Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Pavimentazioni innovative in galleria: sostenibilità ambientale ed economica. Il caso studio del Traforo del Fréjus

Relatore:
Prof. Ezio Santagata

Correlatori:
Prof. Pier Paolo Riviera
Prof.ssa Lucia Tsantilis
Ing. Leonardo Urbano

Candidato:
Salvatore Antonio Calcagnile

Anno accademico 2020/2021

Indice

1 Introduzione **1**

2 Traforo del Fréjus **2**
2.1 Cenni storici sul traforo stradale del Fréjus 2
2.2 Differenze tra galleria di sicurezza e galleria di transito 4

3 Pavimentazioni stradali in galleria **6**
3.1 Pavimentazioni stradali in galleria - Quadro normativo 6
3.2 Scelte progettuali per pavimentazioni stradali in galleria 7
3.3 Strato di fondazione nelle gallerie stradali 10
3.4 Miscele cementizie autocompattanti e autolivellanti 11

4 Metodologia LCA **22**
4.1 Descrizione generale della valutazione del ciclo di vita (LCA) . . 22
4.2 Fasi di un'analisi LCA 24
4.2.1 Definizione degli obiettivi e campo di applicazione 24
4.2.2 Analisi dell'inventario (LCI - Life Cycle Inventory) 25
4.2.3 Vautazione degli impatti (LCIA - Life Cycle Impact Assessment) 25
4.2.4 Interpretazione dei risultati 26
4.3 LCA di pavimentazioni stradali - Letteratura e revisione critica . 26
4.4 Applicativo PaLATE 30
4.4.1 Struttura di PaLATE 30
4.4.2 Design 31
4.4.3 Costruzione iniziale 32
4.4.4 Manutenzione 33
4.4.5 Attrezzature 35
4.4.6 Costi "$" 36
4.4.7 Foglio "$ Results" 43
4.4.8 Foglio "ENV Results" 43

5 Caso studio - Traforo del Frejus **49**
5.1 Calcolo volumi 51
5.1.1 Strati in conglomerato bituminoso 51
5.1.2 Emulsione bituminosa 54
5.1.3 Calcolo dei volumi per strati di fondazione e riempimento 56
5.2 Distanze di trasporto 62
5.3 Life Cycle Inventory 64
5.3.1 Fattori di emissione considerati da PaLATE 64
5.3.2 Life Cycle Inventory - Bitume 67
5.3.3 Life Cycle Inventory - Polimero 69
5.3.4 Life Cycle Inventory - Emulsione bituminosa 71
5.3.5 Life Cycle Inventory - Cemento 72
5.3.6 Life Cycle Inventory - Aggregati vergini 77

5.3.7 Life Cycle Inventory - Calce 79
5.3.8 Life Cycle Inventory - Acqua 81
5.3.9 Life Cycle Inventory - Produzione diesel 82
5.3.10 Life Cycle Inventory - Attrezzature 83
5.4 Life Cycle Cost 83

6 Intepretazione dei risultati **90**

Elenco delle figure

1 Tracciato planimetrico [1] 2
2 Profilo geologico [1] 2
3 Vantaggi diametro 8,00 m rispetto a 5,50 m [1] 3
4 Render del traforo T4 e della seconda canna [4] 4
5 Render del nuovo imbocco (lato italiano) [4] 5
6 Tipologie di pavimentazioni [6] 8
7 Sezione tipo in galleria [7] 9
8 Getto di SCC 12
9 Cono di Abrams 14
10 Slump flow $>$ 600 mm 15
11 Fenomeno di bleeding in un getto di SCC 15
12 Fasi del J-Ring test 16
13 V-funnel test 17
14 L-box test 18
15 Getto di CLSM 19
16 Life Cycle Assessment [18] 23
17 Fasi del metodo LCA [18] 24
18 Fasi e componenti del ciclo di vita di una pavimentazione [21] . . 27
19 Letteratura e fasi che caratterizzano il ciclo di vita di una pavimentazione [21] 28
20 Indicatori ambientali considerati in LCA di pavimentazioni [21] . 29
21 Fasi del ciclo di vita di una pavimentazione [24] 31
22 Struttura del modulo Design 31
23 Sezione tipo del traforo del Frejus [3] 49
24 Sezioni caso studio [9] 51
25 Meccanismo difunzionamento della mano d'attacco [6] 55
26 Produzione emulsione bituminosa [44] 71
27 Costituenti minerali dei vari tipi di cemento 74
28 Tipologie di cementi e composizione (UNI EN 197-1) 74
29 Fuel mix [51] 80
30 Material Production - Consumo d'acqua 91
31 Material Transportation - Consumo d'acqua 91
32 Processes (Equipment) - Consumo d'acqua 92
33 Material Production - GWP 92
34 Material Transportation - GWP 93
35 Processes (Equipment) - GWP 93
36 Material Production - GER 94
37 Material Transportation - GER 95
38 Processes (Equiment) - GER 95
39 Risultati sezione CS 96
40 Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione CS 97
41 Risultati sezione CG 98
42 Contributo dei leganti - Sezione CG 98
43 Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione CG 99

44 Risultati sezione GG 100
45 Contributo dei leganti - Sezione GG 100
46 Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione GG 101
47 Costi totali - Costruzione iniziale 102
48 Costi totali normalizzati rispetto alla vita utile 103
49 Costi suddivisi per materiali 103
50 Fattori di emissione PM_{10} (iniziali) 106
51 Fattori di emissione PM_{10} (rettificati) 108
52 Sector table 108
53 Consumo d'acqua (errato) 109
54 Consumo d'acqua (rettificato) 110
55 Costruzione iniziale (usura) - Trasporto materiali 111
56 Manutenzione (usura) - Trasporto materiali 111

Elenco delle tabelle

1 Esempio di costruzione iniziale dello strato di usura 32
2 Esempio di costruzione iniziale dello strato di fondazione 33
3 Esempio di manutenzione dello strato di usura 33
4 Elenco e dettagli delle attrezzature 35
5 Tabella costi materiali 37
6 Tabella costi processi 37
7 Tabella dei costi per strati in CB 38
8 Tabella dei costi per strato di fondazione e riempimento 39
9 Costi calcolati per ogni fase 40
10 Risultati costi tabella verde 41
11 Costi calcolati per ogni materiale 42
12 ENV Results 44
13 Caratteristiche volumetriche usura 52
14 Volumi dei materiali costituenti lo strato di usura 53
15 Caratteristiche volumetriche collegamento 53
16 Volumi dei materiali costituenti lo strato di collegamento 53
17 Caratteristiche volumetriche base 54
18 Volumi dei materiali costituenti lo strato di base 54
19 Caratteristiche emulsione bituminosa 55
20 Mano d'attacco 56
21 Mano di ancoraggio 56
22 Densità RAP e sludge 56
23 Densità aggregati 57
24 Densità materiali 57
25 Mix-design fondazione SC-CBM 58
26 Volumi materiali costituenti la fondazione in SC-CBM (Sez. GG) 58
27 Mix-design riempimento SC-CBM 59
28 Volumi materiali costituenti il riempimento in SC-CBM (Sez. GG) 59
29 Caratteristiche volumetriche misto cementato (Sezione CG) . . . 60
30 Volumi materiali costituenti la fondazione in misto cementato (Sez. CG) 60
31 Mix-design riempimento SC-CBM 60
32 Volumi materiali costituenti il riempimento in SC-CBM (Sez. CG) 61
33 Distanza di trasporto dei componenti del CB 62
34 Distanza di trasporto aggregati-filler 62
35 Distanza di trasporto dei componenti della miscela SC-CBM . . 63
36 Distanza di trasporto dei componenti della miscela CBM 63
37 Distanza di trasporto del terreno 63
38 Distanza di trasporto dell'emulsione bituminosa 63
39 GWP [43] 67
40 LCI bitume [45] 68
41 Fattori di emissione bitume 68
42 LCI polimero [44] 69
43 Fattori di emissione polimero 70

44 LCI emulsione bituminosa [44] . . . 72
45 Fattori di emissione emulsione bituminosa . . . 72
46 Consumo d'acqua per la produzione di una tonnellata corta di cemento [46] . . . 75
47 Consumo di elettricità [46] . . . 76
48 Consumi energetici [46] . . . 76
49 Emissioni totali disperse nell'aria [46] . . . 77
50 Fattori di emissione cemento . . . 77
51 GWP e GER per la produzione di una tonnellata di aggregati vergini [48] . . . 78
52 Fattori di emissione aggregati vergini . . . 78
53 Consumi energetici per la produzione di 1 tonnellata di calce [51] 79
54 Emissioni totali di CO_2 per la produzione di una tonnellata di calce [51] . . . 81
55 Fattori di emissione calce . . . 81
56 LCI acqua . . . 81
57 Fattori di emissione acqua . . . 82
58 Fattori di emissione produzione diesel . . . 82
59 Mezzi di trasporto . . . 83
60 Mezzi usati per le lavorazioni . . . 83
61 Costo aggregati vergini . . . 84
62 Costo cemento . . . 84
63 Costo bitume . . . 84
64 Costo acqua . . . 84
65 Costo terreno . . . 85
66 Costo emulsione bituminosa al m^2 . . . 86
67 Costo fondazione in misto cementato . . . 86
68 Costo strato di base in CB . . . 86
69 Costo strato di binder in CB . . . 86
70 Costo strato di usura in CB . . . 87
71 Costi per la stesa dei materiali della sezione GG . . . 87
72 Costi per la stesa dei materiali della sezione CG . . . 88
73 Costi per la stesa dei materiali della sezione CS . . . 88
74 Costi dei materiali utilizzati . . . 89
75 Risultati ambientali sezione CS . . . 90
76 Risultati ambientali sezione CG . . . 90
77 Risultati ambientali sezione GG . . . 90
78 Voci di costo totali . . . 102

Glossario

CBM	Cement-Bound Mixtures - Miscele legate con cemento
CB	Conglomerato Bituminoso
C&D	Construction and Demolition - Rifiuti da Costruzione e demolizione
CLSM	Controlled-Low Strength Materials - Materiali a resistenza controllata
CIR	Cold in-Place Recycling - Riciclaggio a freddo in situ
CKD	Cement Kiln Dust - Polveri di cemento da elettrofiltro
EPA	Environment Protection Agency - Agenzia per la protezione ambientale
ESAL	Equivalent Single Axle Load - Carico equivalente per asse singolo
GER	Gross Energy Requirement - Fabbisogno energetico lordo
GWP	Global Warming Potential - Potenziale di riscaldamento
HTP	Human Toxicity Potential - Potenziale di tossicità umana
HIPR	Hot in-Place Recycling - Riciclaggio a caldo in situ
LCA	Life Cycle Assessment - Valutazione del ciclo di vita
LCI	Life Cycle Inventory - Inventario del ciclo di vita
LCC	Life Cycle Cost - Costo del ciclo di vita
LCIA	Life Cycle Impact Assessment - Valutazione dell'impatto del ciclo di vita
MP	Material Production - Produzione del materiale
MT	Material Transportation - Trasporto del materiale
P	Processes - Fase di lavorazione
PaLATE	Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects - Strumento di valutazione del ciclo di vita della pavimentazione per gli effetti ambientali ed economici
PMB	Polymer Modified Bitumen - Bitume modificato con polimero
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement - Pavimentazione in asfalto rigenerato
RCA	Recycled Concrete Aggregate - Aggregati da calcestruzzo riciclato
RCRA	Hazardous Waste Generated - Rifiuti pericolosi prodotti

SCC	Self-Compacting Concrete - Calcestruzzo autocompattante
SC-CBM	Self-Compacting Cement-Bound Mixtures - Miscele cementizie autocompattanti
SG	Specific Gravity - Peso specifico
SFTRF	Société Française du Tunnel Routier du Fréjus
SITAF	Società Italiana per il Traforo Autostradale del Frejus
URCF	Uniform Capital Recovery Factor - Fattore di recupero del capitale di una serie di pagamenti uguali
VAN	Net Present Value - Valore Attuale Netto

1 Introduzione

Le pavimentazioni stradali costituiscono una ruolo di fondamentale importanza nella società odierna dal quale non si potrebbe prescindere, allo stesso tempo, le stesse, sono caratterizzate da una serie di problematiche e criticità che coinvolgono differenti settori.

Il concetto di sostenibilità oggigiorno rappresenta un punto di partenza per migliorare la qualità della vita e garantire alle generazioni future un ecosistema funzionale. Riducendo i consumi, ottimizzando l'utilizzo delle materie prime e favorendo il riciclo dei prodotti si potrebbe raggiungere un punto di equilibrio ambientale ed economico.

Lo strumento di comune impiego per una valutazione ambientale ed economica di un bene o servizio è un'analisi LCA (Life Cycle Assessment – Valutazione del ciclo di vita). Il LCA offre una metodologia completa ed esaustiva per esaminare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi attraverso un'analisi di dati e metriche ambientali al fine di accompagnare i decisori durante la valutazione di un progetto.

Nel seguente studio di tesi è stata applicata la metodologia LCA al "Traforo del Fréjus" situato sotto il monte Fréjus e che collega l'Italia con il territorio Francese. In particolare è stata effettuata un'analisi economica e ambientale della pavimentazione stradale incentrata sulla produzione dei materiali e sulla messa in opera.

Nel lavoro sono state analizzate tre tipologie di pavimentazioni congiunte dalla stessa unità funzionale ma differenti nella composizione. La peculiarità di questo studio vede la comparazione dell'utilizzo di materiali convenzionali e non convenzionali, andando ad inquadrare le principali differenze in termini economici e di carattere ambientale. Nello specifico è stato considerato l'utilizzo di miscele cementizie autocompattanti e autolivellanti, progettate presso il Laboratorio di Materiali Stradali del Politecnico di Torino e realizzate a seguito di complicazioni tecnico-costruttive che si sono presentate durante il progetto preliminare dell'infrastruttura.

Per rendere l'analisi qualitativamente e quantitativamente coerente con il caso studio e per delineare l'impronta ambientale dei processi di costruzione, è stata effettuata una ricerca dettagliata in letteratura inerente al contesto Europeo sui consumi e sui fattori di emissione correlati ai materiali utilizzati.

Il lavoro è stato sviluppato sulla sola fase di costruzione iniziale includendo i processi di estrazione e di produzione delle materie prime, la loro lavorazione, i consumi e le emissioni legate al trasporto dei materiali, i consumi legati alle fasi di realizzazione dei diversi strati che compongono la pavimentazione.

Il seguente studio ha l'obiettivo di favorire il concetto di sostenibilità e di contribuire a future analisi di valutazione del ciclo di vita volte a migliorare e sostenere il settore delle pavimentazione stradali e dell'Ingegneria dei Trasporti.

2 Traforo del Fréjus

2.1 Cenni storici sul traforo stradale del Fréjus

Il traforo del Fréjus è una galleria stradale di collegamento che giace sotto il Monte Fréjus e che collega la città di Modane e Bardonecchia, parallelamente allo storico Traforo Ferroviario del Fréjus. La progettazione dell'infrastruttura ha inizio nella seconda metà degli anni sessanta e vede coinvolta la società francese (SFTRF) e la società italiana (SITAF – Società Italiana per il Traforo Autostradale del Fréjus), entrambe le società sono state successivamente incaricate della realizzazione e gestione dell'opera [1].

Il traforo è stato inaugurato al traffico il 12 Luglio 1980 consentendo il solo passaggio ai veicoli leggeri e poco dopo, sempre nello stesso anno, viene estesa la circolazione ai veicoli pesanti. La galleria si estende per 12,895 km di cui 6,8 km ricoprono il fronte italiano caratterizzato come traforo T4 nella rete autostradale nazionale. La larghezza totale della piattaforma stradale è di 10,10 m, mentre la carreggiata che è collocata tra due marciapiedi è di 9 m. Le corsie che caratterizzano la carreggiata sono di 3,80 m ciascuna e sono disposte ad una distanza di 36 cm tra loro, l'altezza della sezione misura 4,50 m e al di sopra sono presenti gli impianti di areazione.

Il profilo longitudinale è caratterizzato da una pendenza unica dello + 0,54% (direzione Francia – Italia) giustificata dal fatto che entrambi gli imbocchi del traforo sono situati pressochè alla stessa altitudine, mentre il tracciato planimetrico gode di una pendenza trasversale è del +1,5% in rettifilo e del 3% in curva [2].

