3.5049	0.000313	62.83185	0.019646	2.473673	0.002474	0.113432	39888.55	<b>4525</b>
Luglio	32.7	-3.85154	0.000141	62.83185	0.008844	1.316584	0.001317	0.075485	39888.55	<b>3011</b>
Agosto	32.5	-3.83095	0.000148	62.83185	0.009273	1.367895	0.001368	0.077447	39888.55	<b>3089</b>
Settembre	27.6	-3.34256	0.000454	62.83185	0.028551	3.291045	0.003291	0.134883	39888.55	<b>5380</b>
Ottobre	22.8	-2.83525	0.001461	62.83185	0.091819	7.677771	0.007678	0.216452	39888.55	<b>8634</b>
Novembre	17.2	-2.21421	0.006107	62.83185	0.383683	19.52475	0.019525	0.339521	39888.55	<b>13543</b>
Dicembre	13.0	-1.70694	0.019636	62.83185	1.233787	38.11298	0.038113	0.44782	39888.55	<b>17863</b>

Tabella 3.12. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di base nei 12 mesi, bitume tal quale

BASE	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.2	-1.49111	0.032277	62.83185	2.028028	49.32543	0.049325	0.55426	39056.66	<b>21648</b>
Febbraio	13.1	-1.72703	0.018748	62.83185	1.178	37.17832	0.037178	0.50293	39056.66	<b>19643</b>
Marzo	14.9	-1.94569	0.011332	62.83185	0.712017	28.12352	0.028124	0.453715	39056.66	<b>17721</b>
Aprile	18.2	-2.32038	0.004782	62.83185	0.300471	16.79019	0.01679	0.368252	39056.66	<b>14383</b>
Maggio	22.6	-2.81088	0.001546	62.83185	0.097118	7.981982	0.007982	0.261358	39056.66	<b>10208</b>
Giugno	28.1	-3.3937	0.000404	62.83185	0.02538	3.010124	0.00301	0.154632	39056.66	<b>6039</b>
Luglio	31.5	-3.72927	0.000187	62.83185	0.011719	1.649746	0.00165	0.10722	39056.66	<b>4188</b>
Agosto	31.3	-3.70932	0.000195	62.83185	0.01227	1.711072	0.001711	0.109731	39056.66	<b>4286</b>
Settembre	26.6	-3.23671	0.00058	62.83185	0.036431	3.950092	0.00395	0.180527	39056.66	<b>7051</b>
Ottobre	22.0	-2.74682	0.001791	62.83185	0.112555	8.83314	0.008833	0.274659	39056.66	<b>10727</b>
Novembre	16.7	-2.14853	0.007103	62.83185	0.446323	21.39515	0.021395	0.407403	39056.66	<b>15912</b>
Dicembre	12.6	-1.66101	0.021827	62.83185	1.37141	40.3172	0.040317	0.517519	39056.66	<b>20213</b>

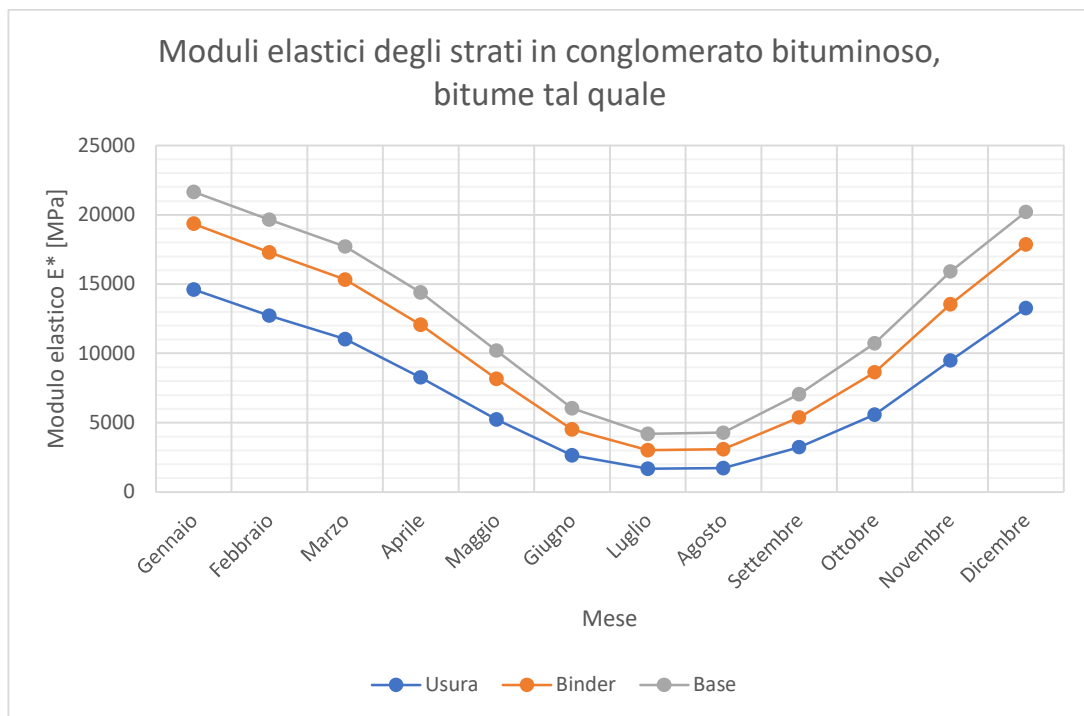


Figura 3.10. Moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso, bitume tal quale

### 3.5.2. Bitume modificato con polimero SBS radiale

Le prove di laboratorio effettuate da Portilla Moncayo sul bitume modificato con polimero SBS (stirene-butadiene-stirene) radiale hanno portato alle seguenti risultanze sperimentali:

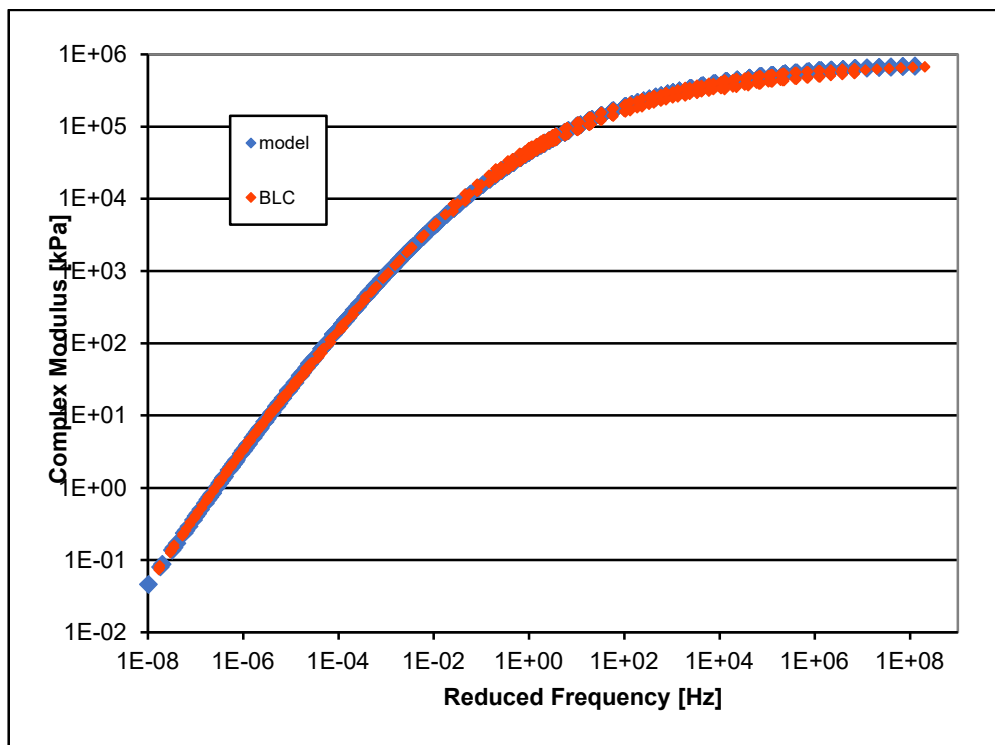


Figura 3.11. Curva maestra del Modulo Complesso del bitume modificato con SBS radiale

Tabella 3.13. Parametri sperimentali di Christensen e Anderson del bitume modificato con SBS radiale

Grandezza sperimentale	Simbolo	Valore	Unità di misura
Frequenza della prova DSR	$f$	10	Hz
Temperatura di riferimento	$T_{ref}$	0	°C
Coefficiente della curva maestra	$C_1$	26.1	-
Coefficiente della curva maestra	$C_2$	177.4	°C
Logaritmo del modulo vetroso del bitume	$\log G_g$	5.890705459	(kPa)
Frequenza di crossover	$\omega_c$	0.131612536	rad/s
Indice reologico	$R$	1.649323212	-

Per ottenere i moduli elastici  $E^*$  dei conglomerati bituminosi, i dati sperimentali vengono elaborati con le equazioni di Christensen-Anderson e Franken-Vanelstraete (per ulteriori dettagli si rimanda al capitolo 2). I risultati dei calcoli si trovano nelle tabelle seguenti:

Tabella 3.14. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di usura nei 12 mesi, bitume modificato con SBS radiale

USURA	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.9	-1.63749	0.0230415	62.83185307	1.447738	50.764	0.050764	0.414229	37216.08	<b>15416</b>
Febbraio	14.0	-1.9083451	0.0123497	62.83185307	0.775952	39.40907	0.039409	0.372199	37216.08	<b>13852</b>
Marzo	16.0	-2.1596637	0.0069237	62.83185307	0.435027	30.68015	0.03068	0.333179	37216.08	<b>12400</b>
Aprile	19.6	-2.5909837	0.0025646	62.83185307	0.161137	19.27196	0.019272	0.267727	37216.08	<b>9964</b>
Maggio	24.4	-3.1568882	0.0006968	62.83185307	0.043782	9.781296	0.009781	0.188774	37216.08	<b>7025</b>
Giugno	30.5	-3.8311674	0.0001475	62.83185307	0.009269	3.946028	0.003946	0.11176	37216.08	<b>4159</b>
Luglio	34.2	-4.2203326	6.021E-05	62.83185307	0.003783	2.228227	0.002228	0.077725	37216.08	<b>2893</b>
Agosto	34.0	-4.197173	6.351E-05	62.83185307	0.00399	2.307484	0.002307	0.079529	37216.08	<b>2960</b>
Settembre	28.9	-3.6493391	0.0002242	62.83185307	0.014088	5.093527	0.005094	0.130359	37216.08	<b>4851</b>
Ottobre	23.8	-3.0828944	0.0008262	62.83185307	0.051914	10.73524	0.010735	0.198469	37216.08	<b>7386</b>
Novembre	17.9	-2.3930603	0.0040452	62.83185307	0.254167	23.98857	0.023989	0.297395	37216.08	<b>11068</b>
Dicembre	13.4	-1.8325162	0.0147056	62.83185307	0.923982	42.37709	0.042377	0.383994	37216.08	<b>14291</b>

Tabella 3.15. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di collegamento nei 12 mesi, bitume modificato con SBS radiale

BINDER	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.5	-1.58903	0.025761	62.83185	1.618638	53.02116	0.053021	0.506214	39888.55	<b>20192</b>
Febbraio	13.5	-1.84741	0.01421	62.83185	0.892837	41.78154	0.041782	0.463796	39888.55	<b>18500</b>
Marzo	15.4	-2.0874	0.008177	62.83185	0.513786	33.02122	0.033021	0.423372	39888.55	<b>16888</b>
Aprile	18.8	-2.49983	0.003163	62.83185	0.198768	21.34143	0.021341	0.353034	39888.55	<b>14082</b>
Maggio	23.4	-3.04203	0.000908	62.83185	0.057036	11.29499	0.011295	0.263111	39888.55	<b>10495</b>
Giugno	29.2	-3.68966	0.000204	62.83185	0.012839	4.816367	0.004816	0.168107	39888.55	<b>6706</b>
Luglio	32.7	-4.06424	8.63E-05	62.83185	0.005419	2.813683	0.002814	0.122756	39888.55	<b>4897</b>
Agosto	32.5	-4.04193	9.08E-05	62.83185	0.005705	2.907791	0.002908	0.12523	39888.55	<b>4995</b>
Settembre	27.6	-3.51485	0.000306	62.83185	0.019201	6.121728	0.006122	0.19189	39888.55	<b>7654</b>
Ottobre	22.8	-2.97107	0.001069	62.83185	0.06716	12.32557	0.012326	0.274504	39888.55	<b>10950</b>
Novembre	17.2	-2.31049	0.004892	62.83185	0.307392	26.20942	0.026209	0.385335	39888.55	<b>15370</b>
Dicembre	13.0	-1.77504	0.016786	62.83185	1.054716	44.73442	0.044734	0.475814	39888.55	<b>18980</b>