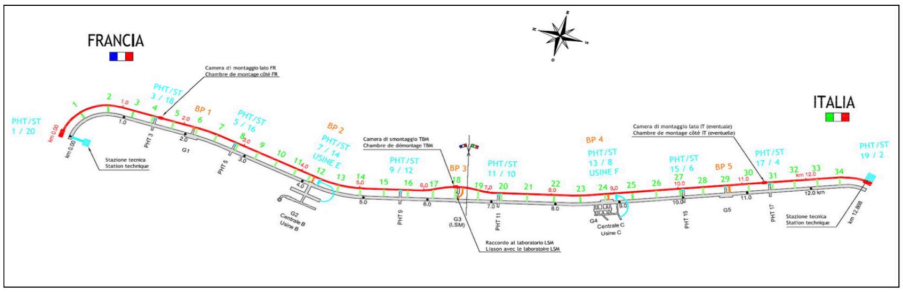


Figura 1: Tracciato planimetrico [1]

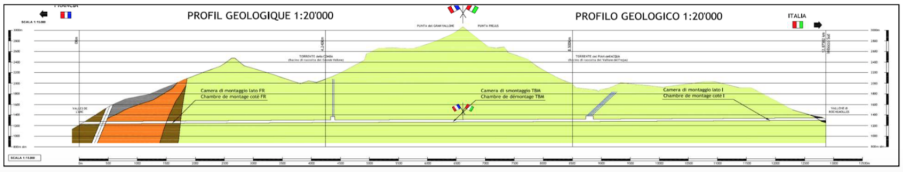


Figura 2: Profilo geologico [1]

Nei primi anni duemila, in seguito ad serie di gravi incidenti, è stato previsto un innalzamento del livello di sicurezza generale delle gallerie, la Comunità Europea ha pubblicato la Direttiva Comunitaria 2004/54/CE che fissa i requisiti minimi di sicurezza a cui devono essere soggette le gallerie autostradali del territorio Europeo. Inizialmente per conformare il Traforo del Fréjus è stato proposto un progetto che prevedeva la costruzione di una seconda canna dal diametro di 5,50 m .

Il 4 Giugno 2005 sul versante francese si verifica un incendio di un mezzo pesante che provoca la morte di due persone e gravi danni all'infrastruttura, il propagarsi delle fiamme e le condizioni climatiche sfavorevoli rendono difficoltoso l'arrivo dei soccorsi italiani per aiutare le squadre di soccorso francesi. A causa di questa esperienza negativa, la conferenza InterGovernativa Italia – Francia chiede una revisione del progetto della Galleria di Sicurezza, oltre ai requisiti minimi geometrici la galleria deve consentire l'accesso dei mezzi antincendio tali che "questi possano intervenire da ambo i lati efficacemente e tempestivamente sull'incendio ed in ogni condizione atmosferica".

Il progetto della Galleria di Sicurezza viene rettificato e adeguato nell'anno 2006 mirando ad una struttura che consentisse ai mezzi di soccorso di circolare in totale sicurezza. Tale scelta permette l'incrocio dei veicoli di soccorso comunemente utilizzati dalle squadre di servizio che operano nel tunnel ad una velocità di 40 km/h.

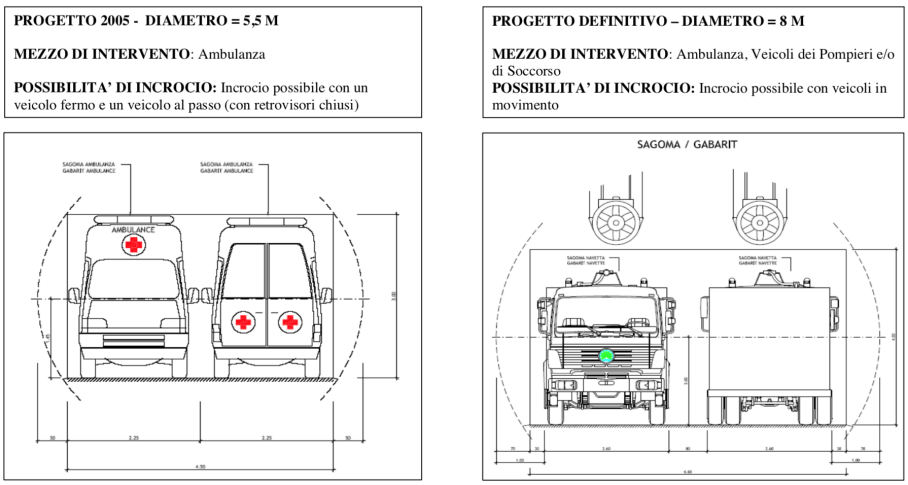


Figura 3: Vantaggi diametro 8,00 m rispetto a 5,50 m [1]

L'11 Ottobre 2012 la Commissione Intergovernativa Italia – Francia, prende atto del parere esposto dal Comitato di Sicurezza relativo a trasformare la Galleria di Sicurezza in una galleria di transito a tutti gli effetti. Il traforo del Fréjus diviene un'opera a due canne monodirezionali con una corsia per ogni senso di marcia.

Le caratteristiche tecniche e geometriche dell'infrastruttura sono riportate di seguito [3]:

- Lunghezza totale: 12.878 metri a un interasse medio di 50 m dal traforo;
- Diametro interno: 8 m;
- Pendenza media: 0,54% (direzione Francia – Italia);
- Sagoma libera: 6,60 m x 4,00 m;
- Rifugi: 34 con interasse medio 367 metri e una superficie complessiva per utenti di 110 m^2;
- Stazioni tecniche: 10 con interasse medio di 1.430 m. Sono strutture di carattere tecnico atte ad ospitare impiantistica di sicurezza, allarmi e strumenti per la gestione delle comunicazioni;
- 9 By – pass con interasse medio 1.288 m. Essi risultano indipendenti dai rifugi e dalle stazioni tecniche, servono a permettere il passaggio rapido dei mezzi di soccorso da una galleria all'altra;
- Ventilazione: di tipo longitudinale;
- Presenza di edifici multifunzionali ai portali per la gestione dei soccorsi.

2.2 Differenze tra galleria di sicurezza e galleria di transito

Il passaggio da galleria di sicurezza destinata ai soli mezzi di soccorso a galleria di transito non comporta nessuna modifica circa l'ubicazione dell'opera e delle caratteristiche dimensionali.

La nuova galleria di transito viene realizzata parallelamente al Traforo T4 con un diametro di 8 metri, la circolazione è di tipo monodirezionale all'interno di ogni canna consente la separazione dei flussi di marcia innalzando sensibilmente il livello di sicurezza per gli utenti e per i mezzi di soccorso in caso di incidente.

Figura 4: Render del traforo T4 e della seconda canna [4]

L'apertura al traffico della galleria prevede un miglioramento degli impianti e dei servizi tecnici, in particolare della segnaletica stradale, illuminazione, videosorveglianza, rilevamento incendio, sistema di rete per chiamate d'emergenza e potenziamento dell'impianto di ventilazione.

Separando i flussi di marcia si riduce drasticamente la possibilità di scontri frontali tra veicoli, in questo modo si trasforma la galleria in un sistema di sicurezza attivo, contrariamente alla galleria di sicurezza iniziale dove il sistema è passivo.

Da un punto di vista impiantistico, la divisione dei flussi di marcia consente di gestire in maniera più efficiente e sicura la ventilazione longitudinale: in caso di comune esercizio o di emergenza (ad esempio incendio), il fumo verrà spinto e aspirato in direzione del senso di marcia. In particolare in caso di emergenza viene modificata solo l'intensità dell'impianto di ventilazione così da garantire la marcia in sicurezza per tutti i veicoli che si trovano coinvolti a valle e a monte dell'accaduto [3, 4].

L'adeguamento del progetto ai nuovi standard di sicurezza e l'apertura al traffico fornisce una rete di collegamento di fondamentale importanza con il territorio francese, potenziandone il trasporto autostradale e incrementando il livello economico e sociale in termini nazionali.

Figura 5: Render del nuovo imbocco (lato italiano) [4]

3 Pavimentazioni stradali in galleria

3.1 Pavimentazioni stradali in galleria - Quadro normativo

A fronte dei drammatici eventi accaduti in passato in diverse strutture lungo la rete stradale transeuropea caratterizzati da un numero rilevante di vittime, gravi danni alle infrastrutture e ingenti danni alla rete di trasporti, il problema della sicurezza nelle gallerie stradali ha assunto un ruolo rilevante a livello sociale.

Il Decreto Legislativo 264/06 che integra quanto definito nella Direttiva 2004/54/CE emanata dal Parlamento Europeo e riguardante i Requisiti Minimi di Sicurezza nei confronti delle gallerie stradali della Rete Transeuropea, definisce una serie di punti chiave da soddisfare e obbiettivi da perseguire per innalzare il livello di sicurezza, individuando un approccio sistematico ed esaustivo per la progettazione di nuove gallerie o l'adeguamento di strutture gia esistenti [5].

Il processo a monte della progettazione in sicurezza di una linea stradale in galleria prevede l'analisi e l'acquisizione di un set di dati che devono necessariamente comprendere i seguenti aspetti:

- Caratteristiche geometriche e strutturali dell'infrastruttura: in fase di progettazione è necessario disporre di tutte le informazioni geometriche e strutturali dell'opera (numero corsie, larghezza, direzionalità, marciapiedi, ecc.), lunghezza della galleria e sezione trasversale da adottare, caratteristiche geometriche del tracciato plano-altimetrico, la presenza o meno di opere gia esistenti, loro tipologia e anno di costruzione. Tali parametri rappresentano le ipotesi di base per una corretta progettazione in sicurezza dell'opera;

- Caratteristiche degli impianti presenti: nella fase di progettazione occorre conoscere le caratteristiche degli impianti presenti ponendo particolare attenzione alle prestazioni che possono garantire in fase di normale esercizio e alla loro affidabilità in situazioni di emergenza;

- Caratteristiche dell'ambiente circostante: è necessario avere una visione completa e dettagliata delle caratteristiche ambientali in cui verrà situata l'opera. Rientrano in questa categoria le condizioni geologiche e meteoclimatiche, quali piovosità, differenza di pressione ai due imbocchi, direzione prevalente dei venti, ecc. Inoltre giocano un ruolo importante ulteriori zone di accesso alternative in caso di situazioni di emergenza;

- Caratteristiche del traffico: è importante disporre informazioni sui volumi di traffico, composizione e regime di traffico. Questi parametri influenzano la sicurezza globale della struttura e la popolazione esposta al rischio;

- Incidentalità: parametro di fondamentale rilevanza nella fase di analisi e progetto è il tasso di incidentalità della galleria in esame e della tratta

stradale sulla quale è collocata, tali informazioni influenzano in maniera sostanziale i parametri di sicurezza.

3.2 Scelte progettuali per pavimentazioni stradali in galleria

Le gallerie stradali sono delle infrastrutture complesse ed articolate dove la singola scelta effettuata a monte in fase preliminare potrà ripercuotersi in maniera positiva e/o negativa a valle della realizzazione. La pratica e l'esperienza dimostrano che per la progettazione e la realizzazione di una qualunque opera che risulti essere funzionale e sicura nel suo complesso, occorre tenere in considerazione aspetti di carattere ingegneristico, di pianificazione territoriale e dei trasporti, di carattere economico, politico e sociale. Una mancata corrispondenza con uno di questi parametri potrebbe risultare significativo nel corso della vita utile dell'infrastruttura e riflettersi sullo scenario sociale.

Gli aspetti rilevanti nella progettazione di una galleria stradale sono la tipologia di pavimentazione, i materiali utilizzati e la tecnologia di realizzazione [5, 6]. Tali scelte variano a seconda dei casi e dei requisiti strutturali e funzionali richiesti. I requisiti strutturali si traducono in portanza e durabilità, quelli funzionali sono legati all'interazione pneumatico-pavimentazione e comprendono comfort, sicurezza di guida, regolarità del piano di rotolamento e aderenza.

Le pavimentazioni stradali vengono classificate come segue in funzione dei materiali utilizzati e dal meccanismo di trasferimento del carico :

- pavimentazioni flessibili: costituite da uno strato di usura superficiale, uno strato di collegamento e uno di base, tutti in conglomerato bituminoso. Il pacchetto strutturale è completato da una fondazione (solitamente in misto granulare) e da uno strato di sottofondo. Questo tipo di pavimentazione è di comune impiego e permette una distribuzione graduale dei carichi al sottofondo;

- pavimentazioni rigide: caratterizzate da una lastra in calcestruzzo che poggia su uno strato di base in misto cementato e uno strato di fondazione in misto granulare. Tali tipologie vengono impiegate quando il sottofondo non dispone di caratteristiche meccaniche adeguate a sopportare i carichi o quando le condizioni climatiche risultano abbastanza severe, infatti la percentuale maggiore di essi viene sopportata dallo strato in calcestruzzo;

- pavimentazioni semi-rigide: la struttura è simile a quella delle pavimentazioni flessibili alla quale si aggiunge uno strato in misto cementato aggiuntivo al di sotto dello strato di base in conglomerato bituminoso. Soluzione solitamente adottata per pavimentazioni soggette a traffico pesante e per piste di volo degli aeroporti.

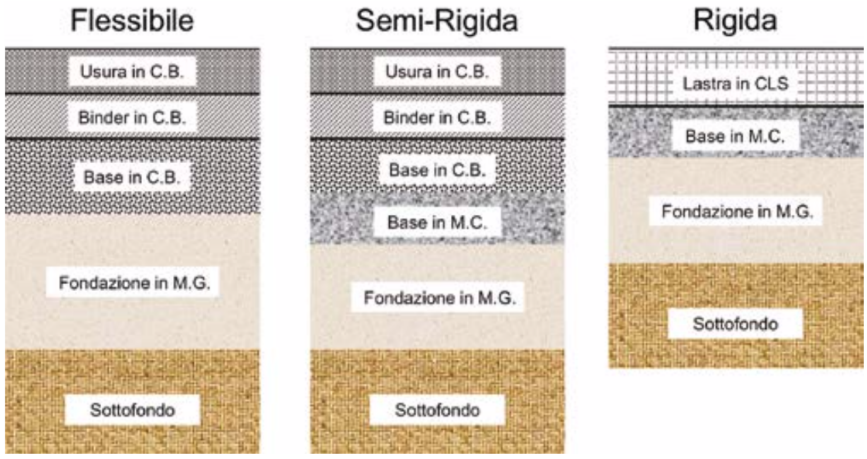


Figura 6: Tipologie di pavimentazioni [6]

Le pavimentazioni rigide realizzate con lastre superficiali in calcestruzzo sono spesso utilizzate nel caso di gallerie stradali in quanto risultano essere più idonee in situazioni di emergenza (incendio) rispetto a quelle in conglomerato bituminoso e godono di lunga durata. Molti paesi europei oramai sono sempre più propensi all'utilizzo di tale tipologia costruttiva, ad esempio la normativa austriaca richiede esplicitamente l'utilizzo di pavimentazioni in calcestruzzo in galleria, ciò può essere chiaramente giustificato dalla considerevole estensione delle reti stradali sotterranee presenti sul territorio austriaco (circa 380 km) [7].

Altri paesi come la Spagna e la Slovacchia non ammettono l'utilizzo di pavimentazioni in conglomerato bituminoso in galleria a causa del rischio d'incendio. D'altro canto, tali restrizioni variano a seconda degli stati e delle relative norme di riferimento; in Norvegia la normativa attuale ammette indifferentemente l'utilizzo di pavimentazioni rigide e flessibili a patto che la progettazione sia eseguita sulla base di una valutazione ambientale, di consumo ed economica. Ad esempio per limitare il tasso di incidentalità, migliorare il comfort automobilistico e ridurre il consumo energetico dovuto all'illuminazione, viene esplicitamente richiesto di disporre superfici di colore chiaro [8]. In termini ambientali però questo aspetto è contrastante con l'utilizzo di materiali ad alto contenuto di quarzo, che si trova generalmente nei calcestruzzi preconfezionati, in quanto per strade ad alto volume di traffico nella quali vengono utilizzati pneumatici chiodati le relative emissioni possono causare problematiche legati alla salute umana. Per questo motivo in Svezia l'impiego di pavimentazioni in calcestruzzo viene largamente evitato.