Tabella 3.16. Passaggi di calcolo del modulo elastico dello strato di base nei 12 mesi, bitume modificato con SBS radiale

BASE	Temp [°C]	log(a(t))	a(t)	w(10Hz) [rad/s]	w_r [rad/s]	G* [MPa]	B*	R*	E <sub>∞</sub> [MPa]	E* [MPa]
Gennaio	11.2	-1.54834	0.028292	62.83185	1.77764	54.97103	0.054971	0.574204	39056.66	<b>22426</b>
Febbraio	13.1	-1.79619	0.015989	62.83185	1.004603	43.85634	0.043856	0.532779	39056.66	<b>20809</b>
Marzo	14.9	-2.0266	0.009406	62.83185	0.590995	35.09486	0.035095	0.492623	39056.66	<b>19240</b>
Aprile	18.2	-2.42302	0.003776	62.83185	0.237224	23.2207	0.023221	0.421048	39056.66	<b>16445</b>
Maggio	22.6	-2.94505	0.001135	62.83185	0.071307	12.72275	0.012723	0.325922	39056.66	<b>12729</b>
Giugno	28.1	-3.56988	0.000269	62.83185	0.016916	5.680974	0.005681	0.219766	39056.66	<b>8583</b>
Luglio	31.5	-3.93191	0.000117	62.83185	0.00735	3.414457	0.003414	0.166281	39056.66	<b>6494</b>
Agosto	31.3	-3.91034	0.000123	62.83185	0.007724	3.522592	0.003523	0.169259	39056.66	<b>6611</b>
Settembre	26.6	-3.40108	0.000397	62.83185	0.024952	7.128367	0.007128	0.247001	39056.66	<b>9647</b>
Ottobre	22.0	-2.87667	0.001328	62.83185	0.083467	13.81771	0.013818	0.338228	39056.66	<b>13210</b>
Novembre	16.7	-2.24096	0.005742	62.83185	0.360765	28.20235	0.028202	0.454199	39056.66	<b>17739</b>
Dicembre	12.6	-1.72675	0.018761	62.83185	1.178778	46.78859	0.046789	0.544587	39056.66	<b>21270</b>

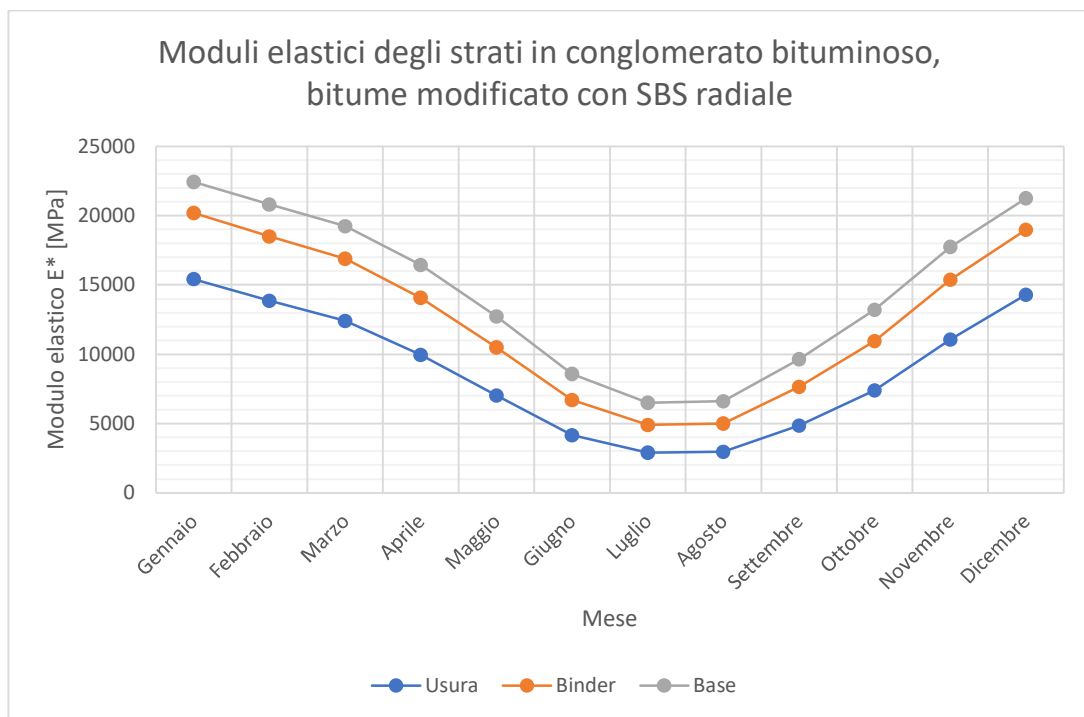


Figura 3.12. Moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso, bitume modificato con SBS radiale

I valori dei moduli elastici risultanti da questa fase di calcolo diventano successivamente dati di input per l'analisi strutturale delle pavimentazioni.

# CAPITOLO 4: ANALISI STRUTTURALE E LCA

## 4.1. Premesse dell'analisi strutturale su KenPave

Il cuore del presente lavoro di tesi consiste nel raffronto dal punto di vista dell'impatto ambientale tra conglomerati bituminosi di diversa composizione. Ove possibile, oltre all'analisi LCA è stata svolta anche l'analisi strutturale per mezzo del software KenPave, per verificare che le pavimentazioni interessate garantiscano delle prestazioni soddisfacenti (specificatamente, una vita utile di almeno 20 anni).

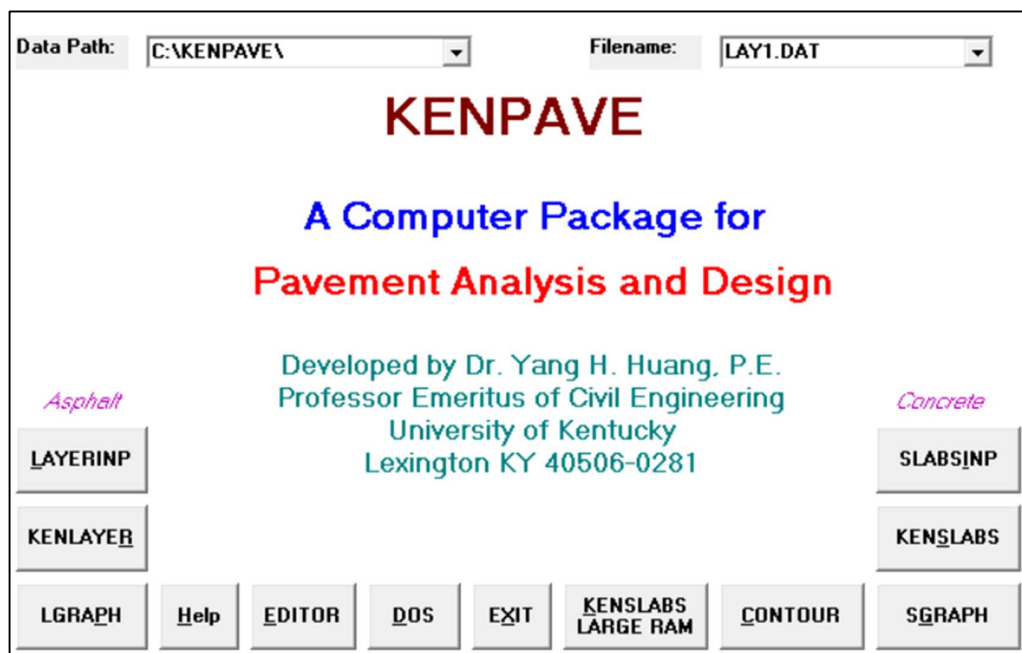


Figura 4.1. Schermata iniziale del software KenPave

Tale software è stato sviluppato dal Prof. Dr. Yang H. Huang dell'Università del Kentucky, e dà la possibilità di effettuare valutazioni strutturali sia sulle pavimentazioni flessibili (*Asphalt*) sia su quelle rigide (*Concrete*).

### 4.1.1. Parametri di input dell'analisi strutturale

Il software KenPave consente di effettuare simulazioni sulla durabilità delle pavimentazioni a partire da tutti i parametri della sovrastruttura che si vuole analizzare. Per poter effettuare i calcoli, il software ha bisogno di una serie di dati di input. Sono qui elencati i parametri di input di tutte le simulazioni effettuate per questo studio:

Tabella 4.1. Parametri di input su KenPave

Codice	Spiegazione	Valore	Note
<b>MATL</b>	Tipo di materiale	1	Materiale elastico lineare
<b>NPY</b>	Numero di periodi per anno	12	Uno per ogni mese
<b>NLG</b>	Numero di gruppi di carico	1	
<b>DEL</b>	Tolleranza per l'integrazione numerica	.001	
<b>NL</b>	Numero di strati	5	
<b>ICL</b>	Numero massimo di cicli di integrazione numerica	80	Scelto convenzionalmente
<b>NSTD</b>	Tipo di risposte	9	Spostamenti, tensioni e deformazioni
<b>NUNIT</b>	Sistema di unità di misura	1	Sistema Internazionale (lunghezze in cm, tensioni in kPa, pesi di volume in kN/m <sup>3</sup> )
<b>TH</b>	Spessore degli strati	4 6 12 20	
<b>PR</b>	Coefficiente di Poisson degli strati	.35 .35 .35 .4 .4	0.35 per gli strati in conglomerato bituminoso, 0.40 per fondazione e sottofondo
<b>INT</b>	Condizioni di interfaccia	1 1 1 1	Adesione tra tutti gli strati
	Moduli elastici degli strati in CB	Variabili	Vedasi paragrafo dedicato
	Modulo elastico fondazione	4.000E+05	
	Modulo elastico sottofondo	2.000E+05	
<b>CR</b>	Raggio di contatto	10	Raggio di contatto tipico di un assile standard
<b>CP</b>	Pressione di contatto	700	Calcolata in funzione del carico di un assile standard (80 kN) e del raggio di contatto
<b>NPT</b>	Numero di punti per cui si desidera valutare gli effetti	2	
<b>XW</b>	Passo delle ruote lungo l'asse X	0	
<b>YW</b>	Passo delle ruote lungo l'asse Y	30	Interasse standard tra due ruote dello stesso assile
<b>XPT, YPT</b>	Coordinate dei punti di valutazione degli effetti	0, 0; 0, 15	
<b>FT</b>	Coefficienti della funzione di trasferimento a fatica	variabili	In funzione del modello scelto
	Coefficienti della funzione di trasferimento a ormaimento	variabili	In funzione del modello scelto
<b>TNLR</b>	Numero di ripetizioni di carico per ogni mese	57708	692500 ripetizioni di carico annue divise per i 12 mesi

## 4.1.2. Funzioni di trasferimento adottate

Durante la fase sperimentale di questo lavoro di tesi sono state effettuate numerose simulazioni strutturali con l'ausilio del software KenPave, adoperando svariate funzioni di trasferimento e molteplici combinazioni differenti di moduli elastici, coefficienti di Poisson, condizioni di adesione tra gli strati, temperature della pavimentazione etc. La ripetizione di tali simulazioni con tutte le combinazioni del caso ha reso possibile l'emersione di un fenomeno caratteristico: la rottura per fessurazione a fatica è stata sempre raggiunta precedentemente rispetto alla rottura per ormaiamento, con un margine piuttosto rilevante tra i due fenomeni.

Tale fenomeno non ha validità universale; tuttavia, limitando l'analisi alle condizioni di partenza di questo lavoro di tesi, la tendenza della rottura per fessurazione a fatica ad avvenire nettamente in anticipo rispetto alla rottura per ormaiamento è risultata incontrovertibile. Per questo motivo, tutte le risultanze delle analisi strutturali presenti in questo capitolo riguardano esclusivamente le funzioni di trasferimento per la fessurazione a fatica, trascurando le funzioni di trasferimento per l'ormaiamento.

Per quanto concerne le funzioni di trasferimento a fatica, sono stati selezionati ai fini dell'analisi strutturale i seguenti modelli:

Tabella 4.2. Funzioni di trasferimento per la fessurazione a fatica selezionate per l'analisi strutturale

Modello	Coefficienti (convertiti in unità S.I.)
<b>Asphalt Institute (coeff. standard)</b>	$f_1 = 0.414$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$
<b>Asphalt Institute (tenendo conto della volumetria)</b>	$f_1 = 0.571$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$
<b>Modello di Finn</b>	$f_1 = 0.301$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$
<b>UK TRRL</b>	$f_1 = 1.66 \cdot 10^{-10}$ $f_2 = 4.32$ $f_3 = 0$

Una volta effettuata la simulazione su KenPave con ciascuna delle funzioni di trasferimento per fessurazione a fatica di cui sopra, si sceglie come risultato finale delle analisi quello derivante dal modello che rilascia come output l'esito più severo, a favore di sicurezza. Il confronto quantitativo tra i risultati ottenuti adottando i quattro modelli selezionati verrà trattato nei paragrafi successivi.

## 4.2. Costruzione del modello su SimaPro

Per ricostruire correttamente il ciclo di vita di un prodotto su SimaPro, è necessario prima di tutto avere a disposizione tutte le materie prime e i materiali elaborati utilizzati per la costruzione del prodotto stesso. Una parte delle materie prime (ad esempio il misto granulare per lo strato di fondazione) sono presenti nativamente sul database Ecoinvent, mentre i materiali elaborati (ad esempio il conglomerato bituminoso) devono passare necessariamente attraverso un processo implementato ad hoc su SimaPro, a partire dalle materie prime e l'energia necessaria per la loro produzione.

Una volta creati i processi relativi ai materiali da costruzione, questi vengono integrati con i processi legati alle attività di trasporto, costruzione, manutenzione e smaltimento/riciclo. Tali passaggi verranno trattati approfonditamente nei prossimi paragrafi.

## 4.2.1. Mezzi adoperati e trasporto dei materiali

Quando si svolge l'analisi LCA di un prodotto, le emissioni generate dai mezzi di trasporto o di lavoro adoperati costituiscono una componente molto rilevante rispetto al totale. Per questo motivo, è bene definire con precisione quali mezzi vengono adoperati, quanto carburante consumano e qual è la loro produzione:

Tabella 4.3. Mezzi adoperati

Mezzo	Consumo di carburante	Produzione
<b>Autocarro 30t (a pieno carico)</b>	0,6 l/km	30 t/km
<b>Pala gommata</b>	23 l/h	220 t/h
<b>Finitrice</b>	21 l/h	140 t/h
<b>Fresa</b>	100 l/h	200 t/h
<b>Rullo per conglomerati bituminosi</b>	13 l/h	100 t/h
<b>Rullo per misti granulari</b>	13 l/h	550 m <sup>3</sup> /h
<b>Emulsionatrice</b>	8,5 l/h	0,025 km <sup>2</sup> /h
<b>Spazzatrice</b>	15 l/h	0,038 km <sup>2</sup> /h
<b>Grader</b>	13,75 l/h	19 t/h

Per effettuare l'analisi LCA su SimaPro è richiesta la conversione del consumo di carburante da unità di volume a unità di massa (ad esempio, da litri l'ora a kilogrammi l'ora): per effettuare tale conversione si adotta una densità del carburante pari a 0,835 kg/l.

Inoltre, va specificato che per quanto riguarda l'autocarro si considerano solo gli impatti del viaggio di andata a cassone pieno, trascurando il peso proprio del veicolo. Il viaggio di ritorno viene considerato nei calcoli solo se vengono caricati sull'autocarro mezzi per la costruzione o demolizione della pavimentazione.

Come si può facilmente immaginare, le emissioni legate al trasporto delle materie prime sono direttamente proporzionali alla distanza di trasporto

delle stesse. Per questo motivo, è necessario definire accuratamente tali distanze:

Tabella 4.4. Distanze di trasporto dei materiali

Nome parametro su SimaPro	Valore	Definizione
<b>Dbasalt</b>	75	(km) distanza cava basalto - impianto di produzione miscela
<b>Dbitumen</b>	200	(km) distanza raffineria - impianto di produzione miscela
<b>Dlimestone</b>	75	(km) distanza cava - impianto di produzione miscela
<b>Dmix</b>	20	(km) distanza impianto di produzione miscela - sito di costruzione

## 4.2.2. Produzione dei materiali da costruzione non presenti nel database Ecoinvent

Il database Ecoinvent3\_11 contiene quasi tutte le materie prime necessarie per effettuare l'analisi LCA delle pavimentazioni. Quelle mancanti nativamente vengono sostituite con processi produttivi creati a partire da materie prime ed elaborazioni presenti nel database.

Il caso del bitume verrà trattato specificamente per ciascuno dei 3 casi studio, in quanto la differenza tra i bitumi adoperati è il punto focale dell'esperimento su cui si basa questo lavoro di tesi. Per il resto, i materiali non presenti nativamente nel database Ecoinvent sono i seguenti:

- **Emulsione bituminosa.** Viene utilizzata per le mani d'attacco tra i vari strati della pavimentazione, e la sua produzione viene ricostruita su SimaPro a partire dalle seguenti risorse:

Tabella 4.5. Produzione di 1 kg di emulsione bituminosa

Risorse / Processi	Quantità
Bitume	650 g
Acido cloridrico (soluzione al 30%)	3 g
Acqua	344 g
Emulsionante	3 g
Produzione di calore da gas di raffineria	38,7 kJ
Produzione di calore da olio combustibile	9,29 kJ
Elettricità a medio voltaggio	0,02 kWh

- **Produzione di conglomerato bituminoso a caldo in impianto.** Questo è il primo di una serie di processi dove i valori di input variano a seconda dello strato (usura, binder, base) a causa della loro differente composizione volumetrica.

Tabella 4.6. Produzione di 1 kg di miscela di conglomerato bituminoso in impianto

Risorse / processi	Quantità Strato di usura	Quantità Strato di binder	Quantità Strato di base
Elettricità a medio voltaggio	2,5 Wh	2,5 Wh	2,5 Wh
Produzione di calore da olio combustibile	75,5 Wh	73,5 Wh	69,5 Wh
Lavoro della pala gommata	4,05E-06 h	4,24545E-06 h	4,26818E-06 h

### 4.2.3. Elaborazioni non presenti nel database EcoInvent

Alcune elaborazioni complesse non sono presenti nativamente nel database EcoInvent, e devono essere quindi create da zero. Tali elaborazioni sono:

- **Costruzione degli strati della pavimentazione (a caldo).** Questo processo contiene l'insieme delle operazioni compiute dalle macchine operatrici e il consumo di risorse a esse correlato.

Tabella 4.7. Realizzazione di 1 kg di pavimentazione in conglomerato bituminoso

Risorse / processi	Quantità Strato di usura	Quantità Strato di binder	Quantità Strato di base
Lavoro della finitrice	7,14E-06 h	7,14E-06 h	7,14E-06 h
Lavoro del rullo	1,00E-05 h	1,00E-05 h	1,00E-05 h
Lavoro dell'emulsionatrice	4,20E-07 h	2,82E-07 h	1,42E-07 h
Acqua anti-sticking per il rullo	25 g	25 g	25 g
Autobotte per trasporto acqua	5,00E-04 tkm	5,00E-04 tkm	5,00E-04 tkm

- **Manutenzione della pavimentazione.** Questo processo contiene tutti i materiali e i processi coinvolti nella manutenzione della pavimentazione, che è composta dalle fasi di fresatura dello strato esistente usurato, rifacimento dello strato usurato, trasporto in

impianto del materiale fresato. Si noti che a partire dalla prossima tabella verranno riportate in *corsivo* le voci già approfondite nei paragrafi precedenti.

Tabella 4.8. Manutenzione della pavimentazione stradale (unità funzionale = 1 kg di miscela c.b.)

<b>Risorse / processi</b>	<b>Quantità Strato di usura</b>	<b>Quantità Strato di binder</b>	<b>Quantità Strato di base</b>
Basalto	441 g		
Ghiaia		534 g	589 g
Sabbia	450 g	400 g	350 g
Filler	57 g	20 g	19 g
Bitume	52 g	46 g	42 g
Trasporto basalto in impianto	3,31E-02 tkm		
Trasporto ghiaia in impianto		4,01E-02 tkm	4,42E-02 tkm
Trasporto sabbia in impianto	3,38E-02 tkm	3,00E-2 tkm	2,63E-02 tkm
Trasporto filler in impianto	4,28E-03 tkm	1,50E-03 tkm	1,43E-03 tkm
Trasporto bitume in impianto	1,04E-02 tkm	9,20E-03 tkm	8,40E-03 tkm
<i>Produzione di miscela di conglomerato in impianto</i>	1 kg	1 kg	1 kg
Trasporto miscela da impianto a sito di costruzione	2,00E-02 tkm	2,00E-02 tkm	2,00E-02 tkm
<i>Produzione emulsione bituminosa</i>	6,3 g	4,24 g	2,13 g
Trasporto emulsione da impianto produzione a impianto miscelazione	1,26E-03 tkm	8,47E-04 tkm	4,26E-04 tkm
Trasporto emulsione da impianto miscelazione a sito di costruzione	1,26E-04 tkm	8,47E-05 tkm	4,26E-05 tkm
Lavoro della fresa	5,00E-06 h	5,00E-06 h	5,00E-06 h
Lavoro della finitrice	7,14E-06 h	7,14E-06 h	7,14E-06 h
Lavoro del rullo	1,00E-05 h	1,00E-05 h	1,00E-05 h
Lavoro dell'emulsionatrice	4,20E-07 h	2,82E-07 h	1,42E-07 h
Lavoro della spazzatrice	2,76E-07 h	1,86E-07 h	9,33E-08 h
Acqua anti-sticking per il rullo	25 g	25 g	25 g
Autobotte per trasporto acqua	5,00E-04 tkm	5,00E-04 tkm	5,00E-04 tkm

- **End of life.** Questa elaborazione tiene conto della fresatura degli strati della pavimentazione al termine della vita utile e del trasporto del materiale fresato dal sito di costruzione all'impianto di accantonamento (che ai fini di questa analisi corrisponde con l'impianto di miscelazione del conglomerato).

Tabella 4.9. End of life di 1 kg di materiale a fine vita utile

Risorse / Processi	Quantità
Lavoro della fresa	5,00E-06 h
Trasporto del fresato	2,00E-2 tkm

#### 4.2.4. Fasi del prodotto

A partire dalle materie prime e dalle elaborazioni approfondite nei paragrafi precedenti, si vanno a creare su SimaPro i processi relativi all'assemblaggio del prodotto finale "Pavimentazione".