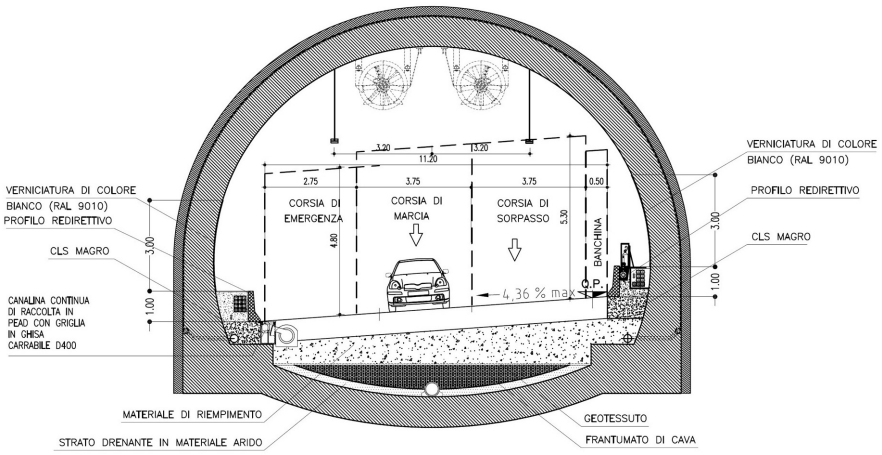


Figura 7: Sezione tipo in galleria [7]

La scelta del tipo di pavimentazione viene effettuata in base al contesto territoriale e normativo ma anche in funzione di diversi fattori quali i costi di costruzione, il ciclo di vita, la disponibilità dei materiali, l'impatto ambientale, le tecnologie costruttive e l'esperienza del personale. La vita utile di una pavimentazione è influenzata dal volume e dall'intensità del traffico ma anche dal regime di temperature. Infatti, rispetto alle strade comuni, in galleria le temperature risultano essere più alte e caratterizzate da minore variabilità, tale fenomeno porta una minore rigidità degli strati superiori che può essere relativamente compensato da un'idonea progettazione degli strati inferiori.

Gli strati di fondazione e sottofondo hanno la funzione di ripartire i carichi veicolari e garantire un'adeguata capacità portante. La fondazione costituisce lo strato al di sotto del pacchetto stradale e può essere composta da misto granulare, misto cementato (a seconda della tipologia di pavimentazione) o da materiali di recupero certificati per il loro riutilizzo ed integrati, ove possibile, con aggregati naturali [6, 7].

Il sottofondo rappresenta lo strato sul quale si poggia la sovrastruttura stradale e ha la funzione di dissipare i carichi e ridistribuirli tale da non permettere la concentrazioni in un unico punto così da evitare fessurazioni e cedimenti locali. La realizzazione di un sottofondo con caratteristiche elevate garantisce una vita utile più lunga e prestazionale. Qualora il sottofondo dovesse presentare caratteristiche meccaniche scadenti si possono utilizzare diverse metodologie per migliorarne la risposta nel tempo, come ad esempio tecniche di stabilizzazione a calce e/o cemento. I processi di "stabilizzazione" riguardano tutte quelle procedure che permettono di ottimizzare le caratteristiche meccaniche, in particolare la portanza, questo tipo di miglioria è utilizzata anche per gli strati di fondazione.

3.3 Strato di fondazione nelle gallerie stradali

Spesso nella pratica lo strato di fondazione è realizzato con un riempimento di materiale granulare non legato a grana grossa (lato inferiore) e una porzione di terreno selezionato con adeguate caratteristiche (lato superiore). Come detto in precedenza, in funzione delle caratteristiche meccaniche del materiale può essere previsto un trattamento di stabilizzazione per migliorarne le prestazioni. Nel caso di strade soggette a considerevoli carichi veicolari, o nel caso di pavimentazioni rigide, è buona pratica utilizzare una fondazione in misto cementato, costituita da una miscela di aggregati (vergini o di riciclo) legati con cemento e miscelati con un determinato dosaggio d'acqua. Come per gli strati in conglomerato bituminoso, anche il misto cementato può essere prodotto in impianto fisso e successivamente trasportato in cantiere o essere prodotto direttamente in situ. La differenza sostanziale sta nell'accuratezza e nei controlli inerenti al mix – design che nel caso di impianto fisso risultano essere più rigorosi.

Nel caso specifico delle gallerie stradali lo strato di fondazione assume un ruolo chiave nella realizzazione degli strati superiori in quanto essa funge da piattaforma di base per i mezzi d'opera, nella vita utile della pavimentazione e nei processi di manutenzione futuri. Per i motivi appena esposti è opportuno selezionare un materiale che soddisfi tutti questi requisiti. Un altro aspetto rilevante è quello della compattazione che può risultare un operazione problematica se la sede stradale dispone di utenze interrate, come ad esempio cavi di trasmissione ad alta tensione e reti in fibra ottica [9].

Come soluzione alternativa per gli strati di fondazione in galleria si possono adottare delle miscele cementizie autolivellanti ed autocompattanti ad alta conducibilità termica posate in opera attraverso un pompaggio della miscela fino allo spessore designato. L'impiego di tali miscele porta ad avere diversi aspetti vantaggiosi:

- nessuna necessità di compattazione dello strato, ciò comporta una minore manodopera e maggiore attenzione e sicurezza nei confronti delle utenze sotterranee;
- notevole capacità portante a breve termine tale da poter permettere il passaggio dei mezzi d'opera per la realizzazione degli strati superiori in tempi molto brevi;
- riduzione dei costi e delle tempistiche di cantiere.

Un altro punto da tenere in considerazione in fase di design è la resistenza a lungo termine della miscela cementizia [10]. Questa non deve svilupparsi eccessivamente nel tempo in modo da consentire future operazioni di scavo in previsione di una manutenzione delle utenze sotterranee senza pregiudicare l'integrità della struttura.

3.4 Miscele cementizie autocompattanti e autolivellanti

Come accennato in precedenza, nella progettazione e realizzazione dello strato di fondazione nel caso di pavimentazioni stradali in galleria, occorre una soluzione che soddisfi una serie di parametri e di aspetti che sono legati alle prestazioni della struttura e alla sua vita utile.

Il comune impiego di riempimenti in materiale granulare non legato può essere sostituito da diverse soluzioni come miscele cementizie o miscele stabilizzate con calce e/o cemento, al fine di incrementare la capacità portante e semplificare degli aspetti di carattere tecnico – costruttivo.

Nel seguente paragrafo vengono descritte diverse tipologie di materiali che si prestano bene nel caso di pavimentazioni in galleria. In particolare vengono descritti i calcestruzzi autocompattanti (SCC) come materiali di comune impiego [16, 17] e le miscele CLSM ed SC - CBM [9, 10, 11] come materiali non convenzionali progettati presso il Laboratorio di Materiali Stradali del Politecnico di Torino. L' elevata fluidità di queste miscele permette la rapida posa in cantiere ed una elevata lavorabilità senza alcuna necessità di compattazione del materiale.

Materiali convenzionali

SCC - Self-Compacting Concrete

I calcestruzzi autocompattanti (SCC – Self-Compacting Concrete) rappresentano un evoluzione dei calcestruzzi ordinari, sono dei conglomerati cementizi ad elevata fluidità che non necessitano di nessuna forma di costipamento e/o vibrazione durante la posa. I primi conglomerati cementizi ad elevata fluidità furono sperimentati e testati a cavallo degli anni 70 con l'introduzione degli additivi superfluidificanti, venivano classificati con il termine "calcestruzzi reologici" per indicare calcestruzzi fluidi e allo stesso tempo plastici. La loro efficacia in termini di fluidità veniva determinata attraverso un indice di reoplasticità R dato dal reciproco della capacità di bleeding "B" [16].

$$R = \frac{1}{B} \tag{1}$$

Dalla relazione precedente appare ovvio che per valori nulli di segregazione e bleeding, l'indice di reoplasticità tende all'infinito, caso estremamente teorico. Nel caso contrario, R tende a diminuire all'aumentare del fenomeno di segregazione e dell'acqua di bleeding che si deposita in superficie (distacco tra fase solida e fluida).

Il raggiungimento di un alto valore dell'indice di reoplasticità non dipende solo dalla presenza dell'aggiunta di superfluidificante ma è strettamente legato a:

- un dosaggio di cemento adeguato così da garantire sufficiente coesione;
- distribuzione granulometrica degli aggregati tale da impedire la risalita di acqua (bleeding) e segregazione;

- diametro massimo degli aggregati non deve superare i 20 mm.
- presenza di filler;

Un SCC [17] per essere definito tale deve possedere le seguenti caratteristiche:

- elevata fluidità e scorrimento in assenza di ostacoli;
- elevata resistenza alla segregazione tale ridurre ai minimi termini la separazione tra fase liquida e fase solida durante il getto;
- capacità di passare attraverso spazi ridotti (passing ability), ad esempio tra armature molto fitte.

Figura 8: Getto di SCC

Gli aspetti che hanno favorito la diffusione nel campo dell'ingegneria civile di questi materiali sono:

- capacità di autocompattarsi e autolivellarsi senza l'ausilio di costipamento o vibrazione del calcestruzzo, soprattutto quando per motivi pratici non possono essere utilizzati mezzi specifici;
- maggiore produttività dell'impresa in quanto può ridurre significativamente costi e tempistiche;
- miglioramento delle condizioni di lavoro degli operai dovuto all'assenza di vibrazioni del calcestruzzo;
- contenimento della manodopera;
- miglioramento del faccia vista.

Componenti dei calcestruzzi autocompattanti

Gli elementi che costituenti sono cemento, aggregati, acqua e additivi e il loro utilizzo è descritto nella norma UNI EN 206:2016 "Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità".

Cemento

E' prescritto l'utilizzo di cementi conformi alla norma UNI EN 197-1, i più utilizzati sono CEM I Cemento portland e CEM II Cemento Portland Composito. Il loro dosaggio è relativamente elevato e va da 350 a 450 kg/m3. Un dosaggio superiore non è consigliato in quanto porta ad avere fenomeni di ritiro del calcestruzzo.

Aggregati

Per i calcestruzzi autocompattanti è necessario l'utilizzo di aggregati fini e aggregati grossolani per ovviare ai fenomeni di segregazione e bleeding. Il volume di materiale fino (diametro minore di 0,125 mm) è compreso tra 170 e 200 kg/m^3, mentre per gli aggregati grossolani (diametro che va da 16 a 25 mm) è consigliabile non superare i 340 kg/m^3 di calcestruzzo per facilitare il fenomeno di "passing ability".

Acqua

Viene impiegata l'acqua che si utilizza per i calcestruzzi ordinari con riferimento alla norma UNI EN 1008:2003. La norma specifica i requisiti per l'acqua d'impasto per la produzione del calcestruzzo e descrive i metodi per la sua valutazione.

Additivi

Per l'utilizzo di additivi che migliorino le caratteristiche del materiale si fa riferimento alla norma UNI EN 934-2 [56]"Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione". E' fondamentale l'utilizzo di un superfluidificante per garantire le proprietà reologiche dell'SCC, utleriori additivi possono essere areante, modificatore di viscosità, ecc.

Metodi di misura delle proprietà reologiche degli SCC

Esistono diversi metodi che consentono di individuare specifiche caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti avvalendosi di semplici attrezzature e di facile utilizzo anche in stabilimento. Sono di seguito riportati i metodi più comuni[17].

Cono di Abrams - Slump flow

Il cono di Abrams è uno dei classici metodi per determinare lo slump del calcestruzzo. Nel caso di un calcestruzzo autocompattante, dato l'alto livello di fluidità della miscela, l'abbassamento al cono è cosi elevato che non è più significativo (> 260 mm). Si procede dunque con la misurazione di due parametri:

- il diametro di spandimento del calcestruzzo una volta sformato dal cono che deve avere valori superiori a 600 mm. Si misura dunque il valore di "slump flow" che indica la deformabilità del materiale, cioè quanto lontano può arrivare il calcestruzzo rispetto al punto di getto senza presenza di ostacoli;
- si registra il tempo di spandimento che impiega il calcestruzzo dal momento del getto a raggiungere un diametro di 500 mm. Tale parametro indica la velocità di deformazione del calcestruzzo, se questo valore è molto basso vale a dire che il calcestruzzo è molto viscoso e necessita di vibrazione.

In questa prova è possibile anche individuare visivamente eventuale segregazione del materiale registrando l'eventuale presenza di acqua di bleeding.

Figura 9: Cono di Abrams

Figura 10: Slump flow $>$ 600 mm

Figura 11: Fenomeno di bleeding in un getto di SCC

Japanese-Ring test (J-Ring)

Tale prova rappresenta un metodo alternativo al cono di Abrams per valutare il diametro di spandimento del calcestruzzo fresco in presenza di ostacoli. Il calcestruzzo viene introdotto nel cono di Abrams e in seguito al suo sollevamento viene fatto defluire attraversando 20 barre metalliche dallo spessore di 10 mm e alte 100 mm, tutte collegate tramite un anello. L'obbiettivo e di determinare il diametro di spandimento una volta che il calcestruzzo termina di espandersi.

Figura 12: Fasi del J-Ring test

Viene valutata la capacità di attraversamento del calcestruzzo mediante le seguenti misure:

- dalla differenza del diametro finale misurato rispetto a quello misurato senza la presenza dell'anello (dallo slump flow);
- valutando la differenza di altezza di calcestruzzo tra zona interna ed esterna dell'anello.

V-funnel test

Il V-Funnel test consiste nel misurare il tempo necessario al calcestruzzo fresco per uscire da un imbuto a forma di V, in genere per calcestruzzi autocompattanti (SCC) questo tempo non supera quasi mai i dieci secondi. Maggiore sarà il

tempo che impiega il cls a fuoriuscire, maggiore sarà la sua viscosità e dunque minore la sua capacità di flusso.

Figura 13: V-funnel test

L-box test

La prova della scatola ad L viene fatta per determinare la proprietà di "passing ability" del calcestruzzo autocompattante. Il calcestruzzo viene introdotto nella porzione verticale il quale è in un primo momento bloccato a fuoriscire attraverso un sistema apposito, una volta lasciato libero il materiale tende a disporsi nella porzione orizzontale della scatola ad L attraversando degli elementi in metallo disposti verticalmente che simulano la presenza delle armature di elementi strutturali. Con questa prova è possibile determinare la capacità di avanzamento del materiale, l'eventuale tempo di arresto (blocking) e il tempo impiegato per effettuare il percorso.

Figura 14: L-box test

Materiali non convenzionali

CLSM - Controlled Low-Strenght Materials

Le miscele cementizie a resistenza controllata (CLSM) sono delle malte caratterizzate da una elevata fluidità e rappresentano una valida alternativa all'utilizzo di materiali granulari non legati. Usate principalmente come materiale di riempimento per trincee e muri di sostegno, attualmente trovano largo impiego anche nel settore stradale proprio in virtù delle ottime proprietà che possiedono. Un accurato studio del mix – design porta ad avere delle miscele che possiedono un'ottima lavorabilità in situ, possibilità di controllare le resistenze nel breve e nel lungo periodo, caratteristiche di auto-consolidamento, buona conducibilità termica [12] e facilità di rimozione. Su quest'ultimo aspetto occorre porre particolare attenzione in quanto tali miscele tendono a maturare la loro resistenza nel tempo che potrebbe indurre a complicazioni pratiche qualora lo strato dovesse essere rimosso per eventuali operazioni di manutenzione. Risulta molto importante dunque avere delle resistenze a lungo termine che possano essere paragonate circa a quelle dei materiali granulari che si utilizzano per i riempimenti.

L'utilizzo delle miscele CLSM è di largo impiego nei seguenti campi:

- sottofondi stradali;
- seratoi sotterannei;
- riempimento in muri di sostegno e componenti secondarie;
- gallerie;

- formazione di letti di posa per condotte;
- trincee;
- pozzi;
- isolamento termico con malta cemetizia.

Figura 15: Getto di CLSM

Componenti delle miscele CLSM

I costituenti principali del mix – design sono cemento, aggregati, acqua e additivi, ai quali possono aggiungersi in base ai requisiti ulteriori materiali che ne migliorano le caratteristiche, ad esempio materiali di riciclo (RAP, RCA, ..) e ceneri volanti [13, 14].