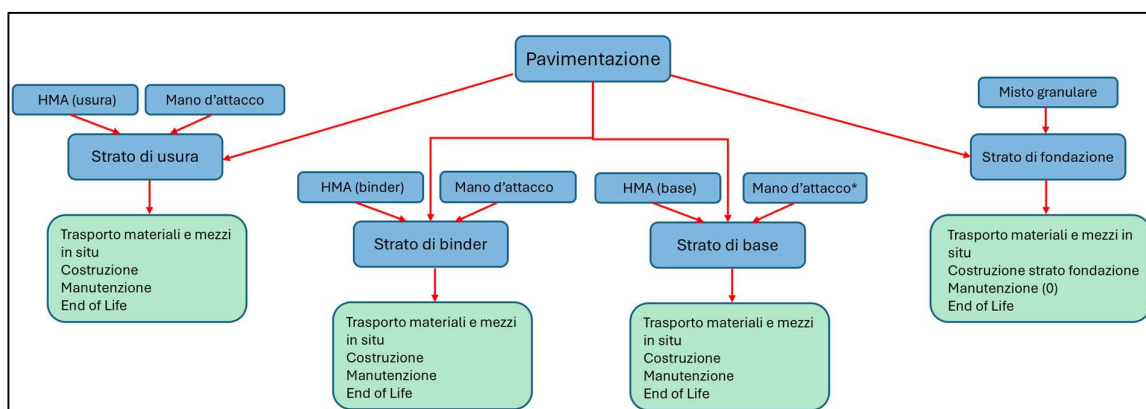


Figura 4.2. Schema riassuntivo delle fasi del prodotto

È importante notare che, mentre nei passaggi precedenti l'unità funzionale era stata il chilogrammo di miscela, da questo momento in poi si comincia a effettuare i calcoli in funzione del metro quadro di superficie stradale, unità ben più efficace da un punto di vista operativo e molto utile per rappresentare la sovrastruttura nella sua interezza: prendere in considerazione una superficie stabilita anziché una massa consente di valutare tutti gli strati della pavimentazione allo stesso tempo, tenendo debitamente in conto anche gli spessori degli strati che la compongono.

Sono qui riportati tutti i passaggi intermedi:

- **HMA.** In questa fase viene analizzata la creazione della miscela di Hot Mixed Asphalt per ciascuno dei tre strati in conglomerato bituminoso.

Tabella 4.10 Risorse e processi per la preparazione dell'HMA necessario per 1 mq di pavimentazione stradale

Risorse / Processi	Quantità Strato di usura	Quantità Strato di binder	Quantità Strato di base
Basalto	42,0 kg		
Ghiaia		75,6 kg	166 kg
Sabbia	42,8 kg	56,6 kg	98,7 kg
Filler	5,43 kg	2,83 kg	5,36 kg
Bitume	4,95 kg	6,51 kg	11,8 kg
Trasporto basalto in impianto	3,15 tkm		
Trasporto ghiaia in impianto		5,67 tkm	12,5 tkm
Trasporto sabbia in impianto	3,21 tkm	4,25 tkm	7,4 tkm
Trasporto filler in impianto	0,407 tkm	0,212 tkm	0,402 tkm
Trasporto bitume in impianto	0,99 tkm	1,30 tkm	2,37 tkm
<i>Produzione di conglomerato bituminoso a caldo in impianto</i>	95,2 kg	142 kg	282 kg

- **Fondazione.** Poiché lo strato di fondazione non contiene materiali elaborati ma solo materie prime di estrazione, non è presente nessuno dei processi di elaborazione visti nei paragrafi precedenti per gli strati in conglomerato bituminoso.

Tabella 4.11. Materiali necessari per la costruzione dello strato di fondazione

Risorse / Processi	Quantità
Ghiaia	367 kg
Sabbia	13,3 kg

- **Mano d'attacco.** Come nel caso dell'HMA, in questa fase si vanno a riorganizzare i materiali e i processi già visti nei paragrafi precedenti, scalandoli in funzione della superficie stradale anziché della massa di materiale.

Tabella 4.12. Risorse e processi per la produzione e il trasporto della mano d'attacco richiesta per 1 mq di superficie stradale

Risorse / Processi	Quantità
Bitume	390 g
Acido cloridrico (soluzione al 30%)	1,8 g
Acqua	204 g
Emulsionante	1,8 g
Produzione di calore da gas di raffineria	23,2 kJ
Produzione di calore da olio combustibile	5,57 kJ
Elettricità a medio voltaggio	12 Wh
Trasporto emulsione da impianto di produzione emulsione a impianto di miscelazione conglomerato	0,12 tkm
Trasporto emulsione da impianto di miscelazione conglomerato a sito di costruzione	0,012 tkm

- **Usura / Binder / Base / Fondazione.** In questa fase vengono riunite tutte le fasi del ciclo di vita di ciascuno strato (costruzione, manutenzione, end of life).

Prima di riportare i valori per ciascuno strato, vanno fatte delle considerazioni legate al numero di cicli di manutenzione necessari per ciascuno strato nel corso del suo ciclo di vita. Considerando una vita utile di 20 anni, si stabilisce di effettuare la manutenzione dello strato di usura ogni 5 anni e dello strato di collegamento ogni 10 anni. Lo strato di base, a differenza dei due strati superficiali, non è oggetto di manutenzione e viene sostituito insieme al resto della pavimentazione al termine della vita utile. Con le tempistiche qui riportate, sono quindi previsti 3 cicli di manutenzione per lo strato di usura e 1 ciclo di manutenzione per lo strato di collegamento. I valori riportati nella tabella sottostante per quanto riguarda la manutenzione dipendono in maniera direttamente proporzionale dal numero di cicli di manutenzione: per questo motivo, quando nel prosieguo di questo lavoro di tesi si andranno ad affrontare situazioni che prevedono un numero di cicli di manutenzione diverso da quello qui riportato, il valore da inserire nella riga "Manutenzione" andrà aggiornato di conseguenza.

Tabella 4.13. Processi coinvolti nella vita utile di una superficie di 1 mq di ciascuno strato della pavimentazione

Risorse / Processi	Quantità Strato di usura	Quantità Strato di binder	Quantità Strato di base	Quantità Fondazione
<i>HMA</i>	1 (usura)	1 (binder)	1 (base)	
<i>Fondazione</i>				1
<i>Mano d'attacco</i>	1	1	1	
Trasporto della miscela dall'impianto di miscelazione al sito di costruzione	1,9 tkm	2,83 tkm	5,64 tkm	
Trasporto del misto granulare per la fondazione dalla cava al sito di costruzione				28,5 tkm
Trasporto mezzi per la costruzione della fondazione				0,213 tkm
<i>Costruzione degli strati della pavimentazione (a caldo)</i>	95,2 kg (usura)	142 kg (binder)	282 kg (base)	
Lavoro del grader				2,00E-02 h
Lavoro del rullo				3,64E-04 h
<i>Manutenzione della pavimentazione</i>	286 kg (usura) [95,2 x 3 cicli]	142 kg (binder) [142 x 1 ciclo]	0 kg (base) [282 x 0 cicli]	
<i>End of Life</i>	95,2 kg	142 kg	282 kg	380 kg

- **Pavimentazione.** È l'ultimo passaggio dell'elaborazione su SimaPro: sono qui comprese infatti tutte le elaborazioni viste in precedenza. Oltre agli strati analizzati nello scorso paragrafo, tale processo considera il trasporto dei mezzi per la costruzione e manutenzione (tenendo conto del numero di cicli di manutenzione previsti, si veda il punto precedente per ulteriori dettagli) degli strati in conglomerato bituminoso e dei mezzi per la demolizione dell'intera pavimentazione.

Tabella 4.14. Processi del ciclo di vita di 1 mq di pavimentazione stradale

Risorse / Processi	Quantità
<i>Usura</i>	1
<i>Binder</i>	1
<i>Base</i>	1
<i>Fondazione</i>	1
Trasporto mezzi per la costruzione degli strati in c.b.	0,1728 tkm
Trasporto mezzi per la manutenzione degli strati in c.b.	0,9984 tkm
Trasporto mezzi per la demolizione della pavimentazione	0,16 tkm

### 4.3. Caso di riferimento: Bitume tal quale

Lo scopo di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un raffronto a livello strutturale e di impatto ambientale tra conglomerati bituminosi diversi tra loro per via dei materiali utilizzati. Il primo caso che si va ad analizzare è un conglomerato bituminoso prodotto utilizzando bitume tal quale, senza aggiunta di polimeri. Verranno trattati nei paragrafi successivi il caso di conglomerato bituminoso realizzato con bitume modificato con SBS radiale e il caso di miscela con polimero di addizione di riciclo.

#### 4.3.1. Analisi strutturale

Nell'ottica dell'analisi strutturale, risulta necessario ottenere i moduli elastici degli strati in funzione della temperatura. Sono qui riportati i moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso (per i passaggi intermedi si rimanda ai capitoli precedenti):

Tabella 4.15. Moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso, bitume tal quale [MPa]

<b>Mese</b>	<b>Usura</b>	<b>Binder</b>	<b>Base</b>
<b>Gennaio</b>	14611	19352	21648
<b>Febbraio</b>	12728	17278	19643
<b>Marzo</b>	11020	15334	17721
<b>Aprile</b>	8274	12060	14383
<b>Maggio</b>	5232	8162	10208
<b>Giugno</b>	2652	4525	6039
<b>Luglio</b>	1671	3011	4188
<b>Agosto</b>	1720	3089	4286
<b>Settembre</b>	3233	5380	7051
<b>Ottobre</b>	5586	8634	10727
<b>Novembre</b>	9497	13543	15912
<b>Dicembre</b>	13253	17863	20213

Inserendo tali valori come input dell'analisi strutturale su KenPave insieme a tutti gli altri parametri riportati in precedenza e adoperando le funzioni di trasferimento indicate, si ottengono i seguenti valori di vita utile:

Tabella 4.16. Risultati dell'analisi strutturale secondo differenti modelli di calcolo, bitume tal quale

Modello	Coefficienti (convertiti in unità S.I.)	Danno annuale	Vita utile [anni]
<b>Asphalt Institute (coeff. standard) [6]</b>	$f_1 = 0.414$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	1.900E-02	52.63
<b>Asphalt Institute (tenendo conto della volumetria) [6]</b>	$f_1 = 0.571$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	1.378E-02	72.57
<b>Modello di Finn [11]</b>	$f_1 = 0.301$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	2.614E-02	38.26
<b>UK TRRL [9]</b>	$f_1 = 1.66 \cdot 10^{-10}$ $f_2 = 4.32$ $f_3 = 0$	4.852E-03	206.10

I risultati evidenziano come il modello di Finn sia, tra i modelli considerati, quello che restituisce l'esito più severo in termini di vita utile della pavimentazione, attribuendole una vita utile di circa 38 anni, ben al di sopra delle esigenze dell'esperimento (20 anni). In ogni caso, considerata la variabilità dei risultati ottenuti e a favore di sicurezza, si stabilisce come vita utile teorica un valore di 20 anni per la pavimentazione con bitume tal quale.

È inoltre interessante evidenziare quanto la funzione di trasferimento adottata dall'Asphalt Institute sia dipendente dalle caratteristiche volumetriche della miscela bituminosa: la discrepanza tra la vita utile ricavata adottando i coefficienti standard forniti dall'Asphalt Institute (da adoperarsi nel caso in cui non si conoscano con certezza le percentuali di composizione volumetrica della miscela) e la vita utile ottenuta inserendo le effettive percentuali volumetriche nel calcolo dei coefficienti ammonta a circa 20 anni, un valore decisamente non trascurabile.

### 4.3.2. Analisi LCA

L'analisi strutturale ha permesso di verificare che la vita utile garantita dalla pavimentazione costruita utilizzando bitume tal quale sia superiore ai 20 anni richiesti. Questo consente di intraprendere l'analisi LCA (Life Cycle Assessment) adoperando il software SimaPro.

Come già menzionato nella prima parte di questa tesi, l'indicatore scelto per l'analisi di impatto ambientale è il Climate Change, misurato per mezzo dei chilogrammi equivalenti di anidride carbonica.

Fatte queste premesse, si esegue il calcolo del potenziale impatto ambientale su SimaPro. Il software dà la possibilità, volendo, di effettuare direttamente il calcolo del potenziale impatto ambientale di tutto il ciclo di vita a partire dall'ultima fase (l'assemblaggio "Pavimentazione"), ma per completezza verranno qui riportati i contributi di tutte le fasi al risultato finale. Tali fasi sono:

- **Costruzione:** in questa fase sono considerati tutti i processi che si trovano cronologicamente tra l'estrazione delle materie prime e la costruzione della strada, comprese tutte le attività di produzione dei materiali di costruzione elaborati, come l'emulsione bituminosa per le mani d'attacco e il conglomerato bituminoso. È compreso in questa fase tutto l'insieme delle attività di trasporto relative ai materiali grezzi o elaborati e ai mezzi di costruzione;
- **Manutenzione:** in questa fase sono considerati i processi che riguardano la produzione/estrazione dei materiali necessari per la ricostruzione periodica degli strati oggetto di manutenzione, oltre che i processi dei macchinari da costruzione impiegati per le operazioni in sito e per il trasporto dei materiali e dei mezzi;
- **End of life:** sono qui compresi i processi relativi alla rimozione finale (tramite fresatura) dei materiali usurati al termine della vita utile e al loro trasporto in impianti di accumulo o smaltimento.