Cemento

Il cemento funge da legante tra gli aggregati e conferisce resistenza meccanica alla miscela. Tipicamente vengono utilizzati cementi conformi alla norma UNI EN 197-1 che comprende cinque tipologie caratterizzate da una percentuale decrescente di clinker, in particolare sono di comune impiego CEM I Cemento portland e CEM II Cemento Portland Composito [15]. Il dosaggio varia tra i 30 e 120 kg/m^3, in funzione dei requisiti richiesti e dei tempi di indurimento.

Aggregati

Come in tutte le miscele legate con cemento gli aggregati costituiscono la componente principale della miscela. In genere non vengono utilizzati aggregati di dimensioni grossolane ma aggregati fini, il loro dosaggio è compreso tra i 1500 e 1800 kg/m^3 e può variare in funzione del quantitativo di cemento, acqua, additivi e vuoti contenuti nella miscela. La loro funzione è strettamente legata alla lavorabilità della miscela, alla sua fluidità e alle resistenze nel breve e nel lungo periodo. Si prestano bene i materiali con diametro non superiore ai 19 mm, ghiaia fine con presenza di sabbia, materiali di scarto provenienti da cava.

Acqua

L'acqua nella miscela ha ruolo fondamentale in quanto conferisce le caratteristiche di fluidità e di lavorabilità richieste, permettendo alla miscela di autocompattarsi e autolivellarsi. Il dosaggio varia tra i 190 e 350 kg/m^3 in funzione delle caratteristiche che deve avere la miscela e della tipologia di aggregati utilizzati, ovviamente l'utilizzo di aggregati molto fini ne richiede un quantitativo maggiore dovuto alla notevole capacità di assorbimento del materiale stesso.

Additivi

Sono dei prodotti chimici aggiuntivi introdotti nella miscela in fase di produzione con adeguati dosaggi in funzione dei requisiti da soddisfare. Hanno lo scopo di migliorare le caratteristiche allo stato fresco e allo stato indurito e permettono di migliorare le prestazioni del materiali. Nelle miscele cementizie vengono tipicamente usati i superfluidificanti, acceleranti di presa e aeranti. Questi ultimi formano delle micro bolle d'aria all'interno dell'impasto riducendo il peso, migliorandone la lavorabilità e riducendo l'esposizione all'azione aggressiva di cicli gelo e disgelo. Un dosaggio eccessivo di areante può richiedere una quantità maggiore di aggregati fini per aumentare la coesione ed evitare fenomeni di segregazione della miscela allo stato fresco.

Materiali secondari

Possono essere utilizzati dei materiali aggiuntivi di riciclo provenienti da diversi settori al fine di migliorare le caratteristiche della miscela, abbattere i costi e aumentare la sostenibilità dell'opera. Sono molto utilizzate le ceneri volanti provenienti dal processo di combustione del carbone (fly ash), polverino di gomma proveniente dalla macinazione di pneumatici (crumb rubber), aggregato di calcestruzzo riciclato (RCA), misto frantumato proveniente da fresatura di pavimentazione bituminosa (RAP), rifiuti da costruzione e demolizione (C&D).

SC-CBM - Malte cementizie autocompattanti

In generale non esistono delle specifiche normative per l'utilizzo di miscele cementizie autocompattanti per la realizzazione di fondazioni e riempimenti delle

sedi stradali, questo vale a dire che la progettazione è preceduta da uno studio tecnico sulle prestazioni dei materiali utilizzati e del mix – design .

I materiali che vengono comunemente impiegati nelle operazioni di costruzione di gallerie, seppur di alte prestazioni, non possiedono i requisiti ingegneristici discussi. Ad esempio terreni selezionati e misti granulari, nonostante siano facilmente removibili, necessitano di compattazione dopo la posa, hanno rigidezza limitate e possiedono una bassa conducibilità termica.

In virtù delle proprietà e delle caratteristiche delle miscele legate con cemento risulta molto interessante l'impiego di tali materiali per la realizzazione di fondazioni stradali nel caso di pavimentazioni in galleria.

Le principali caratteristiche che devono possedere tali miscele sono:

- fluidità e facile lavorabilità;
- autocompattanti e autolivellanti per effetto del peso proprio;
- ottima capacità portante nel breve termine;
- resistenza meccanica limitata nel lungo termine;
- buona conduttività termica;
- utilizzo di materiali di recupero al fine di ridurre i costi e incrementare la sostenibilità dell'opera.

Recentemente è stato condotto uno studio di ricerca presso il Laboratorio di Materiali Stradali del Politecnico di Torino [9] nel quale è stato proposto un innovativo impasto cementizio autocompattante e autolivellante (SC – CBM Self-Compacting Cement-Bound Mixture) per la realizzazione di strati di fondazione in galleria. Gli SC – CBM si presentano a metà strada tra le miscele cementizie a resistenza controllata (CLSM) [11] e i calcestruzzi autocompattanti (SCC) ma con una composizione appropriata. Sono principalmente composti da una matrice fatta di cemento Portland, aggregati fini e grossolani, acqua, additivi. Inoltre, al fine ridurre l'impatto ambientale e incrementare le proprietà della miscela sono stati utilizzati materiali di riciclo come RAP e fanghi minerali. Il RAP è un materiale di scarto che viene prodotto a seguito delle attività di manutenzione su pavimentazioni in conglomerato bituminoso, mentre i fanghi minerali (noti anche come sludge) sono ottenuti da operazioni di lavaggio degli inerti [9, 10]. L'impiego di questi materiali come aggregati secondari all'interno della miscela cementizia, oltre ad essere innovativo, ha soddisfatto i requisiti proposti in partenza:

- la riduzione di resistenza dovuta al RAP ha soddisfatto il requisito di avere delle resistenze contenute nel lungo termine, dunque escavabilità;
- la finezza dei fanghi minerali migliora la fluidità e la stabilità della miscela, inoltre non provoca reazioni pozzolaniche in presenza di acqua.

4 Metodologia LCA

4.1 Descrizione generale della valutazione del ciclo di vita (LCA)

Il Life Cycle Assessment (LCA) rappresenta una metodologia analitica e sistematica che valuta gli oneri ambientali associati ad un prodotto o un servizio, durante tutte le fasi che compongono il suo ciclo di vita. Il principio che sta alla base del metodo LCA è quello di registrare tutti i flussi di materiale ed energia connessi con un prodotto, un processo o un servizio. In un'analisi del ciclo di vita non vengono presi in considerazione solo gli effetti ambientali legati alla produzione, ma l'intero processo che porta alla realizzazione di un prodotto, a partire dall'approvvigionamento delle materie prime, passando attraverso l'utilizzo e il consumo, fino alla dismissione e allo smaltimento del prodotto/servizio [18].

L'LCA è un approccio strutturato attorno a un'unità funzionale, ovvero l'unità di riferimento [19]. Questa unità ha lo scopo di definire ciò che viene studiato e tutte le analisi successive sono riferite ad essa. Al termine del processo, l'impronta ambientale di un prodotto/servizio viene descritta da specifiche categorie di impatto che rappresentano i carichi ambientali generati. Un'analisi LCA rigorosa e dettagliata permette di analizzare l'intero ciclo di vita (cradle-to-grave), o parte di esso (cradle-to-laid), andando a studiare tutti gli aspetti relativi a ciascun componente del prodotto. In questo modo si possono individuare le fasi che hanno un elevato impatto sull'ambiente e che necessitano di particolari interventi. In genere un approccio cradle-to-grave può essere considerato completo in quanto, se si considerasse uno scenario troppo ristretto, si potrebbe arrivare a delle conclusioni distorte. L'analisi del ciclo di vita potrebbe essere considerata come una guida per la produzione di nuovi prodotti ad alta sostenibilità o un riferimento per il miglioramento di prodotti esistenti. In particolare uno studio LCA può aiutare a:

- migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti in vari punti del loro ciclo di vita;
- informare gli istituti superiori su eventuali scelte decisionali, in termini economici, industriali e governativi;
- la selezione di opportuni indicatori che determinano le prestazioni ambientali, comprese le tecniche di calcolo e marketing.

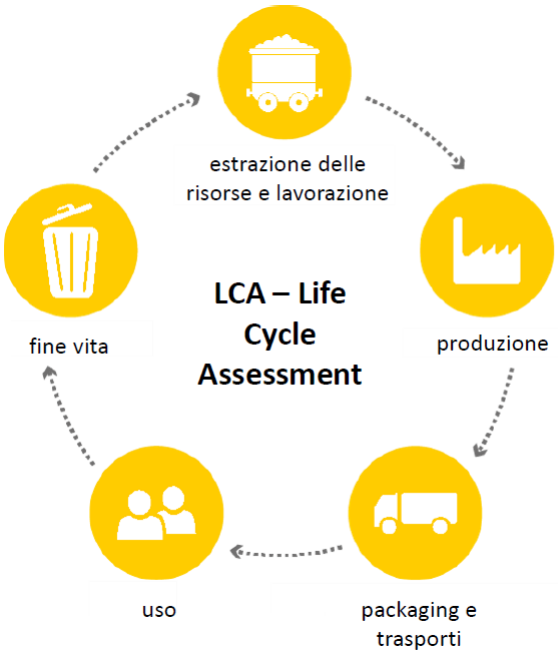


Figura 16: Life Cycle Assessment [18]

Il quadro normativo di riferimento per condurre un'analisi LCA è fornito da ISO 14040, ISO 14044 [19, 20]. Un'analisi del ciclo di vita è generalmente composta da quattro fasi:

- Definizione degli obiettivi e campo di applicazione: vengono esplicitati gli obiettivi dello studio, l'unità funzionale (misura o quantità di prodotto usata come riferimento unitario) e i confini del sistema;
- Inventario (LCI – Life Cycle Inventory): quantificazione degli input e delle relative emissioni, per ogni fase del ciclo di vita. Consiste nella raccolta dei dati per raggiungere gli obiettivi dello studio definito;
- Valutazione degli impatti (LCIA – Life Cycle Impact Assessment): le informazioni ottenute durante la fase d'inventario sono classificate ed aggregate in diverse categorie di impatto;
- Interpretazione dei risultati: rappresenta la fase finale della procedura LCA nella quale i risultati ottenuti dai punti precedenti vengono riassunti, discussi e interpretati al fine di stabilire un processo decisionale in conformità con gli obiettivi fissati in partenza.

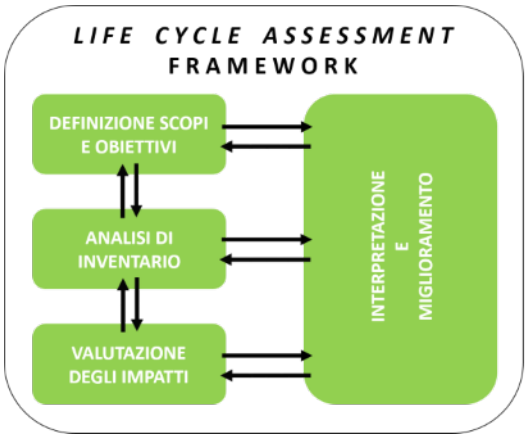


Figura 17: Fasi del metodo LCA [18]

4.2 Fasi di un'analisi LCA

Come già accennato, uno studio LCA viene eseguito secondo la struttura e le richieste fornite dalla normativa ISO 14040-14044. In accordo con queste regolamentazioni lo studio si divide in quattro fasi [18, 19, 20]:

- Definizione degli obiettivi e campo di applicazione
- Analisi dell'inventario (LCI – Life Cycle Inventory)
- Valutazione degli impatti (LCIA – Life Cycle Impact Assessment)
- Interpretazione dei risultati

4.2.1 Definizione degli obiettivi e campo di applicazione

La definizione del campo di applicazione e degli obiettivi da perseguire in un'analisi LCA è la prima fase del processo e risulta essere la più delicata. In questa fase viene fissato il contesto dello studio e vengono definite le richieste per le fasi successive, in particolare si fissa il livello di dettaglio dello studio, la qualità dei dati richiesta e la selezione dei parametri per la stima degli impatti ambientali. Durante la fase di definizione dell'obiettivo si dovrebbero sottolineare i fini specifici per la quale è realizzata l'analisi, le figure a cui è indirizzata l'indagine, in che contesto può essere citata un'analisi LCA e su che fronte potrebbe essere collocata (tecnologico, economico, sociale).

I confini del sistema sono definiti in accordo con quello che è l'obiettivo dell'analisi. Occorre determinare tutti gli aspetti temporali, spaziali, tecnici e pratici inerenti allo studio e stabilire quali procedure sono incluse o escluse dall'indagine.

La definizione di un'unità funzionale (ad esempio 1 tonnellata di prodotto) è di fondamentale importanza, essa è l'unità di riferimento per tutti i flussi

in entrata e in uscita rispetto al sistema definito e per la determinazione dei potenziali effetti ambientali. Secondo quanto riportato nella ISO 14040, è possibile comparare differenti prodotti e procedure a patto che l'unità funzionale sia equivalente (le proprietà e funzioni dei prodotti devono essere simili).

4.2.2 Analisi dell'inventario (LCI - Life Cycle Inventory)

L'analisi dell'inventario coinvolge una raccolta di dati e di procedure di calcolo per quantificare gli input e gli output rilevanti di un sistema di prodotto. Il processo di costruzione di un'analisi dell'inventario è iterativo, in un primo momento i dati vengono aggregati e modellati così da avere un quadro generale del processo. Man mano che i dati vengono raccolti e si ha una visione più ampia del sistema, possono essere identificati nuovi requisiti che richiedono un cambiamento nelle procedure di raccolta dei dati. A volte, possono essere identificati problemi che necessitano di una revisione della fase precedente, ovvero della definizione dell'obiettivo o dell'ambito dello studio. I dati raccolti per ciascun processo parziale in relazione ai confini del sistema prevedono:

- input energetici, input su materie prime, input ausiliari;
- prodotti, co-prodotti e rifiuti;
- emissioni nell'aria, in acqua e nel suolo;
- altri aspetti ambientali.

La raccolta e l'aggregazione dei dati in molti casi risulta essere una procedura che richiede molte risorse, qualora dovessero presentarsi dei vincoli o delle restrizioni occorre esplicitarlo nella documentazione finale. Dopo aver tracciato un profilo completo sui dati in termini di massa e di energia essi vengono registrati quantitativamente.

4.2.3 Vautazione degli impatti (LCIA - Life Cycle Impact Assessment)

L'obiettivo in questa fase dell'LCA è legato alla valutazione dei flussi di materiale e di energia calcolati durante l'analisi di inventario. In generale, questo processo implica l'associazione dei dati di inventario con specifiche categorie di impatto e indicatori ambientali, cercando in tal modo di comprendere e quantificare questi parametri. In un'analisi LCA le categorie di impatto comunemente utilizzate sono:

- Riscaldamento globale (GWP);
- Riduzione dell'ozono presente nella stratosfera (ODP);
- Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera (POCP);
- Eutrofizzazione (NP);

- Acidificazione (AP);
- Tossicità per l'uomo (HTP);
- Eco-tossicità (ETP);
- Uso del territorio.

Nella fase di valutazione dell'impatto è incluso il processo di revisione dell'obiettivo e dell'ambito per determinare se gli obiettivi stabiliti nella fase iniziale sono stati raggiunti o modificare entrambi gli aspetti se la valutazione indica che non possono essere soddisfatti. Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente e possono differire in relazione alla loro collocazione spaziale (locali, regionali, globali).

Dopo essere state definite e classificate, le categorie di impatto devono essere quantificate. In genere vengono utilizzati dei fattori di equivalenza, i contributi di ogni materiale vengono aggregati in un determinato impatto ambientale e vengono rapportati ad una sostanza di riferimento. I flussi ottenuti dall'inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza e sommati tra loro, in questo modo si ottiene un indicatore specifico che rappresenta un potenziale danno ambientale. E' opportuno sottolineare che diversi indicatori ambientali non possono essere confrontati tra di loro.

4.2.4 Interpretazione dei risultati

L'obiettivo della fase finale dell'LCA è l'analisi dei risultati ottenuti considerando i dati di inventario e dalla valutazione degli impatti. Questa fase dovrebbe fornire risultati coerenti e conformi con l'obiettivo e il campo di applicazione definiti inizialmente, in modo da trarre delle conclusioni spiegandone i limiti e fornendo raccomandazioni. Quest'ultima fase ha anche lo scopo di fornire una presentazione chiara e di facile comprensione, coerente con i risultati e in conformità con l'obiettivo e la definizione dell'ambito dello studio. Infine, la fase di interpretazione può comportare un processo iterativo di revisione della prima fase dell'LCA.

Solitamente alla fine del processo è richiesta una revisione critica da parte di gruppi di esperti o da parti interessate così da migliorare la comprensione e la credibilità dell'analisi. La revisione critica da parte di esperti interni o esterni richiede figure che abbiano competenze scientifico-tecniche e una certa familiarità con la metodologia LCA; d'altro canto possono essere coinvolti gruppi di parti interessate come agenzie governative, gruppi non governativi, concorrenti e industrie interessate.

4.3 LCA di pavimentazioni stradali - Letteratura e revisione critica

Le aree di applicazione della metodologia LCA ricoprono uno scenario molto vasto e non esiste una soluzione univoca su come applicarla al massimo delle

sue potenzialità nel contesto del processo decisionale. L'applicazione deve essere contestualizzata caso per caso a seconda delle dimensioni e delle risorse dell'organizzazione, dei suoi prodotti, dei sistemi interni, degli strumenti e delle procedure. Negli ultimi anni l'approccio di valutazione del ciclo di vita ha guadagnato terreno nei confronti delle infrastrutture e delle pavimentazioni stradali per quantificare gli impatti ambientali e le sostanze che influiscono negativamente sulla salute dell'uomo. I primi studi LCA di pavimentazioni stradali risalgono alla seconda metà degli anni 90 [22, 25, 26, 27], successivamente si sono sviluppati ulteriori studi che ricoprono, nella maggior parte delle situazioni, solo una parte dell'analisi del ciclo di vita a tal punto da essere considerati LCA parziali.

Definire tutto ciò che costituisce un LCA di pavimentazione non è così semplice come potrebbe sembrare, idealmente uno studio LCA dovrebbe esaminare nel dettaglio ciascuna delle fasi del ciclo di vita del prodotto. Tuttavia, considerati i vincoli temporali, la carenza di dati diretti e di conoscenze, rendono questo processo difficile per la maggior parte dei prodotti, soprattutto per le pavimentazioni stradali. La complessità di una infrastruttura nella sua totalità potrebbe essere considerata come un vero e proprio settore industriale. Una pavimentazione stradale è composta da una molteplicità di componenti, dai materiali impiegati per la costruzione alle apparecchiature periferiche come illuminazione, semafori, dispositivi di sicurezza, segnaletica stradale, ponti, gallerie, ecc.

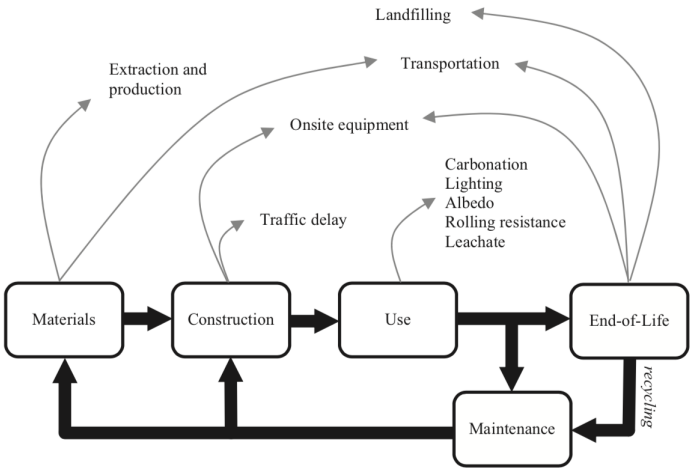


Figura 18: Fasi e componenti del ciclo di vita di una pavimentazione [21]

La maggior parte degli studi LCA di pavimentazioni stradali considerano la fase di costruzione, l'esercizio e la manutenzione da un punto di vista ambientale e dei costi, spesso però viene trascurato il contributo dei veicoli che utilizzano l'infrastruttura e i consumi energetici dovuti agli impianti di illuminazione, dei semafori, ecc. Questo aspetto viene discusso ampiamente nella revisione critica di Nicholas J. Santero [21] in merito alla letteratura esistente che seppure stabilisce un quadro di riferimento per la quantificazione degli impatti ambientali,

spesso non raggiunge conclusioni in termini globali riguardo le scelte dei materiali, le strategie di manutenzione e altre politiche per il raggiungimento degli obbiettivi di sostenibilità. Secondo Santero per arrivare a definire in termini globali tutti i parametri ambientali e colmare le carenze presenti in letteratura si dovrebbero standardizzare le unità funzionali (per quanto possibile) in modo che le valutazioni future possano essere comparabili, ampliare i confini del sistema, la qualità dei dati ed estendere gli scenari di studio. Le unità funzionali utilizzate nei diversi studi in molti casi risultano essere divergenti a tal punto da rendere impossibile un confronto; anche se i confini del sistema sono identici i risultati di due studi LCA potrebbero essere totalmente differenti se l'unità funzionale non è coerente. I parametri che hanno dimostrato la maggiore influenza sono:

- la variabilità spaziale: studi effettuati in regioni diverse avranno consumi energetici differenti, fonti di energia di varia natura, metodi di produzione specifici;
- struttura della pavimentazione: tipologia di sezione, caratteristiche geometriche, proprietà dei materiali;
- condizioni ambientali;
- caratteristiche del traffico;
- vita utile della pavimentazione e altri dettagli progettuali.

Queste problematiche legate alla definizione di un'unità funzionale rappresentativa dimostrano la complessità delle pavimentazioni stradali nella loro totalità.

La seconda considerazione fatta da Santero [21] è sulla comparabilità dei confini del sistema. Per quanto semplice possa essere il concetto di un'analisi del ciclo di vita nel suo insieme, spesso risulta complicato modellare e analizzare in modo accurato ogni fase del ciclo in quanto la mancanza di comprensione del sistema in esame e la difficoltà di ottenere dati rilevanti è molto elevata. Questi ostacoli hanno portato gli analisti di LCA a concentrare i propri studi tipicamente sulle fasi di estrazione, produzione, traporto e posa in opera dei materiali.

Author (year)	Materials phase		Construction phase		Use phase					Maintenance phase		End-of-life phase		
	Materials extraction and production	Transportation (raw materials)	Onsite equipment (construction)	Traffic delay	Carbonation	Lighting	Albedo	Rolling resistance	Leachate	Materials phase (maintenance)	Construction phase (maintenance)	Onsite equipment (end-of-life)	Transportation (end-of-life)	Materials production (recycling)
Häkkinen and Mäkelä (1996)	•	•	•	•	•	•				•	•			
Horvath and Hendrickson (1998)	•													
Roudebush (1999)	•		•							•	•			
Berthiaume and Bouchard (1999)	•									•				
Mroueh et al. (2000)	•	•	•						•	•	•			
Stripple (2001)	•	•	•							•	•			
Nisbet et al. (2001)	•	•	•							•	•			
Park et al. (2003)	•		•							•	•	•	•	
Treloar et al. (2004)	•									•				
Zapata and Gambatese (2005)	•		•											
Athena (2006)	•	•	•							•	•			
Chan (2007)	•	•	•	•										
Muga et al. (2009)	•	•	•							•	•			
Huang et al. (2009)	•	•	•	•										
White et al. (2010)	•	•												

Figura 19: Letteratura e fasi che caratterizzano il ciclo di vita di una pavimentazione [21]

La tabella precedente [21] mostra come la maggior parte degli studi LCA presenti in letteratura si sia concentrata solo sulle fasi di utilizzo dei materiali, costruzione iniziale e manutenzione. La fase di utilizzo di una pavimentazione include fattori potenzialmente influenti come il consumo di carburante attribuito alla rugosità e alla struttura della pavimentazione, la carbonatazione del calcestruzzo, l'effetto isola di calore urbano che si ha spostandosi dalle zone rurali ai centri urbani, la forzatura radiativa e la presenza di percolato. Solo alcuni studi hanno ampliato il campo di applicazione e valutato gli impatti ambientali considerando ad esempio i ritardi del traffico [23], illuminazione e carbonatazione [22]. L'autore stabilisce che l'omissione di queste elementi può essere determinante nella valutazione dell'impatto ambientale complessivo modificando le conclusioni di uno studio specifico. L'accuratezza di una LCA dipende dall'affidabilità dei dati di input, dalla disponibilità e dalla loro qualità. Un buon compromesso può essere raggiunto raccogliendo i dati in maniera individuale (anche se a livello pratico può risultare oneroso) o basandosi su delle fonti tecnicamente definite "migliori".

L'ultimo punto discusso riguarda la valutazione ambientale che solitamente è associata a parametri differenti. Attualmente gli indicatori più utilizzati per la valutazione di una pavimentazione sono il consumo energetico (GER), l'effetto dovuto ai gas serra (GWP) e altri inquinanti atmosferici convenzionali come SO_2, CO, NO_x. Santero dimostra che solo pochi studi si concentrano ad utilizzare indicatori non convenzionali che non siano associati ai consumi energetici e alle emissioni atmosferiche, come ad esempio i rilasci di azoto nell'acqua, generazione di rifiuti pericolosi, rilasci di metalli pesanti e altri indicatori. Mentre, il consumo di acqua, l'uso del suolo, i rilasci tossici e altri indicatori sono praticamente inesistenti nella letteratura LCA delle pavimentazioni.

Author (year)	Process energy	Feedstock energy	Greenhouse gases	NO_X	SO_X	CO	VOC	Particulate matter	Lead	Other
Häkkinen and Mäkelä (1996)	•	•	•	•	•	•	•	•		Heavy metals, waste generation, water releases, "ecoscarcity" weighting system
Horvath and Hendrickson (1998)	•			•	•		•			Toxic releases, ozone depletion, waste generation, suspended solids
Roudebush (1999)	•[a]									
Berthiaume and Bouchard (1999)	•[b]									
Mroueh et al. (2000)	•		•	•	•	•	•	•		Heavy metals, waste generation, resource demand, land use, noise, "expert" weighting system
Stripple (2001)	•	•	•	•	•					
Nisbet et al. (2001)	•	•	•	•	•	•	•	•		Total material demand
Park et al. (2003)	•		•	•	•					
Treloar et al. (2004)	•									
Zapata and Gambatese (2005)	•									
Athena (2006)	•	•	•							
Chan (2007)	•		•	•	•	•	•	•	•	Monetized pollution damages
Muga et al. (2009)	•		•	•	•	•	•			
Huang et al. (2009)	•		•	•		•	•			
White et al. (2010)			•							

Figura 20: Indicatori ambientali considerati in LCA di pavimentazioni [21]

La critica proposta dall'autore nei confronti della letteratura ha un carattere costruttivo e non intende etichettare l'LCA come una tecnica carente, ma si presenta come un modo per incentivare gli analisti a sviluppare una sinergia

di informazioni interconnesse e correlate ad un processo complicato come le infrastrutture.

4.4 Applicativo PaLATE

PaLATE è uno strumento open source implementato in Microsoft Excel e sviluppato dall'Università della California a Berkely (Consortium of Green Design and Manufacturing, University of California, Berkeley), esso permette di effettuare una valutazione del ciclo di vita (LCA) degli effetti ambientali ed economici (LCCA) di una pavimentazione stradale (Pavement Life-Cycle Tool for Environmental and Economic Effects) [24].

Lo strumento effettua una valutazione del ciclo di vita attraverso informazioni di carattere ingegneristico, ambientale ed economico per valutare l'utilizzo di materiali vergini e riciclati nella fase di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni. PaLATE lavora sugli input forniti dall'utente e determina un quadro di valutazione in termini ambientali e di costi attraverso la restituzione di determinati output. La semplice impostazione dello strumento conferisce una trasparenza nei calcoli e la possibilità di adattare i fogli di calcolo a casi specifici. PaLATE dispone di valori predefiniti per la maggior parte delle variabili del modello, ma lascia all'utente la possibilità di aggiungere e modificare i valori di default in base alle proprie esigenze (densità dei materiali, costi, fattori di emissione, attrezzatura). Le informazioni iniziali (input) che devono essere fornite dall'utente e aggregate nei diversi fogli di calcolo sono:

- Design generale della strada, lunghezza, larghezza e spessori degli strati;
- Materiali utilizzati nella fase di costruzione iniziale, volumi, distanze di trasporto e relativa modalità;
- Materiali utilizzati nella fase di manutenzione, volumi, distanze di trasporto e relative modalità;
- Attrezzatura utilizzata in fase di costruzione e manutenzione;
- Costi economici, periodo di analisi, tasso di sconto.

Mentre gli output restituiti da PaLATE sono:

- Valutazione economica;
- Valutazione ambientale.

4.4.1 Struttura di PaLATE

PaLATE si basa su un approccio LCA per modellare gli effetti ambientali della costruzione iniziale e della manutenzione della strada. L'applicativo è composto da diversi fogli di calcolo nei quali occorre inserire i valori di riferimento del caso studio. L'analisi è suddivisa in diverse fasi, per ogni processo vi è un foglio di

calcolo che integra tutte le informazioni necessarie alla valutazione ambientale ed economica della pavimentazione in esame.

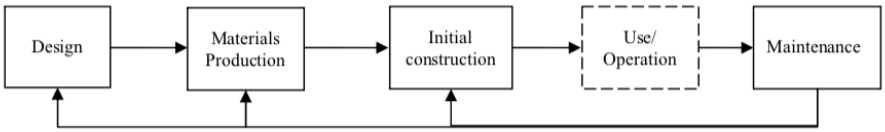
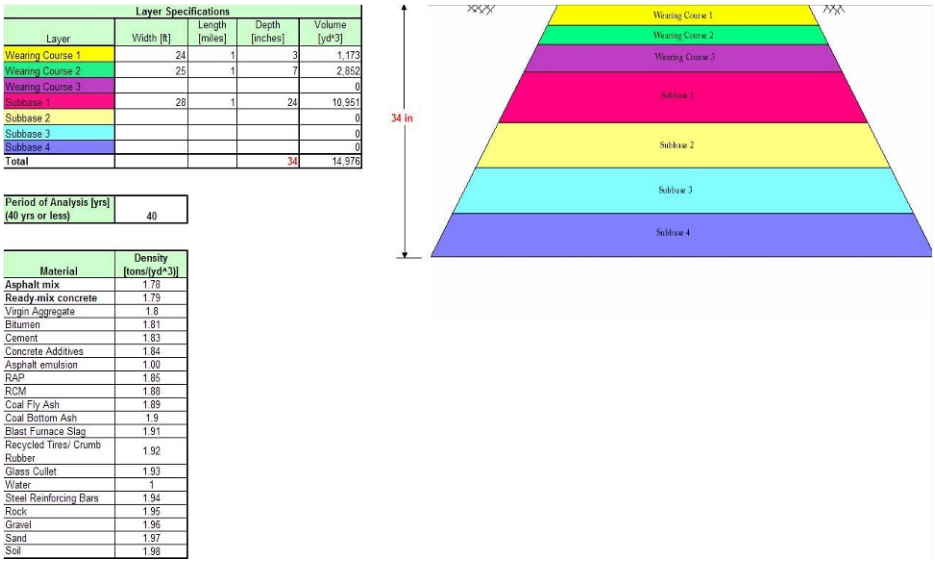


Figura 21: Fasi del ciclo di vita di una pavimentazione [24]

4.4.2 Design

La prima fase considerata da PaLATE è quella di progettazione dove l'utente definisce le caratteristiche geometriche della pavimentazione (larghezza, lunghezza, spessore degli strati), la densità dei materiali utilizzati e il periodo di analisi. Il periodo di analisi è utilizzato per indicare il numero di anni in cui verrà eseguita la manutenzione e per l'attualizzazione come parte della valutazione economica. Attraverso il volume e la densità di ciascun materiale viene calcolata la quantità di massa necessaria per la realizzazione del singolo strato. Il software permette anche di includere i volumi di materiale necessari alla realizzazione delle scarpate.



Layer Specifications

Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Wearing Course 1	24	1	3	1,173
Wearing Course 2	25	1	7	2,852
Wearing Course 3				0
Subbase 1	28	1	24	10,951
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			34	14,976

Period of Analysis [yrs] (40 yrs or less)	40

Material	Density [tons/(yd^3)]
Asphalt mix	1.78
Ready-mix concrete	1.79
Virgin Aggregate	1.8
Bitumen	1.81
Cement	1.83
Concrete Additives	1.84
Asphalt emulsion	1.00
RAP	1.85
RCM	1.88
Coal Fly Ash	1.89
Coal Bottom Ash	1.9
Blast Furnace Slag	1.91
Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92
Glass Cullet	1.93
Water	1
Steel Reinforcing Bars	1.94
Rock	1.95
Gravel	1.96
Sand	1.97
Soil	1.98

Figura 22: Struttura del modulo Design

La struttura è codificata attraverso l'utilizzo di colori per guidare l'utente durante l'analisi.