La prima fase che viene analizzata è quella di **costruzione**, che restituisce i seguenti valori dell'indicatore Climate Change:

Tabella 4.17. Climate change derivante dalla costruzione degli strati in conglomerato bituminoso, bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Usura	Binder	Base
Produzione HMA	8.551	11.749	22.108
Mano d'attacco	0.346	0.346	0.346
Trasporto HMA	0.256	0.381	0.758
Costruzione	0.138	0.203	0.402
<b>TOTALE</b>	<b>9.291</b>	<b>12.679</b>	<b>23.614</b>

Tabella 4.18. Climate change derivante dalla costruzione dello strato di fondazione, bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Fondazione
Materiali	2.983
Trasporto materiali	3.832
Trasporto mezzi per strato di Fondazione	0.029
Utilizzo grader	1.534
Utilizzo rullo	0.028
<b>TOTALE</b>	<b>8.405</b>

Sommando i contributi degli strati in conglomerato bituminoso a quelli dello strato di fondazione, e aggiungendo una sola volta per tutti e tre gli strati in conglomerato bituminoso la quota parte legata al trasporto in sito dei mezzi per la costruzione dei suddetti strati, la fase di costruzione risulta avere il seguente impatto totale:

Tabella 4.19. Climate change della fase di costruzione, bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	<b>Impatto</b>
Strato di usura	9.291
Strato di binder	12.679
Strato di base	23.614
Trasporto mezzi per strati in CB	0.023
Strato di fondazione	8.405
<b>TOTALE</b>	<b>54.013</b>

La fase successiva che si approfondisce è la **manutenzione**. Per quanto riguarda il caso della pavimentazione con bitume tal quale, si stabilisce di effettuare la manutenzione ordinaria degli strati secondo le seguenti tempistiche:

- Strato di usura: manutenzione ogni 5 anni;
- Strato di collegamento: manutenzione ogni 10 anni;
- Strato di base: manutenzione ogni 20 anni.

In questo modo, considerando una vita utile di 20 anni, vengono effettuati tre cicli di manutenzione per lo strato di usura (dopo 5, 10 e 15 anni di vita) e un ciclo di manutenzione per lo strato di collegamento (dopo 10 anni di vita). Lo strato di base viene sostituito contestualmente alla ricostruzione totale della pavimentazione al termine della sua vita utile.

Ai fini della valutazione degli effetti della manutenzione sull'impatto ambientale, è evidente che non sia tanto la vita utile della pavimentazione a giocare un ruolo predominante (almeno non direttamente), ma piuttosto il numero di cicli di manutenzione, oltre che il volume relativo degli strati soggetti a manutenzione. Infatti, per ottenere l'impatto ambientale totale della manutenzione, è necessario moltiplicare l'impatto di un singolo ciclo di manutenzione per il numero di cicli previsti nel corso della vita utile. Lo svolgimento dei calcoli porta ai seguenti risultati:

Tabella 4.20. Climate change derivante dalla manutenzione degli strati in conglomerato bituminoso, bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Strato di usura	Strato di binder	Trasporto mezzi
Climate Change per singolo ciclo	9.356	12.775	0.045
Numero cicli	3	1	3
<b>SUBTOTALE</b>	<b>28.067</b>	<b>12.775</b>	<b>0.134</b>
<b>TOTALE</b>	<b>40.976</b>		

L'ultima fase di cui si tiene conto nello sviluppo dei calcoli è l'**End of Life**, che comprende la demolizione della pavimentazione al termine della vita utile e il trasporto dei materiali di risulta all'impianto di accantonamento, in vista del futuro riutilizzo. Le risultanze sono le seguenti:

Tabella 4.21. Climate change dell'End of Life, bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Componente	Impatto
Strato di usura	0.320
Strato di binder	0.475
Strato di base	0.947
Strato di fondazione	1.276
Trasporto in sito dei mezzi per la demolizione	0.022
<b>TOTALE</b>	<b>3.040</b>

Sommando i contributi delle varie fasi, si ottiene l'impatto ambientale **totale** del ciclo di vita della pavimentazione con bitume tal quale:

Tabella 4.22. Climate change totale della pavimentazione con bitume tal quale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Strato di usura	Strato di binder	Strato di base	Strato di fondazione	Trasporto mezzi	TOTALE
Costruzione	9.291	12.679	23.614	8.405	0.023	54.013
Manutenzione	28.067	12.775	0	0	0.134	40.976
End of Life	0.320	0.475	0.947	1.276	0.022	3.040
<b>TOTALE</b>	<b>37.678</b>	<b>25.829</b>	<b>24.561</b>	<b>9.681</b>	<b>0.179</b>	<b>98.028</b>

## 4.4. Bitume modificato con SBS radiale

### 4.4.1. Differenze rispetto al caso di riferimento

Il secondo caso che si va ad analizzare è quello di una pavimentazione identica al caso di riferimento sotto tutti gli aspetti, eccezion fatta per il bitume utilizzato per gli strati in conglomerato bituminoso: nel caso di riferimento, infatti, il bitume utilizzato era bitume tal quale; il caso che ci si accinge ora a esaminare invece riguarda una pavimentazione costruita con conglomerato bituminoso contenente bitume modificato con il polimero SBS (stirene-butadiene-stirene) radiale. Il polimero SBS radiale, come già visto nel corso del calcolo dei moduli elastici, aumenta notevolmente le prestazioni del conglomerato bituminoso, garantendo un netto aumento della vita utile della pavimentazione.

I dati relativi all'impatto ambientale della produzione dell'SBS sono ricavati dalla seconda edizione del Life Cycle Inventory del Bitume, catalogo pubblicato dall'associazione Eurobitume [18]. In tale volume sono infatti presenti tutte le voci di impatto ambientale riguardanti la produzione e il trasporto del bitume modificato con polimero SBS. I valori presenti sul catalogo di Eurobitume fanno riferimento a una percentuale in massa di polimero SBS nella miscela bituminosa massa pari al 3,5%, coerentemente con le analisi condotte da Portilla Moncayo nella sua ricerca [17] già ampiamente menzionata nei capitoli precedenti.

Per quanto riguarda l'implementazione su SimaPro, vengono create quindi due nuove elaborazioni: "SBS from Eurobitume 2.0", che contiene tutti i dati

sull'impatto ambientale relativi alla produzione e al trasporto del polimero SBS forniti dal catalogo di Eurobitume, e "Produzione Bitume modificato SBS". Quest'ultima è, di fatto, la fase in cui il bitume tal quale diventa bitume modificato tramite miscelazione col polimero SBS, e impiegando una quantità di energia elettrica pari a 72 MJ per tonnellata di bitume modificato, come riportato sul catalogo di Eurobitume.

Prodotti								
Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti	Quantità fisi	Unità di misur	Quantità fisici	Tipo rifiuto	Allocazione	Categoria		
Produzione Bitume Modificato SBS	1000	kg	Mass	non definito	100 %	Others		
Inserisci linea								
Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento	
Inserisci linea								
Input								
Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
Inserisci linea								
Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica		Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	
Bitumen adhesive compound, hot [RER] bitumen adhesive compound pr...	1000*(1-sbs) = 965		kg					
SBS from Eurobitume 2.0	1000*sbs = 35		kg					
Inserisci linea								
Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento	
Electricity, medium voltage (IT) market for electricity, medium voltage   ...	72	MJ	Non definito					
Inserisci linea								

Figura 4.3. Elaborazione "Produzione Bitume modificato SBS" su SimaPro

L'elaborazione appena menzionata va poi a rimpiazzare il bitume in tutti i processi e le fasi successive in cui è previsto il suo utilizzo, comprese le mani d'attacco.

#### 4.4.2. Analisi strutturale

Sono qui riportati i moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso con bitume modificato (per un approfondimento sui passaggi qui omessi si rimanda ai capitoli precedenti):

Tabella 4.23. Moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso, bitume modificato con SBS radiale [MPa]

<b>Mese</b>	<b>Usura</b>	<b>Binder</b>	<b>Base</b>
<b>Gennaio</b>	15416	20192	22426
<b>Febbraio</b>	13852	18500	20809
<b>Marzo</b>	12400	16888	19240
<b>Aprile</b>	9964	14082	16445
<b>Maggio</b>	7025	10495	12729
<b>Giugno</b>	4159	6706	8583
<b>Luglio</b>	2893	4897	6494
<b>Agosto</b>	2960	4995	6611
<b>Settembre</b>	4851	7654	9647
<b>Ottobre</b>	7386	10950	13210
<b>Novembre</b>	11068	15370	17739
<b>Dicembre</b>	14291	18980	21270

Come già visto in precedenza, i valori dei moduli elastici della pavimentazione con bitume modificato con SBS radiale risultano superiori ai rispettivi valori del caso di riferimento.

Inserendo tali valori come input dell'analisi strutturale su KenPave insieme a tutti gli altri parametri riportati in precedenza e adoperando le funzioni di trasferimento indicate, si ottengono i seguenti valori di vita utile:

Tabella 4.24. Risultati dell'analisi strutturale secondo differenti modelli di calcolo, bitume modificato con SBS radiale

Modello	Coefficienti (convertiti in unità S.I.)	Danno annuale	Vita utile [anni]
<b>Asphalt Institute (coeff. standard) [6]</b>	$f_1 = 0.414$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	1.282E-02	78.00
<b>Asphalt Institute (tenendo conto della volumetria) [6]</b>	$f_1 = 0.571$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	9.298E-03	107.55
<b>Modello di Finn [11]</b>	$f_1 = 0.301$ $f_2 = 3.291$ $f_3 = 0.854$	1.764E-02	56.69
<b>UK TRRL [9]</b>	$f_1 = 1.66 \cdot 10^{-10}$ $f_2 = 4.32$ $f_3 = 0$	1.729E-03	578.37

Anche in questo caso, così come nel caso di riferimento, il modello di Finn risulta essere il più severo dal punto di vista delle prestazioni previste per la pavimentazione. In ogni caso, quale che sia la funzione di trasferimento, la pavimentazione risulta essere molto longeva, con una vita utile di almeno 56 anni. Questa longevità della pavimentazione consente, come si vedrà in dettaglio più avanti, di ipotizzare un allungamento della vita utile nominale della pavimentazione, per mezzo dell'estensione degli intervalli temporali di manutenzione.

#### 4.4.3. Analisi LCA

L'analisi strutturale ha permesso di verificare che la vita utile garantita dalla pavimentazione costruita utilizzando bitume tal quale sia superiore ai 20 anni richiesti. Questo consente di intraprendere l'analisi LCA (Life Cycle Assessment) adoperando il software SimaPro.

Anche in questo caso, l'indicatore scelto per l'analisi di impatto ambientale è il Climate Change, misurato per mezzo dei chilogrammi equivalenti di anidride carbonica.

Si esegue quindi il calcolo dell'impatto ambientale su SimaPro. Il software dà la possibilità, volendo, di effettuare direttamente il calcolo dell'impatto ambientale di tutto il ciclo di vita a partire dall'ultima fase riassuntiva (l'assemblaggio "Pavimentazione") ma per completezza verranno qui riportati i contributi di tutte le fasi al risultato finale.

La prima fase che viene analizzata è quella di **costruzione**, che restituisce i seguenti valori dell'indicatore Climate Change:

Tabella 4.25. Climate change derivante dalla costruzione degli strati in conglomerato bituminoso, bitume modificato con SBS radiale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Usura	Binder	Base
Produzione HMA	9.250	12.668	23.780
Mano d'attacco	0.401	0.401	0.401
Trasporto HMA	0.256	0.381	0.758
Costruzione	0.138	0.203	0.402
<b>TOTALE</b>	<b>10.045</b>	<b>13.653</b>	<b>25.341</b>

Tabella 4.26. Climate change derivante dalla costruzione dello strato di fondazione, bitume modificato con SBS radiale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Fondazione
Materiali	2.983
Trasporto materiali	3.832
Trasporto mezzi per strato di Fondazione	0.029
Utilizzo grader	1.534
Utilizzo rullo	0.028
<b>TOTALE</b>	<b>8.405</b>

Si noti che, rispetto al caso di riferimento, l'impatto ambientale dei processi legati agli strati in conglomerato bituminoso aumenta, mentre i processi legati al trasporto e all'operatività dei mezzi, oltre che tutto ciò che riguarda lo strato di fondazione, non subiscono alcuna variazione.

Sommando i contributi degli strati in conglomerato bituminoso a quelli dello strato di fondazione, e aggiungendo una sola volta per tutti e tre gli strati in conglomerato bituminoso la quota parte legata al trasporto in sito dei mezzi per la costruzione dei suddetti strati, la fase di costruzione risulta avere il seguente impatto totale:

Tabella 4.27. Climate change della fase di costruzione, bitume modificato con SBS radiale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Impatto
Strato di usura	10.045
Strato di binder	13.653
Strato di base	25.341
Trasporto mezzi per strati in CB	0.023
Strato di fondazione	8.405
<b>TOTALE</b>	<b>57.468</b>

La fase successiva che si approfondisce è la **manutenzione**. Questa fase è quella nella quale si può effettivamente fare la differenza rispetto al caso di riferimento: poiché la vita utile della pavimentazione con bitume modificato è molto maggiore di quella della pavimentazione con bitume tal quale, si può pensare realisticamente di allungare la vita utile di riferimento, e in questo modo distribuire l'impatto ambientale totale su una durata maggiore, ammortizzandone l'effetto.

Pur essendo assodato che il polimero SBS radiale contribuisca ad aumentare sensibilmente la vita utile, non è raccomandabile esasperare gli intervalli tra i cicli di manutenzione dei singoli strati. La vita utile viene calcolata in base alla fessurazione a fatica, e da questo punto di vista grazie all'SBS si può certamente allungare l'intervallo tra i cicli manutentivi. La buona operatività dello strato di usura, tuttavia, non dipende solo dall'assenza di fessure, ma anche da altri fattori, come ad esempio un buon

equilibrio tra le texture che conferiscono la corretta rugosità alla superficie stradale, garantendo una sufficiente aderenza ai veicoli che transitano. Per questo motivo, è certamente possibile allungare l'intervallo temporale tra due cicli di manutenzione, ma bisogna procedere con cautela. Per questo motivo, si valutano due opzioni:

- Vita utile di 26 anni, con manutenzione ogni 6 anni e mezzo per lo strato di usura e ogni 13 anni per lo strato di collegamento, per un totale di 3 cicli di manutenzione per l'usura e 1 ciclo per il binder.
- Vita utile di 30 anni, con manutenzione ogni 5 anni per lo strato di usura e ogni 10 anni per lo strato di collegamento, per un totale di 5 cicli di manutenzione per lo strato di usura e 2 cicli per lo strato di collegamento.

In questo modo si mantiene l'intervallo massimo tra due cicli di manutenzione dello strato di usura al di sotto dei sette anni, non allontanandosi troppo dai cinque anni normalmente raccomandati.

Vengono ora riportati i risultati relativi a queste due opzioni:

Tabella 4.28. Climate change derivante dalla manutenzione degli strati in conglomerato bituminoso, bitume modificato con SBS radiale e vita utile di 26 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

<b>Vita utile = 26 anni</b>	<b>Strato di usura</b>	<b>Strato di binder</b>	<b>Trasporto mezzi</b>
Climate Change per singolo ciclo	10.110	13.750	0.045
Numero cicli	3	1	3
<b>SUBTOTALE</b>	<b>30.330</b>	<b>13.750</b>	<b>0.134</b>
<b>TOTALE</b>	<b>44.214</b>		

Tabella 4.29. Climate change derivante dalla manutenzione degli strati in conglomerato bituminoso, bitume modificato con SBS radiale e vita utile di 30 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Vita utile = 30 anni	Strato di usura	Strato di binder	Trasporto mezzi
Climate Change per singolo ciclo	10.110	13.750	0.045
Numero cicli	5	2	5
<b>SUBTOTALE</b>	<b>50.550</b>	<b>27.500</b>	<b>0.224</b>
<b>TOTALE</b>	<b>78.274</b>		

Come prevedibile, parlando in termini assoluti allungare la vita utile fino a 30 anni comporta un impatto ambientale superiore rispetto all'allungamento fino a 26 anni, anche se ciò garantisce con più sicurezza un mantenimento dell'aderenza per lo strato di usura.

L'ultima fase di cui si tiene conto nello sviluppo dei calcoli è l'**End of Life**, che comprende la demolizione della pavimentazione al termine della vita utile e il trasporto dei materiali di risulta all'impianto di accantonamento, in vista del futuro riutilizzo. Le risultanze sono le seguenti:

Tabella 4.30. Climate change dell'End of Life, bitume modificato con SBS radiale [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Componente	Impatto
Strato di usura	0.320
Strato di binder	0.475
Strato di base	0.947
Strato di fondazione	1.276
Trasporto in sito dei mezzi per la demolizione	0.022
<b>TOTALE</b>	<b>3.040</b>

In questo caso, poiché non è coinvolto direttamente il tipo di bitume impiegato, non ci sono differenze di Climate Change rispetto al caso di riferimento.

Sommando i contributi delle varie fasi, si ottiene l’impatto ambientale **totale** del ciclo di vita della pavimentazione con bitume modificato con polimero SBS radiale per entrambe le ipotesi prese in considerazione:

Tabella 4.31. Climate change totale della pavimentazione con bitume modificato con SBS radiale, vita utile di 26 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Vita utile = 26 anni	Strato di usura	Strato di binder	Strato di base	Strato di fondazione	Trasporto mezzi	TOTALE
Costruzione	10.045	13.653	25.341	8.405	0.023	57.468
Manutenzione	30.330	13.750	0	0	0.134	44.214
End of Life	0.320	0.475	0.947	1.276	0.022	3.040
<b>TOTALE</b>	40.695	26.878	26.288	9.681	0.179	<b>104.721</b>

Tabella 4.32. Climate change totale della pavimentazione con bitume modificato con SBS radiale, vita utile di 30 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Vita utile = 30 anni	Strato di usura	Strato di binder	Strato di base	Strato di fondazione	Trasporto mezzi	TOTALE
Costruzione	10.045	13.653	25.341	8.405	0.023	57.468
Manutenzione	50.550	27.500	0	0	0.223	78.273
End of Life	0.320	0.475	0.947	1.276	0.022	3.040
<b>TOTALE</b>	60.915	40.628	26.288	9.681	0.268	<b>138.781</b>

Come si può facilmente evincere dalle tabelle, e come era intuitivamente prevedibile, l’impatto ambientale della pavimentazione soggetta a 5 cicli di manutenzione è decisamente superiore all’impatto della pavimentazione soggetta a 3 cicli.

Una volta ricavati gli impatti in termini assoluti, risulta però sensato valutare l’impatto ambientale in proporzione alla vita utile: una vita utile più lunga consente, infatti, di ammortizzare gli impatti su un periodo più lungo. Ragionando in tal senso, si ottiene quanto segue:

Tabella 4.33. Climate change totale della pavimentazione con bitume modificato con SBS radiale: raffronto dell'impatto annuo [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Opzione 26 anni	Opzione 30 anni
Climate Change totale	104.721	138.781
Vita utile	26 anni	30 anni
<b>Climate Change annuo</b>	<b>4.028</b>	<b>4.626</b>

Si può quindi concludere che allungare la vita utile a 26 anni con tre cicli di manutenzione sia più conveniente che allungarla fino a 30 anni con cinque cicli di manutenzione, ammesso che lo strato di usura garantisca prestazioni sufficienti a garantire la sicurezza stradale per sei anni e mezzo e che i cicli di manutenzione vengano calendarizzati in maniera ragionevole, in modo da evitare che i lavori di manutenzione si svolgano in condizioni sfavorevoli, vista l'alternanza stagionale legata allo scarto di sei mesi tra un ciclo e l'altro.

## 4.5. Conglomerato con polimero di riciclo

### 4.5.1. Peculiarità del polimero di riciclo

Il terzo e ultimo caso esaminato è concettualmente diverso dal secondo, in quanto anziché andare a modificare il bitume con un polimero vergine (SBS) si va ad aggiungere direttamente in fase di miscelazione del conglomerato bituminoso, con la tecnologia Dry Modified Asphalt, un compound polimerico di riciclo (formato al 95% da materiale riciclato e al 5% da materiale vergine)



Figura 4.4. Compound polimerico di riciclo

Stando alla descrizione del prodotto fornita dall'Istituto per la Promozione delle Plastiche da Riciclo, il polimero oggetto di analisi garantisce un aumento notevole delle prestazioni delle pavimentazioni costruite con esso, specialmente in termini di resistenza alla trazione, alla fatica, all'ormaiamento e alle escursioni termiche.

È importante evidenziare che, essendo il materiale in questione di sviluppo molto recente, e non disponendo di campioni di conglomerato bituminoso prodotti a partire da esso, non è stato possibile effettuare l'analisi strutturale. In mancanza di essa, si è assunto che il polimero di riciclo fornisca alla pavimentazione un incremento della vita utile simile a quello fornito dall'impiego del polimero radiale SBS, consentendo quindi un incremento della vita utile di circa 18 anni rispetto al caso di riferimento secondo il modello di Finn.

#### 4.5.2. Implementazione del polimero di riciclo su SimaPro

Una volta esplicitate le principali caratteristiche del compound polimerico di riciclo, si pone il problema della sua implementazione su SimaPro. Nel caso del bitume modificato con SBS radiale, tale problema è stato risolto tramite la consultazione della seconda edizione del catalogo di Eurobitume, metodo non fruibile per il polimero di riciclo, vista la sua recente comparsa nel mondo dei conglomerati.

Il problema viene risolto grazie alla consultazione dell'EPD (Environmental Product Declaration) del compound polimerico di riciclo: in tale documento

sono presenti tutti gli indicatori di impatto ambientale legati alla produzione e al trasporto del polimero in questione.

La struttura intrinseca di SimaPro causa però la comparsa di un ulteriore problema: SimaPro consente di creare processi ed elaborazioni a proprio piacimento, ma non consente di associare direttamente a tali processi ed elaborazioni gli indicatori di impatto ambientale, quali ad esempio il Climate Change, l'eutrofizzazione o l'ecotossicità. SimaPro, infatti, ha il compito di convertire le sostanze emesse dai processi in indicatori di impatto ambientale attraverso dei coefficienti di conversione, e non consente di utilizzare tali indicatori come input.

Per questo motivo, è stato necessario trovare un modo per convertire i valori degli indicatori di impatto ambientale in sostanze equivalenti da utilizzare in loro vece, per fare sì che una volta inserite su SimaPro dessero come output esattamente i valori presenti sull'EPD.

Per quanto concerne alcuni indicatori, è stato possibile trovare, attraverso le tabelle di conversione del modello di calcolo adottato, una corrispondenza biunivoca tra indicatore di impatto ambientale e sostanze presenti sul database di SimaPro come possibili tipologie di emissioni: ad esempio, l'indicatore "Radiazioni ionizzanti" è direttamente proporzionale alla quantità di Uranio-235 emessa, con interposto tra loro un semplice coefficiente di proporzionalità rintracciabile nelle suddette tabelle di conversione.

Molti altri indicatori, tuttavia, si sono rivelati essere strettamente interconnessi tra loro, in quanto non è stato possibile trovare per essi sostanze che permettessero di impattare esclusivamente su di loro senza andare a modificarne altri. In particolare, i dieci indicatori presenti sull'EPD che si sono rivelati tra loro interdipendenti sono i seguenti:

- Potenziale di acidificazione (AP);
- Climate Change legato ai combustibili fossili (GWP-fossil);
- Potenziale di eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il mare (EP-marine);
- Potenziale di eutrofizzazione, eccedenza accumulata (EP-terrestrial);
- Particolato (PM);
- Tossicità per l'uomo – agenti cancerogeni (HTP-c);
- Tossicità per l'uomo – agenti non cancerogeni (HTP-nc);
- Potenziale di esaurimento dello strato di ozono (ODP);
- Ecotossicità – acqua dolce (ETP-fw);
- Potenziale di formazione di ozono troposferico (POCP).