4.4.3 Costruzione iniziale

Il secondo modulo comprende l'inserimento di tutte le informazioni necessarie alla fase di costruzione iniziale. Per ogni strato considerato occorre andare ad inserire il volume richiesto per ogni singolo materiale che compone lo strato stesso. L'utente in base alla tipologia di pavimentazione considerata (flessibile o rigida) dovrà inserire i dati volumetrici che saranno collegati alle relative densità dei singoli materiali, la distanza di trasporto del materiale e la modalità di trasporto.

La distanza di trasporto considerata è unidirezionale, ovvero viene considerata la distanza dal produttore o fornitore del materiale fino all'impianto di produzione, mentre il "totale" indica il trasporto della miscela considerata dall'impianto di produzione al cantiere. Se vengono utilizzate più modalità di trasporto, viene selezionata quella predominante. Oltre ai classici materiali che compongono gli strati legati con bitume è possibile considerare eventuali materiali di riciclo (RAP, RCA, polveri volanti, ecc..) o inserire particolari materiali utilizzati andando a modificare i relativi riferimenti all'interno del file.

		Material	Density [tons/(yd^3)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	0	0		0	dump truck
		Bitumen	0,84	0			0	tanker truck
		Cement	1,27		0		0	barge
		Concrete Additives	0,84		0		0	tanker truck
		RAP	1,85	0	0		0	dump truck
		FRAP	1,85	0	0		0	dump truck
		RAS	1,12	0	0		0	dump truck
		RCA	1,88	0	0		0	dump truck
		Coal Fly Ash	2,20	0	0		0	cement truck
		Coal Bottom Ash	2,00	0	0		0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1,72	0	0		0	dump truck
		Foundry Sand	1,50	0	0		0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0		0	dump truck
		Glass Cullet	1,93	0	0		0	dump truck
		Water	0,84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0,24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**0**			0	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		**0**		0	mixing truck
	Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1,85	0			0	dump truck
		RAS from site to landfill	1,12	0	0		0	dump truck
		RCM from site to landfill	1,88		0		0	dump truck

Tabella 1: Esempio di costruzione iniziale dello strato di usura

Per gli strati di fondazione e sottofondo il discorso è analogo a quanto detto precedentemente, qualora nell'analisi si debba tener conto anche dei volumi per la realizzazione delle scarpate laterali è necessario compilare la sezione apposita presente in fondo al foglio (Embankment and Shoulder).

		Material	Density [tons/(yd^3)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Subbase 1	Materials	RAP to recycling plant	1,85			0	0	dump truck
		RAP from recycling plant to site	1,85			0	0	dump truck
		RAS to recycling plant	1,12			0	0	dump truck
		RAS from recycling plant to site	1,12			0	0	dump truck
		RCM to recycling plant	1,88			0	0	dump truck
		RCM from recycling plant to site	1,88			0	0	dump truck
		Cement	1,27			0	0	dump truck
		Coal Fly Ash	2,20			0	0	cement truck
		Coal Bottom Ash	2,00			0	0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1,72			0	0	dump truck
		Foundry Sand	1,50			0	0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92			0	0	dump truck
		Glass Cullet	1,93			0	0	dump truck
		Rock	2,00			0	0	dump truck
		Gravel	1,35			0	0	dump truck
		Sand	1,25			0	0	dump truck
		Soil	1,63			0	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**0,00**			**0**		
	Waste mat'l sent to landfill	RAP from site to landfill	1,85			0	0	dump truck
		RAS from site to landfill	1,12			0	0	dump truck
		RCM from site to landfill	1,88			0	0	dump truck

Tabella 2: Esempio di costruzione iniziale dello strato di fondazione

4.4.4 Manutenzione

Il foglio relativo alla fase di manutenzione è strutturato in maniera analoga a quello della costruzione iniziale, in questo modulo verrà inserito il totale relativo ai materiali utilizzati nelle fasi di manutenzione previste durante la vita utile della pavimentazione, i materiali utilizzati sono gli stessi presenti nella fase di costruzione iniziale. Per gli strati legati con bitume, a seconda della tipologia di pavimentazione considerata, vi sono dei processi di manutenzione che possono essere scelti. Per ogni processo occorre andare ad inserire il volume di materiale totale previsto per le future procedure di riabilitazione della pavimentazione.

		Material	Density [tons/(yd^3)]	Lifetime Asphalt Repaving	Lifetime Concrete Repaving	Lifetime Subbase Reconstruction	Lifetime Embankment Reconstruction	Transportation	
				Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	0	0			0	dump truck
		Bitumen	0,84	0				0	tanker truck
		Cement	1,27		0			0	cement truck
		Concrete Additives	0,84		0			0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0,84	0				0	tanker truck
		RAP	1,85	0	0			0	dump truck
		FRAP	1,85	0	0			0	dump truck
		RAS	1,12	0	0			0	dump truck
		RCA	1,88	0	0			0	dump truck
		Coal Fly Ash	2,20	0	0			0	tanker truck
		Coal Bottom Ash	2,00	0	0			0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1,72	0	0			0	dump truck
		Foundry Sand	1,50	0	0			0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0			0	dump truck
		Glass Cullet	1,93	0	0			0	dump truck
		Water	0,84		0				
		Steel Reinforcing Bars	0,24		0			0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	1,23	**0**				0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2,03		**0**			0	mixing truck
	Processes	HIPR	1,83	0					
		CIR	1,83	0					
		Patching	1,23	0	0				
		Microsurfacing	1,23	0	0				
		Crack Sealing	0,84	0	0				
		Whitetopping	2,03		0				
		Rubblization	1,95		0				
		Full-depth Reclamation	1,83	0	0				
	Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1,85	0				0	dump truck
		RAS from site to landfill	1,12	0				0	dump truck
		RCM from site to landfill	1,88		0			0	dump truck

Tabella 3: Esempio di manutenzione dello strato di usura

I processi di manutenzione considerati da PaLATE per gli strati in conglomerato bituminoso sono:

- HIPR (Hot in-Place Recycling): tecnica di riciclaggio a caldo utilizzata prevalentemente per la riparazione di strati d'usura, binder e base che sono stati danneggiati nel tempo e prevede il riutilizzo del conglomerato bituminoso (fresato). La miscela bituminosa è composta da aggregati di primo impiego riscaldati ad una temperatura di 150 gradi, fresato (in proporzioni variabili), bitume d'aggiunta ed eventuali attivanti chimici funzionali. Le temperature di utilizzo sono simili a quelle utilizzate nella produzione del conglomerato bituminoso tradizionale. Può essere prodotto presso stabilimento o direttamente in sito [28, 29];

- CIR (Cold in-Place Recycling): tecnica di riciclaggio a freddo nella quale gli aggregati non vengono preriscaldati. La miscela è composta da aggregati lapidei di primo impiego, acqua e fresato di recupero miscelato a freddo con legante (cemento, emulsione, bitume schiumato) [30]. Tecnica differente dal riciclaggio a caldo in quanto permette di ridurre i consumi energetici dovuti al riscaldamento;

- Patching: tecnica utilizzata nel caso di dissesti stradali localizzati per ripristinare la continuità del manto stradale. Possono essere utilizzati conglomerati bituminosi a caldo e a freddo;

- Micro surfacing: trattamento che vede l'applicazione di una miscela composta principalmente da acqua, emulsione d'asfalto (in alcuni casi con aggiunta di polimero), aggregato (roccia frantumata molto piccola) e additivi [31]. Questa tecnica ha lo scopo di impermeabilizzare la sovrastruttura e fornire una nuova superficie di guida;

- Crack sealing: è una procedura che prevede la sigillatura delle crepe che sullo strato di usura attraverso l'utilizzo di un materiale sigillante bituminoso gommato/polimerico a caldo. Lo scopo principale è quello di evitare fenomeni di infiltrazione nella pavimentazione, è anche utilizzato per sigillare le fessurazioni prima di un rivestimento in asfalto al fine di prevenire le crepe riflesse;

- Whitetopping: processo nel quale una pavimentazione esistente in conglomerato bituminoso viene coperta con uno strato di cemento Portland. La tipologia di whitetopping varia a seconda dello spessore, questa tecnica di consiste nell'incollare il rivestimento in calcestruzzo all'asfalto esistente in modo da garantire un'azione composita tra asfalto e calcestruzzo;

- Rubblization: processo di frattura di una pavimentazione esistente in cemento Portland in piccoli pezzi interconnessi che servono come base per una nuova copertura in asfalto a caldo (HMA). E' un metodo economico in quanto non ci sono costi di trasporto o di smaltimento e tutti i materiali della pavimentazione esistente rimangono sul posto. Questo processo permette di trasformare una pavimentazione rigida deteriorata in una nuova pavimentazione flessibile senza crepe riflesse [32];

- Full-depth reclamation: è una tecnica di riciclaggio utilizzata per la ricostruzione delle pavimentazioni flessibili esistenti, sfruttando il materiale della sezione della pavimentazione esistente come base per la nuova superficie di usura della strada [33]. Questo processo può includere l'aggiunta di sostanze chimiche allo strato di base per migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Per gli strati di fondazione e sottofondo non sono presenti interventi di manutenzione, l'unico processo che viene considerato è il full-depth reclamation.

4.4.5 Attrezzature

Nel foglio "Equipment" viene fornito un elenco di attrezzature predefinite da utilizzare nella attività di costruzione e di manutenzione. Per ogni attività tipo sono presenti una serie di apparecchiature riportandone modello, potenza, produttività, consumo di carburante e tipologia di carburante. Qualora l'attività considerata richiede l'utilizzo di un mezzo che non è presente di default in PaLATE, è possibile selezionare dal menu a tendina la voce "altro" e inserire i dati corrispondenti nel foglio "Equipment Details".

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Ingersol rand DD110	800 hp	1,713 tons/h	150.00 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	Wirtgen WR 2500 S	670 hp	4,800 tons/h	120.0 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1,832 tons/h	37.6 l/h	diesel
Hot In Place Recycling	Heating machine	Wirtgen HM4500	49 hp	256 tons/h	9.1 l/h	diesel
	Asphalt remixer	Wirtgen 4500	295 hp	208 tons/h	55.0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Rubblization	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1,832 tons/h	37.6 l/h	diesel
Milling	Milling machine	Wirtgen W1900/60	400 hp	300 tons/h	87.4 l/h	diesel
Concrete Demolition	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 624E	135 hp	360 tons/h	35.3 l/h	diesel
Crushing Plant	Excavator	John Deere 690E	131 hp	225 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 624E	135 hp	225 tons/h	35.3 l/h	diesel
	Dozer	Caterpillar D8N	285 hp	225 tons/h	71.4 l/h	diesel
	Generator	John Deere 624E	519 hp	225 tons/h	98.4 l/h	diesel
Excavation, placing and compaction	Excavator	John Deere 690E	131 hp	315 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Ingersoll-Rand SD100D	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Tire Recycling	Shredder + Granulator + Classifier + Aspirator System	Wendt Corporation	630 hp	3.00 tons/h	104.73 kWh/ton	electric
Glass Recycling	Hopper + Conveyor + Shredder System	Andela GP-05 Pulverizer	10 hp	1.00 tons/h	7.46 kWh/ton	electric
HMA Production	asphalt mixer	Uncontrolled Batch-mix		226.80 tons/h		oil

Tabella 4: Elenco e dettagli delle attrezzature

4.4.6 Costi "$"

L'analisi dei costi in PaLATE può essere effettuata per due scenari diversi caratterizzati da due tassi di sconto differenti ma con lo stesso periodo di analisi (Scenario Base e Scenario Aalternativo). L'obiettivo dell'analisi economica (output) è quello di determinare delle voci di costo collegate ai processi di realizzazione dell'infrastruttura:

- analisi quantitativa dei costi totali della pavimentazione per la fase di costruzione iniziale, manutenzione e costi totali:
- analisi dei costi per le diverse fasi (costruzione iniziale, totale) su base annua;
- analisi dei costi suddivisa per i diversi materiali (aggregati, bitume, ecc..);
- analisi dei costi su base annua suddivisa per i diversi materiali.

I dati di input necessari allo sviluppo del calcolo sono i seguenti:

- Volumi derivanti dalla fase di Costruzione Iniziale [yd^3];
- Periodo di analisi "n"[years];
- Tasso di sconto "i"[%];
- Fattore URCF (fattore di recupero del capitale di una serie di pagamenti uguali):

$$URCF = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{2}$$

- Costi per la posa di strati in conglomerato bituminoso in [$/$yd^3$](media tra strato di usura, binder, base comprensivi di manodopera, materiale, attrezzature e spese generali);
- Costi per la posa di strato di fondazione e riempimento in [$/$yd^3$] (media tra strato di fondazione e riempimento comprensivi di manodopera, materiale, attrezzature e spese generali);
- Costi per fasi di manutenzione [$/$yd^3$];
- Costi dei singoli materiali utilizzati in [$/$yd^3$](aggregati, bitume, cemento...);
- Costi manodopera, attrezzature utilizzate, spese generali.

Nel foglio "Cost Data" sono presenti delle voci di costo di default proposte da PaLATE che possono essere aggiornate a seconda dei casi, esse fanno riferimento ai costi unitari dei materiali utilizzati e ai costi di ogni singolo processo adottato per la realizzazione dei diversi strati che componogno la pavimentazione in esame.

Summary Table		
Material	**Expected Cost**	**Reference(s)**
Asphalt mix	$28,66 /ton	Wilburn 1998
Ready-mix concrete		
Virgin Aggregate	$9,33 /ton	Butalia 2003
Bitumen		
Cement	$100,00 /ton	Malhotra 1993
Concrete Additives		
Asphalt Emulsion		
RAP	$5,23 /ton	Wilburn 1998
RCM	$9,50 /ton	USGS 2000, Nash 2003
Coal Fly Ash	$90,00 /ton	Malhotra 1993
Coal Bottom Ash		
Blast Furnace Slag		
Recycled Tires/ Crumb Rubber		
Glass Cullet		
Water		
Steel Reinforcing Bars		
Rock	$1,82 /ton	Butalia 2003
Gravel	$5,99 /ton	Butalia 2003, Wilburn 1998
Sand	$4,26 /ton	Butalia 2003
Soil	$5,74 /ton	Butalia 2003

Tabella 5: Tabella costi materiali

Processes	Expected Cost	Reference(s)
HIPR	$3,09/m^2	Button 1995
CIR	$7,06 /yd^2	Murphy 2003, Forsberg 2002
Patching		
Microsurfacing	$1,25 /yd^2	Stidger 2002
Crack Sealing	$3,60 /Kg	FHWA, U.S. DOT 1999b
Whitetopping		
Rubblization	$20 /yd^2	Asphalt Pavement Alliance 200
Full-depth Reclamation		
Installed Asphalt Paving Cost		
Installed Concrete Paving Cost	$31 /yd^2	Asphalt Pavement Alliance 200
Installed Subbase & Embankment Construction Cost		

Tabella 6: Tabella costi processi

Tabella verde - Scenario base

In questa tabella vengono calcolati i costi per le fase di Costruzione Iniziale e Manutenzione. Nella fase di costruzione iniziale, a seconda del tipo di pavimentazione (rigida o flessibile), vengono calcolati i costi per la posa degli strati in CB e la posa di fondazione/riempimento. Il calcolo viene eseguito in base

alla vita utile della pavimentazione e ai volumi stabiliti in fase di costruzione iniziale.