Come è noto dall'algebra lineare, per ottenere 10 valori noti che abbiano correlazioni lineari con dei valori incogniti è necessario impostare un sistema lineare con altrettante equazioni. In tal senso, sono state scelte 10 sostanze che, stando alle tabelle di conversione del modello di calcolo, hanno una diretta proporzionalità con molti degli indicatori listati in precedenza, e che fungono da incognite del sistema lineare:

- Azoto totale;
- Diossido di azoto;
- Anidride solforosa;
- Anidride carbonica fossile;
- Triclorofluorometano, CFC-11;
- Particolato (PM10);
- Aflatossina;
- Diclorvos;
- Diidrossido di magnesio;
- NMVOC (composti organici volatili non metanici).

Trattando le dieci sostanze qui elencate come incognite e grazie ai coefficienti di proporzionalità delle tabelle di conversione, è stato possibile creare un sistema lineare di 10 equazioni con 10 incognite e avente come termini noti i 10 indicatori di impatto ambientale elencati in precedenza. La risoluzione su MATLAB di tale sistema lineare ha consentito di ottenere dei valori che, insieme alle altre sostanze ottenute dalla corrispondenza biunivoca con altri indicatori di impatto ambientale presenti nell'EPD, ha reso possibile la creazione su SimaPro di un processo chiamato "Compound Polimerico di riciclo produzione", che se sottoposto a computazione da parte del software restituisce esattamente i valori degli indicatori di impatto ambientale presenti sull'EPD.

Input							
Input noti da natura (risorse)	Sr	Quantità fisica	Unità	D	SI	IV	Commento
Antimony	(.)	2,17E-6	kg	N			ADP-minerals&metals
Energy, from oil	(.)	7,9E0	MJ	N			ADP-fossil
Water, lake, IT	(.)	$(1,62e-1)/44,9 = 0,0036080178$	m3				WDP (fattore di conversione 44,9)
Occupation, forest, extensive, KZ	(.)	$8,45/1,0362 = 8,1547964$	m...				SQP (fattore di conversione 1,0362)
Inserisci linea							
Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)							Quantità fisica
Inserisci linea							
Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)							Quantità fisi
Inserisci linea							Unità di misur. Distribuzione SD^2 o 2*SD Min Max Commento

Figura 4.5. Processo SimaPro "Compound polimerico di riciclo produzione", 1/3

Output									
Emissioni nell'aria		Sottoc	Quantità fisica	Unit	D	SI	M	M	Commento
Carbon dioxide, fossil	(uns...	3,899950000E-1	kg	N					GWP-fossil
Carbon dioxide, biogenic	(uns...	-6,47E-2	kg	N					GWP-biogenic
Carbon dioxide, land transformation	(uns...	4,67E-4	kg	N					GWP-luluc
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	(uns...	4,350000000E-5	kg	N					ODP
Sulfur dioxide	(uns...	1,895218692E-3	kg	N					da sistema lineare
Nitrogen dioxide, IT	(uns...	3,804054054E-3	kg	N					da sistema lineare
NMVOC, non-methane volatile organic com...	(uns...	-2,277756290E-3	kg	N					da sistema lineare
Particulates, < 10 um	(uns...	1,551482655E-5	kg	N					da sistema lineare
Uranium-235	(uns...	5,4E-2	kBq	N					IRP
Magnesium dihydroxide	(uns...	5,243002745E1	kg	N					da sistema lineare
Dichlorvos	(uns...	-1,804641558E-4	kg	N					da sistema lineare
Aflatoxin	(uns...	4,625139632E-8	kg	N					da sistema lineare
Inserisci linea									
Emissioni in acqua		Sottocomp.	Quantità fisica	Unit	D	SI	M	M	Commento
Phosphorus, total	(unspecifi...	1,23E-4	kg	N					EP-freshwater
Nitrogen, total	(unspecifi...	-8,927770270E-4	kg	N					da sistema lineare
Inserisci linea									
Emissioni nel terreno		S	Quantità fisica	Uni	D	SI	M	M	Commento
Inserisci linea									

Figura 4.6. Processo SimaPro "Compound polimerico di riciclo produzione", 2/3

Flussi dei rifiuti finali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2^SD	Min	Max	Commento	
Hazardous waste disposed	(unspecified)	1,36E-5	kg	Non definito					
Non-hazardous waste disposed	(unspecified)	1,01E-5	kg	Non definito					
Radioactive waste disposed - intermediate and lo...	(unspecified)	2,3e-5/2 = 1,15E-5	kg						
Radioactive waste disposed - high-level	(unspecified)	2,3e-5/2 = 1,15E-5	kg						
Inserisci linea									
Emissioni non materiali	Sottocompartimento	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2^SD	Min	Max	Commento	
Inserisci linea									
Temi sociali	Sottocompartimento	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2^SD	Min	Max	Commento	
Inserisci linea									
Temi economici	Sottocompartimento	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2^SD	Min	Max	Commento	
Inserisci linea									
Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento	Sottocompartimento	Quantità fisi	Unità di misur	Distribuzione	SD^2 o 2^SD	Min	Max	Commento	
Inserisci linea									

Figura 4.7. Processo SimaPro "Compound polimerico di riciclo produzione", 3/3

Una volta creato il processo legato alla produzione del polimero di riciclo, tale processo va integrato correttamente nella produzione del conglomerato bituminoso. In tal senso, l'EPD indica una concentrazione di polimero pari allo 0,3% in massa della miscela. I processi esistenti impattati dall'aggiunta del polimero sono "HMA (usura/binder/base)" e "Manutenzione (usura/binder/base)": per tali processi, oltre all'aggiunta del processo "Compound polimerico di riciclo produzione" è necessario avere cura di ridurre le quantità degli altri materiali che vanno a formare la miscela (bitume e aggregati) di modo che la loro somma vada a costituire il 99,7%

della massa totale della miscela, lasciando (come detto poc'anzi) lo 0,3% di massa al polimero di riciclo.

Si precisa che il bitume utilizzato in questo caso è il bitume tal quale (il medesimo del caso di riferimento) in quanto l'utilizzo del polimero SBS sarebbe ridondante, avendo quest'ultimo e il polimero di riciclo funzioni molto simili, e l'impiego di entrambi i polimeri allo stesso tempo andrebbe ad aumentare inutilmente l'impiatto ambientale dei processi.

### 4.5.3. Analisi LCA

Come già accennato in precedenza, non è stato possibile condurre l'analisi strutturale, ma si può assumere con ragionevole certezza che una pavimentazione costruita impiegando conglomerato bituminoso con polimero di riciclo garantisca una vita utile paragonabile a quella di una pavimentazione costruita con bitume modificato con SBS radiale.

Anche in questo caso, l'indicatore scelto per l'analisi di impatto ambientale è il Climate Change, misurato per mezzo dei chilogrammi equivalenti di anidride carbonica.

Si esegue quindi il calcolo dell'impatto ambientale su SimaPro. Il software dà la possibilità, volendo, di effettuare direttamente il calcolo dell'impatto ambientale di tutto il ciclo di vita a partire dall'ultima fase riassuntiva (l'assemblaggio "Pavimentazione") ma per completezza verranno qui riportati i contributi di tutte le fasi al risultato finale.

La prima fase che viene analizzata è quella di **costruzione**, che restituisce i seguenti valori dell'indicatore Climate Change:

Tabella 4.34. Climate change derivante dalla costruzione degli strati in conglomerato bituminoso, conglomerato con polimero di riciclo [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Usura	Binder	Base
Produzione HMA	8.686	11.954	22.523
Mano d'attacco	0.346	0.346	0.346
Trasporto HMA	0.256	0.381	0.758
Costruzione	0.138	0.203	0.402
<b>TOTALE</b>	<b>9.426</b>	<b>12.884</b>	<b>24.029</b>

Tabella 4.35. Climate change derivante dalla costruzione dello strato di fondazione, conglomerato con polimero di riciclo [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	Fondazione
Materiali	2.983
Trasporto materiali	3.832
Trasporto mezzi per strato di Fondazione	0.029
Utilizzo grader	1.534
Utilizzo rullo	0.028
<b>TOTALE</b>	<b>8.405</b>

Sommando i contributi degli strati in conglomerato bituminoso a quelli dello strato di fondazione, e aggiungendo una sola volta per tutti e tre gli strati in conglomerato bituminoso la quota parte legata al trasporto in sito dei mezzi per la costruzione dei suddetti strati, la fase di costruzione risulta avere il seguente impatto totale:

Tabella 4.36. Climate change della fase di costruzione, conglomerato con polimero di riciclo [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

	<b>Impatto</b>
Strato di usura	9.426
Strato di binder	12.884
Strato di base	24.029
Trasporto mezzi per strati in CB	0.023
Strato di fondazione	8.405
<b>TOTALE</b>	<b>54.768</b>

La fase successiva che si approfondisce è la **manutenzione**. Il polimero di riciclo presenta caratteristiche funzionali simili al polimero SBS radiale; quindi, si può assumere con ragionevole sicurezza che anche la vita utile abbia un valore simile.

Per questo motivo, e avendo valutato che nel caso del bitume modificato con SBS radiale la scelta di un prolungamento della vita utile a 26 anni mantenendo i 3 cicli di manutenzione sia preferibile all'allungamento fino a 30 anni portando il numero di cicli di manutenzione a 5, si ottengono i seguenti valori di Climate Change:

Tabella 4.37. Climate change derivante dalla manutenzione degli strati in conglomerato bituminoso, conglomerato con polimero di riciclo e vita utile di 26 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

<b>Vita utile = 26 anni</b>	Strato di usura	Strato di binder	Trasporto mezzi
Climate Change per singolo ciclo	9.489	12.979	0.045
Numero cicli	3	1	3
<b>SUBTOTALE</b>	28.468	12.979	0.134
<b>TOTALE</b>	<b>41.581</b>		

L'ultima fase di cui si tiene conto nello sviluppo dei calcoli è l'**End of Life**, che comprende la demolizione della pavimentazione al termine della vita utile e il trasporto dei materiali di risulta all'impianto di accantonamento, in vista del futuro riutilizzo. Le risultanze sono le seguenti:

Tabella 4.38. Climate change dell'End of Life, conglomerato con polimero di riciclo [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Componente	Impatto
Strato di usura	0.320
Strato di binder	0.475
Strato di base	0.947
Strato di fondazione	1.276
Trasporto in sito dei mezzi per la demolizione	0.022
<b>TOTALE</b>	<b>3.040</b>

Sommando i contributi delle varie fasi, si ottiene l'impatto ambientale **totale** del ciclo di vita della pavimentazione con polimero di riciclo:

Tabella 4.39. Climate change totale della pavimentazione con conglomerato con polimero di riciclo, vita utile di 26 anni [kg CO<sub>2</sub> eq. per mq di pavimentazione]

Vita utile = 26 anni	Strato di usura	Strato di binder	Strato di base	Strato di fondazione	Trasporto mezzi	TOTALE
Costruzione	9.426	12.884	24.029	8.405	0.023	54.768
Manutenzione	28.468	12.979	0	0	0.134	41.581
End of Life	0.320	0.475	0.947	1.276	0.022	3.040
<b>TOTALE</b>	<b>38.204</b>	<b>26.338</b>	<b>24.976</b>	<b>9.681</b>	<b>0.179</b>	<b>99.388</b>

# CAPITOLO 5: CONFRONTO DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI FINALI

## 5.1. Raffronto numerico tra i tre casi

Per confrontare al meglio i tre casi esaminati nel capitolo precedente, risulta conveniente accostare i risultati dei tre casi presi in considerazione, sia suddivisi per fase (costruzione, manutenzione, end of life) sia complessivamente:

Tabella 5.1. Confronto tra i tre casi, fase di costruzione

Climate Change per Costruzione [kg CO <sub>2</sub> eq.] (per m <sup>2</sup> di pavimentazione)				
		Bitume tal quale, 20 anni	Bitume con SBS, 26 anni	Compound di riciclo, 26 anni
<b>Usura</b>	Produzione HMA	8.551	9.250	8.686
	Mano d'attacco	0.346	0.401	0.346
	Trasporto HMA	0.256	0.256	0.256
	Costruzione	0.138	0.138	0.138
	<b>TOTALE</b>	<b>9.291</b>	<b>10.045</b>	<b>9.426</b>
<b>Binder</b>	Produzione HMA	11.749	12.668	11.954
	Mano d'attacco	0.346	0.401	0.346
	Trasporto HMA	0.381	0.381	0.381
	Costruzione	0.203	0.203	0.203
	<b>TOTALE</b>	<b>12.679</b>	<b>13.653</b>	<b>12.884</b>
<b>Base</b>	Produzione HMA	22.108	23.780	22.523
	Mano d'attacco	0.346	0.401	0.346
	Trasporto HMA	0.758	0.758	0.758
	Costruzione	0.402	0.402	0.402
	<b>TOTALE</b>	<b>23.614</b>	<b>25.341</b>	<b>24.029</b>
<b>Fondazione</b>	Materiali	2.983	2.983	2.983
	Trasp. materiali	3.832	3.832	3.832
	Trasporto mezzi	0.029	0.029	0.029
	Utilizzo grader	1.534	1.534	1.534
	Utilizzo rullo	0.028	0.028	0.028
	<b>TOTALE</b>	<b>8.405</b>	<b>8.405</b>	<b>8.405</b>
<b>Trasporto mezzi per strati in CB</b>		<b>0.023</b>	<b>0.023</b>	<b>0.023</b>
<b>TOTALE</b>		<b>54.013</b>	<b>57.468</b>	<b>54.768</b>

È evidente, osservando questi risultati, che ci siano delle componenti che restano invariate tra un caso e l'altro: nello specifico, si tratta di tutto ciò che riguarda lo strato di fondazione, del trasporto dei mezzi in sito per gli strati in conglomerato bituminoso, delle operazioni di trasporto dei materiali e dell'operatività dei mezzi per la costruzione. Al contrario, si notano sostanziali differenze in tutte le fasi che hanno a che fare con la produzione di conglomerato bituminoso.

Tabella 5.2. Confronto tra i tre casi, fase di manutenzione

<b>Climate Change per Manutenzione [kg CO<sub>2</sub> eq.] (per m<sup>2</sup> di pavimentazione)</b>			
	<b>Bitume tal quale, 20 anni</b>	<b>Bitume con SBS, 26 anni</b>	<b>Compound di riciclo, 26 anni</b>
<b>Usura</b>	28.067	30.330	28.468
<b>Binder</b>	12.775	13.750	12.979
<b>Base</b>	0	0	0
<b>Fondazione</b>	0	0	0
<b>Trasporto mezzi</b>	0.134	0.134	0.134
<b>TOTALE</b>	<b>40.976</b>	<b>44.214</b>	<b>41.581</b>

Anche per quanto riguarda la manutenzione, è evidente che il trasporto dei mezzi sia invariato nei tre casi, mentre la produzione del conglomerato bituminoso necessario per il rifacimento degli strati usurati porta a sostanziali differenze tra i tre casi ogni qualvolta entri in gioco il conglomerato bituminoso.

Tabella 5.3. Confronto tra i tre casi, End of Life

<b>Climate Change per End of Life [kg CO<sub>2</sub> eq.] (per m<sup>2</sup> di pavimentazione)</b>			
	<b>Bitume tal quale, 20 anni</b>	<b>Bitume con SBS, 26 anni</b>	<b>Compound di riciclo, 26 anni</b>
<b>Usura</b>	0.320	0.320	0.320
<b>Binder</b>	0.475	0.475	0.475
<b>Base</b>	0.947	0.947	0.947
<b>Fondazione</b>	1.276	1.276	1.276
<b>Trasporto mezzi</b>	0.022	0.022	0.022
<b>TOTALE</b>	<b>3.040</b>	<b>3.040</b>	<b>3.040</b>

L'End of Life dei tre casi è identica, in quanto identica è la massa di materiale da fresare e trasportare al termine della vita utile.

Tabella 5.4. Confronto tra i tre casi, totale

<b>Climate Change TOTALE [kg CO<sub>2</sub> eq.] (per m<sup>2</sup> di pavimentazione)</b>			
	<b>Bitume tal quale, 20 anni</b>	<b>Bitume con SBS, 26 anni</b>	<b>Compound di riciclo, 26 anni</b>
<b>Costruzione</b>	54.013	57.468	54.768
<b>Manutenzione</b>	40.976	44.214	41.581
<b>End of Life</b>	3.040	3.040	3.040
<b>TOTALE</b>	<b>98.0</b>	<b>104.7</b>	<b>99.4</b>

Tabella 5.5. Confronto tra i tre casi, totale annuo

<b>Climate Change totale ANNUO [kg CO<sub>2</sub> eq.] (per m<sup>2</sup> di pavimentazione)</b>			
	<b>Bitume tal quale, 20 anni</b>	<b>Bitume con SBS, 26 anni</b>	<b>Compound di riciclo, 26 anni</b>
<b>Totale</b>	98.0	104.7	99.4
<b>Anni</b>	20	26	26
<b>TOTALE ANNUO</b>	<b>4.90</b>	<b>4.03</b>	<b>3.82</b>

## 5.2. Considerazioni finali

Le tabelle soprastanti e tutti i passaggi svolti per arrivare ai risultati ivi riportati mostrano una realtà dei fatti ancora piuttosto complessa sotto diversi punti di vista.

Innanzitutto, è evidente che aggiungere dei polimeri, vergini o riciclati che siano, nel sistema comporta un aumento piuttosto marcato dell'impatto ambientale. L'unico modo per compensare tale aumento è sfruttare l'incremento nelle prestazioni dei conglomerati previsto grazie all'impiego dei polimeri per aumentare la vita utile della pavimentazione: in questo modo, l'impatto ambientale viene distribuito su più anni, rendendo anche i due casi in questione competitivi da un punto di vista ambientale oltre che prestazionale.

Fatta questa premessa, dei tre casi analizzati, quello che risulta meno impattante dal punto di vista del riscaldamento globale è il conglomerato bituminoso con addizione del compound polimerico di riciclo. Il motivo più plausibile per cui l'impiego di questo polimero risulta essere così vantaggioso rispetto al bitume modificato con SBS radiale è l'impiego di materie prime al 95% riciclate in fase di produzione: una differenza assolutamente non di poco conto, considerando che il polimero SBS radiale è ricavato esclusivamente da materie prime vergini.

Ciò detto, è evidente che la mancanza di analisi strutturali sui conglomerati bituminosi con addizione di polimero di riciclo costituisca una grossa incognita sull'effettiva possibilità di utilizzo di questa soluzione. Per questo motivo, l'impiego del bitume modificato con SBS radiale, anche se più impattante da un punto di vista ambientale, costituisce una valida alternativa, in quanto fondato su un buon numero di prove sperimentali e, più in generale, su un periodo ben più lungo di attività di ricerca al riguardo, come dimostrato anche dalla presenza di tale polimero nei cataloghi professionali da almeno 15 anni.

È necessario però prestare attenzione a un nodo cruciale: nel corso di questo elaborato si è assunto che lo strato di usura sia in grado di garantire una buona resa prestazionale dal punto di vista strutturale e funzionale (non ultima, l'aderenza degli pneumatici) nonostante un incremento del 30% dell'intervallo di sostituzione, ma distanziare in questa maniera i cicli di manutenzione costituisce un fattore di rischio da non trascurare. Lo stesso discorso vale anche, seppur in misura minore, per lo strato di collegamento: quest'ultimo, pur non dovendo garantire l'aderenza dei veicoli, potrebbe

comunque risentire da un punto di vista strutturale di un allungamento eccessivo della sua vita utile prima della sostituzione.

Per questi motivi, si raccomanda l'impiego del conglomerato con addizione del polimero di riciclo solo se si riesce ad avere la certezza che sia effettivamente possibile aumentare l'intervallo temporale tra un ciclo di manutenzione e l'altro senza inficiare le prestazioni della pavimentazione. In caso contrario, la scelta ricade sul bitume modificato con polimero SBS, ammesso che quest'ultimo sia in grado a sua volta di garantire prestazioni sufficienti per il tempo necessario: tale scenario è più probabile che per il conglomerato con compound polimerico di riciclo grazie alle risultanze dell'analisi strutturale (non effettuata sul conglomerato con polimero di riciclo), ma comunque non certo. Ove anche questo non fosse possibile, sarebbe necessario accontentarsi di una vita utile di 20 anni, e a quel punto il bitume tal quale e il conglomerato con polimero di riciclo sarebbero quasi equivalenti in termini di impatto ambientale.

# Bibliografia

- [1] D. Dalmazzo, M. Bassani e L. Tsantilis, *Lezioni del Corso di Infrastrutture Viarie*, Politecnico di Torino, 2021.
- [2] M. W. Witczak, «Design of Full-Depth Asphalt Airfield Pavements,» The Asphalt Institute, College Park, MD, 1972.
- [3] L. Franken e A. Vanelstraete, «Complex modulus of bituminous mixes: relation between binder and mix properties,» in *Proceedings of the 6th Eurobitume Congress*, Stockholm, Sweden, 1996.
- [4] D. Christensen e D. Anderson, «Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalts,» *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, vol. 61, pp. 67-116, 1992.
- [5] A. I. M. Claessen, J. M. Edwards, P. Sommer e P. Ugé, «Asphalt pavement design: the Shell method,» in *Proceedings of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1*, Ann Arbor, 1977.
- [6] J. F. Shook, F. N. Finn, M. W. Witczak e C. L. Monismith, «Thickness design of asphalt pavements – the Asphalt Institute method,» in *Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1*, Delft, 1982.
- [7] Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Sydney, Australia: Austroads, 2017/2024.
- [8] LCPC-SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée: guide technique, Paris: Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1994.
- [9] W. D. Powell, J. F. Potter, H. C. Mayhew e M. E. Nunn, «The structural design of bituminous roads (TRRL Laboratory Report 1132),» Transport and Road Research Laboratory (TRRL) – Department of Transport, Crowthorne, Berkshire (UK), 1984.

- [10] J. Verstraeten, V. Veverka e L. Francken, «Rational and practical designs of asphalt pavements to avoid cracking and rutting.,» in *Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1*, Delft, 1982.
- [11] F. Finn, C. L. Saraf, R. Kulkarni, K. Nair, W. Smith e A. Abdullah, «Development of Pavement Structural Subsystems (NCHRP Report 291),» Washington, D.C., Dicembre 1986.
- [12] L. Tsantilis e D. Dalmazzo, *Lezioni del Corso di Pavement and Track Engineering*, Politecnico di Torino, 2023.
- [13] Capitolato Speciale d'Appalto - Norme Tecniche: Parte 2, Pavimentazioni, Roma: ANAS S.p.A., 2020.
- [14] Capitolato Tecnico di Riferimento per le Pavimentazioni Autostradali, Roma: Autostrade per l'Italia S.p.A., 2022.
- [15] «Servizio Integrato Agrometeorologico ARSIAL,» [Online]. Available: <https://www.siarl-lazio.it/d3.asp>.
- [16] H. Fairweather e J. Yeaman, «A STUDY OF THE PARAMETERS AFFECTING THE PERFORMANCE OF ROADS UNDER AN EXTREME RAINFALL EVENT,» *International Journal of Geomate*, vol. 7, n. 13, pp. 955-960, Sep. 2014.
- [17] S. I. Portilla Moncayo, «Protocolli di prova e modelli di analisi per lo studio del comportamento reologico di leganti bituminosi modificati e nano rinforzati,» Politecnico di Torino, 2016.
- [18] EuroBitume, Life Cycle Inventory: Bitumen, 2nd edition, Brussels, Belgium, 2012.