Installed Asphalt Paving Cost

	Installed Asphalt Paving Cost		
	Expected Cost:	0	
	Initial Construction Volume [yd^3]:	0	
	Total Maintenance Volume [yd^3]:	0	
Year	Volume [yd^3]	Unit Cost [$/(yd^3)]	Actual Cost [$]
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0

Tabella 7: Tabella dei costi per strati in CB

Expected Cost: è il costo previsto per la posa degli strati in conglomerato bituminoso [$/yd^3].Tale costo fa riferimento a strato di usura, binder e base. Non avendo la possibilità di impostare singolarmente i diversi strati, si può procedere impostando un costo derivante da una media pesata dei tre strati. La media pesata per gli strati in CB può essere calcolata nel seguente modo:

$$Expected\,Cost\left[\frac{\$}{yd^3}\right] = \frac{C_{usura}[\$]+C_{binder}[\$]+C_{base}[\$]}{Vol.tot.strati[yd^3]} \tag{3}$$

Il costo di ogni singolo strato è calcolato come segue:

$$C_{usura} = V_{usura}\left[yd^3\right] \cdot C_{usura}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \tag{4}$$

$$C_{binder} = V_{binder}\left[yd^3\right] \cdot C_{binder}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \tag{5}$$

$$C_{base} = V_{base}\left[yd^3\right] \cdot C_{base}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \tag{6}$$

Nel caso in esame per definire il costo necessario alla realizzazione dello strato di usura, binder e base è stato reperito dal Prezzario 2020 della Regione Piemonte.

Initial Construction Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma i volumi dei singoli strati in conglomerato bituminoso che derivano dalla fase di costruzione iniziale (usura, binder, base).

Total Maintenance Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma i volumi totali previsti per i singoli strati in conglomerato bituminoso che derivano dalla fase di manutenzione (usura, binder, base).

Per ogni fase della costruzione iniziale e manutenzione, si calcola il costo totale per ogni anno di riferimento. L'anno zero farà riferimento alla costruzione iniziale, mentre gli anni successivi riguardano le operazioni di manutenzione previste in termini di volume. PaLATE valuta il costo ad ogni anno attraverso l'utilizzo del volume di materiale necessario e il suo prezzo unitario. Ad esempio all'anno zero relativo alla costruzione iniziale, il costo per la realizzazione degli strati in CB è dato da:

$$C_{anno\,0,strati\,CB} = V_{anno\,0}\left[yd^3\right] \cdot C_{unitario}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \tag{7}$$

Se vengono programmati interventi di manutenzione negli anni, una volta inserito il volume necessario, il costo verrà calcolato nello stesso modo (full depth reclamation, ecc..).

Installed Subbase & Embankment Construction Cost

In questa Colonna PaLATE considera volumi e costi per la realizzazione dello strato di fondazione e riempimento. Nello specifico il software fa riferimento ad un valore medio per i due strati [35], qualora non sia coerente lavorare con un unico valore, è possibile considerare separatamente i costi dei due strati.

Installed Subbase & Embankment Construction Cost		
Expected Cost:	0	
Initial Construction Volume [yd^3]:	0	
Total Maintenance Volume [yd^3]:	0	
Volume [yd^3]	**Unit Cost [$/(yd^3)]**	**Actual Cost [$]**
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Tabella 8: Tabella dei costi per strato di fondazione e riempimento

Anche in questo caso il ragionamento è analogo a quanto detto per gli strati in conglomerato bituminoso.

Expected Cost: è il costo necessario per la posa degli strati di fondazione e riempimento [\$/yd^3] in particolare deve essere inserita una media pesata dei costi che tenga conto della realizzazione dei due strati.

Initial Construction Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma i volumi degli strati di fondazione e riempimento (subbase 1, subbase 2, ecc..) che derivano dalla fase di costruzione iniziale.

Total Maintenance Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma i volumi totali previsti per gli strati di fondazione e riempimento che derivano dalla fase di manutenzione.

$$C_{anno\,0,fond+riemp} = V_{anno\,0}\left[yd^3\right] \cdot C_{unitario}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \tag{8}$$

Se vengono programmati interventi di manutenzione negli anni, una volta inserito il volume necessario, il costo verrà calcolato nello stesso modo. Per ogni colonna che si riferisce ad una singola fase vengono calcolati le quantità riportate nella tabella seguente:

Initial Construction Net Present Value	$0,00
Maintenance Net Present Value	$0,00
Annualized Cost: Initial Construction	$0,00/yr
Annualized Cost: Maintenance	$0,00/yr
Annualized Cost: Total	$0,00/yr

Tabella 9: Costi calcolati per ogni fase

Initial Construction Net Present Value [$] (Installed Asphalt Paving Cost): rappresenta il valore attuale netto espresso in unità di denaro della pavimentazione al momento della costruzione, dunque all'anno zero.

Ricordando che il valore attuale netto (VAN) è la differenza tra il valore attuale dei flussi di cassa in entrata e il valore attuale dei flussi di cassa in uscita in un determinato periodo di tempo. Il VAN è un metodo finanziario usato per analizzare la redditività di un investimento o di un progetto previsto [34]. Il VAN è il risultato dei calcoli usati per trovare il valore odierno di un futuro flusso di pagamenti. Tiene conto del valore temporale del denaro (attualizzazione) e può essere usato per confrontare alternative di investimento simili. Un qualsiasi progetto o investimento con un VAN negativo dovrebbe essere evitato.

$$VAN = NPV = \sum \frac{P_t}{(1+i)^n} \tag{9}$$

con Pt valore del flusso di cassa relativo al periodo t (in questo caso all'anno t).

$$VAN_{anno\,0,strati\,CB} = \frac{P_0}{(1+i)^0} = P_0 = Costo_{anno\,0,strati\,CB}\,[\$] \tag{10}$$

Il valore attuale netto al momento della costruzione iniziale è il costo totale per sostenere la costruzione iniziale (valore relativo agli strati in conglomerato bituminoso).

Maintenance Net Present Value [$](Installed Asphalt Paving Cost): rappresenta il valore attuale netto calcolato per la realizzazione delle fasi di manutenzione degli strati in CB, ricordando che i è il tasso di sconto e Pt è

il costo di manutenzione sostenuto all'anno considerato, ed assume la seguente forma:

$$VAN_{man,strati\,CB} = \sum \frac{P_t}{(1+i)^n} \tag{11}$$

Annualized Cost Initial Construction [$/year] (Installed Asphalt Paving Cost): PaLATE calcola il costo su base annuale per la posa degli strati legati con bitume:

$$Ann.Cost.In.Cost._{strati\,CB} \left[\frac{\$}{year}\right] = VAN_{anno\,0,strati\,CB} \cdot UCRF \tag{12}$$

Annualized Cost Maintenance[$/year] (Installed Asphalt Paving Cost): PaLATE calcola il costo della manutenzione prevista per gli strati legati con bitume su base annuale:

$$Ann.Cost.In.Cost._{strati\,CB} \left[\frac{\$}{year}\right] = VAN_{man,anno\,0,strati\,CB} \cdot UCRF \tag{13}$$

Annualized Cost Total[$/year] (Installed Asphalt Paving Cost): rappresenta il valore di costo totale su base annua comprendente costruzione iniziale e manutenzione:

$$Ann.Cost.Tot \left[\frac{\$}{year}\right] = \left(VAN_{anno\,0,strati\,CB} + VAN_{man,strati\,CB}\right)[\$] \cdot UCRF \tag{14}$$

Infine, in fondo alla tabella verde, PaLATE riporta i risultati totali dovuti alla fase di costruzione iniziale e manutenzione in termini totali e su base annua riassumendoli in una tabella:

BASE SCENARIO: NPV	
Initial Constuction	**$0**
Maintenance	**$0**
Total	**$0**
Annualized Costs (Base Scenario)	
Initial Constuction	**$0/yr**
Maintenance	**$0/yr**
Total	**$0/yr**

Tabella 10: Risultati costi tabella verde

Tabella arancione - Scenario Base

Il modus operandi è lo stesso della tabella verde, nello specifico in questo caso la tabella arancione presenta i costi unitari di ogni singolo materiale. Tali costi non considerano però la manodopera, attrezzature e spese generali. Queste voci infatti sono presenti nella parte finale della tabella: Labor, Equipment, Overhead & profit. Anche in questo caso la tabella è suddivisa in colonne, ogni colonna fa riferimento ad ogni singolo materiale che di default è presente in PaLATE. Il costo unitario di ogni materiale è presente nel foglio "Data Cost", "Material" che possono essere aggiornati a seconda del caso studio. A titolo di esempio vengono riportate le formulazioni facendo riferimento alla colonna relativa agli aggregati vergini "Virgin Aggregates":

Expected Cost: costo unitario relativo al singolo materiale [\$/yd^3].

Total Initial Construction Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma la quantità di volume totale del singolo materiale previsto nella realizzazione dei rispettivi strati.

$$Tot.In.Cost.Vol.\left[yd^3\right] = V_{ag,us} + V_{ag,bind} + V_{ag,base} + V_{ag,fond} + V_{ag,riemp} \quad (15)$$

Total Maintenance Volume [yd^3]: PaLATE in questa cella somma la quantità di volume totale del singolo materiale previsto nella realizzazione delle procedure di manutenzione nei diversi anni

$$Tot.Man.Vol.\left[yd^3\right] = V_{ag,us} + V_{ag,bind} + V_{ag,base} + V_{ag,fond} + V_{ag,riemp} \quad (16)$$

Costo aggregati vergini

All'anno zero si avranno le quantità maggiori in termini di metri cubi per ogni materiale in esame, il volume viene moltiplicato per il costo unitario al metro cubo e si ottiene il costo totale del singolo materiale.

$$Costo_{anno\,0,agg}\,[\$] = V_{anno\,0ag}\left[yd^3\right] \cdot Costo\,unit._{ag}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \quad (17)$$

Negli anni successivi il ragionamento è simile per ogni singolo materiale, vengono inseriti i volumi necessari alle operazioni di manutenzione per il generico anno, il costo totale al generico anno è dato dal prodotto tra volume e costo unitario:

$$Costo_{anno\,x,ag}\,[\$] = V_{anno\,xag}\left[yd^3\right] \cdot Costo\,unit._{ag}\left[\frac{\$}{yd^3}\right] \quad (18)$$

In fondo alla tabella per ogni colonna associata al singolo materiale, vengono sintetizzati i risultati come segue:

NPV Base Scenario [\$]	\$0,00
Annualized Cost	\$0,00/yr

Tabella 11: Costi calcolati per ogni materiale

Se ad esempio consideriamo di eseguire un processo di manutenzione degli strati legati con bitume al secondo e al quarto anno la relazione del VAN riferito agli aggregati sarà:

$$VAN_{ag} = Costo_{anno\,0,ag}\,[\$] + \sum \frac{P_t}{(1+i)^n} \tag{19}$$

Mentre il costo totale su base annua riferito alla voce aggregati sarà :

$$Ann.Cost_{agg}\left[\frac{\$}{year}\right] = VAN_{agg} \cdot UCRF \tag{20}$$

La procedura viene seguita per ogni singolo materiale utilizzato nella pavimentazione, nella colonna totale della tabella arancione vengono riportati tutti i costi totali riferiti ad ogni anno (comprese le voci di manodopera, attrezzature e spese generali che devono essere stabilite).

4.4.7 Foglio "$ Results"

Questo foglio restituisce gli output del modello dovuti ai volumi e ai costi considerati nel foglio "$".

Output tabella verde del foglio "$":

- Vi è un primo grafico che riporta i risultati relativi al VAN della pavimentazione considerata, per la fase di "Costruzione Iniziale" e "manutenzione";
- Vi è un secondo grafico nel quale si osservano i costi su base annua che si dovranno sostenere per la realizzazione dell'opera. Anche in questo caso si fa riferimento alla "costruzione Iniziale" e "Manutenzione".

Output tabella arancione del foglio "$"

- Vi è un terzo grafico che riporta i risultati in termini di VAN suddiviso per i singoli materiali e processi di manutenzione;
- Infine un quarto grafico che esamina il costo annuale da sostenere per l'acquisto e l'utilizzo di ogni singolo materiale considerato nella pavimentazione .

4.4.8 Foglio "ENV Results"

Nel foglio "ENV Results" l'applicativo PaLATE raggruppa tutti i fattori di emissione relativi ad ogni processo e definisce gli impatti ambientali. I valori finali vengono sintetizzati nella tabella seguente.

		Energy [MJ]	Water Consumption [kg]	CO_2 [Mg] = GWP	NO_x [kg]	PM_{10} [kg]	SO_x [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential (Cancer)	Human Toxicity Potential (Non-cancer)
Initial Construction	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maintenance	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 12: ENV Results

Gli impatti ambientali considerati nell'analisi sono determinati da tre processi fondamentali per le fase di costruzione iniziale e manutenzione [36]:

- Material Production (MP): vengono determinati tutti i fattori di emissione generati nella fase di produzione dei materiali da costruzione;
- Material Transportation (MT): vengono determinati fattori di emissione relativi al trasporto dei materiali;
- Processes (P - Equipment): vengono determinati i fattori di emissione relativi ai singoli processi destinati alla realizzazione degli strati.

I processi appena definiti vengono analizzati per ogni singolo materiale utilizzato per ogni singolo strato. A titolo di esempio vengono riportate le formulazioni teoriche di "Material Production", "Material Transportation" e "Processes" per ogni fattore di emissione considerato da PaLATE.

GER (Gross Energy Requirement) [MJ]

Il GER è un indicatore ambientale che rappresenta il fabbisogno energetico lordo, ovvero la somma di tutte le risorse energetiche non rinnovabili utilizzate per la produzione di un bene o servizio ed è espresso in unità di energia per unità fisica di prodotto o servizio. Tale indicatore fornisce una misura dell'intensità dell'uso delle risorse non rinnovabili e riflette la quantità di energia non rinnovabile sottratta alla terra per rendere disponibile un determinato prodotto o servizio [37].

$$MP = Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot EMF\left[\frac{MJ}{shton}\right] \tag{21}$$

$$MT = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot Ener.\left[\frac{MJ}{l}\right]}{Cap.[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \tag{22}$$

Nella fase di realizzazione dei diversi strati, PaLATE tiene conto dei diversi mezzi utilizzati e dei relativi consumi per determinare i fattori di emissione. Se ad esempio si fa riferimento allo strato di usura si dovranno considerare i mezzi utilizzati (vibrofinitrice, rullo, ecc..). La formulazione utilizzata da PaLATE per determinare le emissioni è la seguente:

$$P = \left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{h}\right] C\left[\frac{J}{l}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000} \right)_{mezzo} \tag{23}$$

Water Consumption [g]

Nella voce consumo d'acqua vengono considerate le diverse quantità di acqua utilizzate nelle diverse fasi di realizzazione della pavimentazione. Nella fase di trasporto, la voce "Water Consumption" fa riferimento alle operazione di produzione del combustibile in quanto il trasporto di materiale non induce ad un consumo di acqua [36].

$$MP = Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Wat_{cons}\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{24}$$

$$MT = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot Wat_{con}\left[\frac{g}{shton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \cdot \frac{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{C\left[\frac{g}{Mg}\right]} \tag{25}$$

$$P = \left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{h}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]} \right)_{mezzo} \tag{26}$$

GWP (Global Warming Potential) [kg]

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) è un indicatore che permette il confronto degli impatti di riscaldamento globale dei diversi gas serra (CO_2, CH_4, N_2O, ...). In particolare, è una misura di quanta energia le emissioni di 1 tonnellata di un gas serra assorbiranno in un dato periodo di tempo, rispetto alle emissioni di 1 tonnellata di anidride carbonica [38]. Più elevato è il valore del GWP, più un dato gas riscalda la Terra rispetto al CO_2 in quel periodo di tempo. Il periodo di tempo solitamente usato per i GWP è di 100 anni.

$$MP = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{C\left[\frac{g}{kg}\right]} \tag{27}$$

$$MT = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot C\left[\frac{g}{kg}\right]} \tag{28}$$

$$P = \left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{h}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right] \cdot C\left[\frac{g}{g}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000\left[\frac{g}{Mg}\right]} \right)_{mezzo} \tag{29}$$

NO_x

Con la sigla NO_xvengono raggruppati tutti gli ossidi di azoto, tali composti gassosi si formano con l'azoto quando l'aria viene riscaldata a temperature elevate. Ad elevate temperature l'azoto che è presente nell'aria si trasforma in tre composti diversi: protossido di azoto, ossido di azoto e biossido di azoto.

Tali composti vengono principalmene generati dalla combustione presente nelle autovetture, dai camion e da altre fonti di tipo industriale.

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{30}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{Mg{\cdot}km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \tag{31}$$

$$P{=}\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Cap[hp]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{hp{\cdot}h}\right]}{Prod\left[\frac{shton}{h}\right]}\right)_{mezzo} \tag{32}$$

$\mathbf{PM_{10}}$ [g]

Il materiale particolato racchiude l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria ambiente. Il termine PM_{10} identifica le particelle di diametro inferiore o uguale ai 10 µm, tali particelle possono avere lunghi tempi di permanenza in atmosfera e rischiano di essere trasportate a grande distanza dal punto di emissione. Sono caratterizazate da una struttura chimica particolarmente complessa e variabile tali da penetrare nell'albero respiratorio umano e avere effetti negativi sulla salute. Il PM_{10} può essere dovuto sia ad attività naturali che antropiche (combustioni e altro), tra le sorgenti antropiche più rappresentative vi è il traffico veicolare.

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{33}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{Mg{\cdot}km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}+$$

$$+\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{kg}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{kg}{Mg}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}\right)_{carico} \tag{34}$$

$$P{=}\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Cap[hp]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{hp{\cdot}h}\right]}{Prod\left[\frac{shton}{h}\right]}\right)_{mezzo}+$$

$$+\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{kg}{Mg}\right]{\cdot}1000}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}\right)_{scarico} \tag{35}$$

$\mathbf{SO_2}$[g]

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{36}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{Mg{\cdot}km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \tag{37}$$

$$P{=}\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Cap[hp]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{hp{\cdot}h}\right]}{Prod\left[\frac{shton}{h}\right]}\right)_{mezzo} \tag{38}$$

CO [g]

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{39}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{Mg{\cdot}km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \tag{40}$$

$$P{=}\left(\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Cap[hp]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{hp{\cdot}h}\right]}{Prod\left[\frac{shton}{h}\right]}\right)_{mezzo} \tag{41}$$

Hg [g]

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{42}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{km}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{\cdot}\frac{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{C\left[\frac{g}{Mg}\right]} \tag{43}$$

$$P{=}\left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{h}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]}\right)_{mezzo} \tag{44}$$

Pb [g]

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{45}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{km}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{\cdot}\frac{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{C\left[\frac{g}{Mg}\right]} \tag{46}$$

$$P{=}\left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{h}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]}\right)_{mezzo} \tag{47}$$

RCRA (Hazardous Waste Generated) [g]

$$MP{=}Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \tag{48}$$

$$MT{=}\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Di[mi]{\cdot}C\left[\frac{km}{mi}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{km}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{\cdot}\frac{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}{C\left[\frac{g}{Mg}\right]} \tag{49}$$

$$P{=}\left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right]{\cdot}Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]{\cdot}Fuel\left[\frac{l}{h}\right]{\cdot}C\left[\frac{g}{l}\right]{\cdot}C\left[\frac{shton}{Mg}\right]{\cdot}EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]}\right)_{mezzo} \tag{50}$$

HTP (Human Toxicity Potential) [g]

Il potenziale di tossicità umana (HTP) riflette il potenziale danno di un'unità di sostanza chimica rilasciata nell'ambiente e si basa sulla tossicità di un composto e sulla sua dose potenziale. Le emissioni possono essere valutate in termini di agenti cancerogeni (HTP_C) e agenti non cancerogeni (HTP_{NC}).

5 Caso studio - Traforo del Frejus

Nella fase preliminare di progettazione si è partiti da una pavimentazione semirigida classica con adeguata capacità portante. In seguito ai vincoli tecnici che si sono presentati, quali modalità di compattazione dello strato di fondazione e riempimento, presenza di utenze sotterranee e necessità di ridurre il consumo di aggregati vergini, è stato approfondito lo studio su miscele che potessero rispettare tutti questi limiti. Lo studio e lo sviluppo del mix-design di innovative miscele cementizie autocompattanti ed autolivellanti proposte nella tesi di dottorato di Eldho Chooracka l "Mix design and performance assessment of self-compacting cement-bound mixtures for pavement foundation of road tunnels" si presta molto bene all'utilizzo di tali materiali nel caso di pavimentazioni stradali in galleria [9].

E' stato eseguito uno studio preliminare sulla geometria della struttura, sulla caratterizzazione dei materiali, sulle temperature, sui dati di traffico e sulla rete di utenze sotterranee (cavi ad alta tensione) previste dall'amministrazione della galleria durante la fase di progettazione.

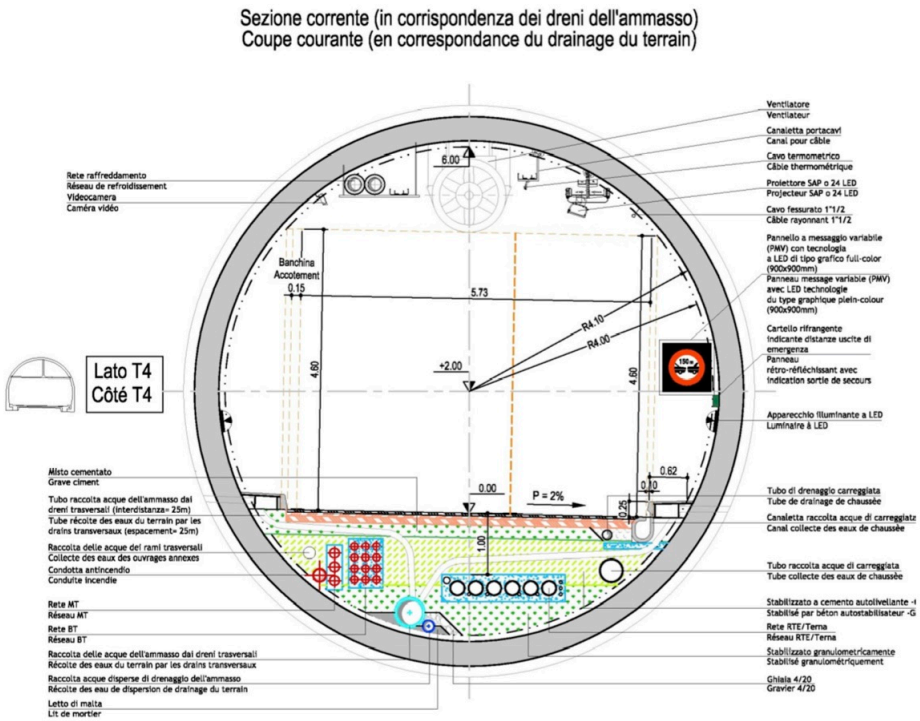


Figura 23: Sezione tipo del traforo del Frejus [3]

La scelta di disporre la linea di servizio all'interno del sottofondo permette

di ottimizzare la sezione e fare un uso efficiente dello spazio disponibile. Questo ha portato all'utilizzo di materiali innovativi per la realizzazione degli strati di fondazione e riempimento, in particolare a miscele cementizie (SC-CBM) capaci di autocompattarsi e autolivellarsi per mezzo del peso proprio, con elevata fluidità, in grado di sviluppare una resistenza a breve termine che possa consentire il passaggio dei mezzi d'opera per la realizzazione degli strati superiori. Un altro fattore vincolante è quello della resistenza a lungo termine che sviluppano queste miscele, non deve essere eccessiva tale da poter consentire rapide manovre di manutenzione e di scavo senza danneggiare le utenze sotterranee [9, 10, 11, 12, 13].

Le miscele sviluppate rispettano in buona parte gli oneri ambientali, esse sono caratterizzate da una significante quantità di materiali riciclati (RAP e sludge, fanghi minerali derivanti dal lavaggio degli aggregati) che garantiscono efficienza in termini prestazionali e di durabilità nel tempo. E' opportuno precisare che i fanghi minerali sono stati preventivamente trattati con il 6% di calce per ridurre il contenuto eccessivo d'acqua. Nel seguente paragrafo sono riportati i calcoli volumetrici dei materiali costituenti le sezioni in esame che rappresentano gli input che richiede PaLATE per eseguire l'analisi LCA. Le soluzioni proposte per la costruzione della pavimentazione stradale della seconda canna del traforo del Fréjus rappresentano tre tipologie differenti, sono di seguito descritte:

Sezione CS

- Strato di usura in conglomerato bituminoso 4 cm
- Strato di collegamento in conglomerato bituminoso 5 cm
- Strato di base in conglomerato bituminoso 10 cm
- Strato di fondazione in misto cementato (CBM) 20 cm
- Riempimento in terreno

Sezione GG

- Strato di usura in conglomerato bituminoso 4 cm
- Strato di collegamento in conglomerato bituminoso 5 cm
- Strato di base in conglomerato bituminoso 10 cm
- Strato di fondazione in malta cementizia autolivellante e autocompattante (SC-CBM-2) 20 cm
- Riempimento in malta cementizia autolivellante e autocompattante (SC-CBM-1)

Sezione CG

- Strato di usura in conglomerato bituminoso 4 cm
- Strato di collegamento in conglomerato bituminoso 5 cm
- Strato di base in conglomerato bituminoso 10 cm
- Strato di fondazione in misto cementato (CBM) 20 cm
- Riempimento in malta cementizia autolivellante e autocompattante (SC-CBM-1)

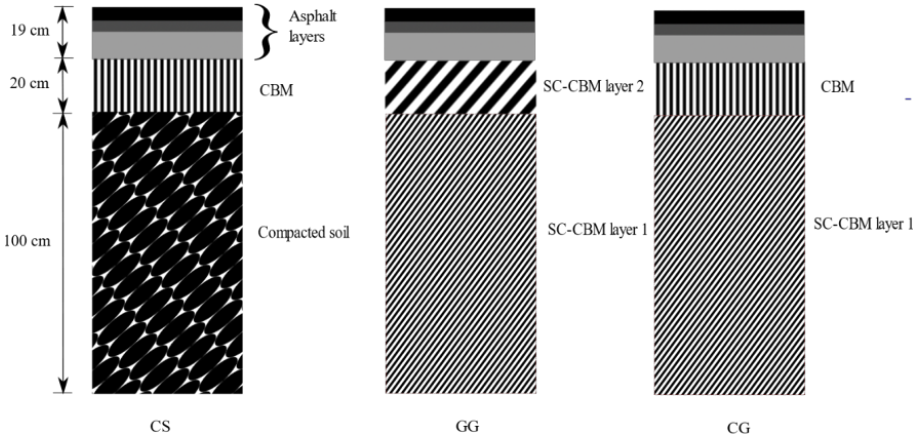


Figura 24: Sezioni caso studio [9]

Gli strati in conglomerato bituminoso (usura, collegamento, base) sono analoghi per tutti e tre i casi. L'unità funzionale considerata in fase di calcolo è un tratto di strada di lunghezza 1 km, con larghezza e spessori di progetto.

5.1 Calcolo volumi

5.1.1 Strati in conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso è prodotto da Sitalfa presso l'impianto di Salbertrand ed è costituito da aggregati lapidei di primo impiego, bitume e polimero. E' opportuno sottolineare che il bitume di partenza non è un "bitume modificato con polimero (PMB), tale materiale è stato aggiunto in fase di miscelazione per incrementare le prestazioni e le caratteristiche della miscela. Tutte le informazioni sui materiali costituenti sono state fornite dai produttori e in alcuni casi ricavate dalle relative schede tecniche.

Gli aggregati che costituiscono la fase solida del conglomerato bituminoso sono caratterizzati da sabbione (3/8, 8/18, 18/30 mm) e filler. Il bitume utilizzato è del tipo 50/70 fornito da Iplom S.p.a, mentre il polimero è denominato

Superplast ed è fornito da Iterchimica s.r.l. Superplast è un composto di polimeri selezionati dalla forma granulare che si utilizza per la modifica delle miscele bituminose in fase di produzione, il suo utilizzo comporta un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso ed un miglioramento del comportamento a fatica.

Rispettando le limitazioni proposte dal Capitolato [40], la densità minima da raggiungere nella fase di controllo delle miscele bituminose è il 98% della densità di progetto (densità Marshall). Per tutti e tre gli strati in conglomerato bituminoso, i calcoli sono stati eseguiti al 98% della densità di progetto (densità Marshall), tale densità è stata ricavata da prove dirette sui provini.

Usura

Note le caratteristiche geometriche dello strato, le informazioni volumetriche e il valore della densità di progetto, è stato eseguito il calcolo volumetrico dei singoli materiali che costituiscono lo strato in conglomerato bituminoso per un metro cubo di miscela e successivamente sono stati ricavati i volumi per lo strato di interesse. Il volume totale dello strato di usura è di 240 m^3 ed è stato calcolato considerando lo spessore di progetto pari a 4 cm, la larghezza di 6 m e la lunghezza dell'unità funzionale adottata pari ad 1 km.

Le caratteristiche volumetriche del conglomerato bituminoso per la realizzazione dello strato di usura, sono state reperite dalla scheda tecnica fornita da Tecno Piemonte e sono di seguito riportate.

Caratteristiche volumetriche (Usura)		
Percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati	[%]	5,5
Percentuale di bitume rispetto al peso del conglomerato	[%]	5,21
Percentuale di polimero rispetto al peso del conglomerato	[%]	0,3
Vuoti residui	[%]	5,4
Massa volumica miscela secca	[g/cm^3]	2,708
Densità del bitume	[g/cm^3]	1,025
Densità del polimero	[g/cm^3]	0,5
Densità Marshall (di progetto)	[g/cm^3]	2,418

Tabella 13: Caratteristiche volumetriche usura

In fase preliminare sono stati eseguiti i calcoli volumetrici per un metro cubo di miscela, moltiplicando i valori ottenuti per il volume totale dello strato di usura e dividendo per la densità di ogni singolo materiale si ottengono i volumi necessari per il suddetto strato. Infine, per poter inserire i valori in PaLATE, è stato necessario convertire i metri cubi in iarde cubiche. Viene riportata una tabella che riepiloga i volumi:

Volumi strato di usura		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Aggregati	198,4	259,6
Bitume	28,9	37,8
Polimero	3,4	4,5
Totale	**230,8**	**302**

Tabella 14: Volumi dei materiali costituenti lo strato di usura

La procedura appena descritta è stata replicata per gli strati di collegamento e di base in conglomerato bituminoso.

Collegamento

E' stato eseguito il calcolo volumetrico dei singoli materiali che costituiscono lo strato in conglomerato bituminoso per un metro cubo di miscela e successivamente sono stati ricavati i volumi per lo strato di interesse. Lo strato di collegamento ha un volume di 300 m^3 ed è stato calcolato considerando lo spessore di 5 cm, la larghezza della sezione di 6 m e la lunghezza di 1 km.

Il calcolo dei volumi dei materiali costituenti lo strato di collegamento e le relative caratteristiche volumetriche sono riportate nelle tabelle seguenti.

Caratteristiche volumetriche (Collegamento)		
Percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati	[%]	5
Percentuale di bitume rispetto al peso del conglomerato	[%]	4,76
Percentuale di polimero rispetto al peso del conglomerato	[%]	0,3
Vuoti residui	[%]	6,1
Massa volumica miscela secca	[g/cm^3]	2,728
Densità del bitume	[g/cm^3]	1,025
Densità del polimero	[g/cm^3]	0,5
Densità Marshall (di progetto)	[g/cm^3]	2,373

Tabella 15: Caratteristiche volumetriche collegamento

Moltiplicando i valori ottenuti per un metro cubo di miscela per il volume di usura e dividendo per la densità di ogni singolo materiale si ottengono i volumi necessari per il suddetto strato che sono stati successivamente convertiti in iarde cubiche. Viene riportata una tabella che riepiloga i volumi:

Volumi strato di collegamento		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Aggregati	242,8	317,6
Bitume	32,40	42,4
Polimero	4,2	5,5
Totale	**279,4**	**365,4**

Tabella 16: Volumi dei materiali costituenti lo strato di collegamento

Base

E' stato eseguito il calcolo volumetrico dei singoli materiali che costituiscono lo strato in conglomerato bituminoso per un metro cubo di miscela e successivamente sono stati ricavati i volumi per lo strato di interesse. Il volume totale dello strato di base è di 600 m^3 ed è stato valutato considerando uno spessore di 10 cm, larghezza di 6 m e 1 km in lunghezza. Le caratteristiche volumetriche e il calcolo relativo ai volumi dei singoli materiali sono riportati di seguito.

Caratteristiche volumetriche (Base)		
Percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati	[%]	4
Percentuale di bitume rispetto al peso del conglomerato	[%]	3,85
Percentuale di polimero rispetto al peso del conglomerato	[%]	0,3
Vuoti residui	[%]	5,39
Massa volumica miscela secca	[g/cm^3]	2,735
Densità del bitume	[g/cm^3]	1,025
Densità del polimero	[g/cm^3]	0,5
Densità Marshall (di progetto)	[g/cm^3]	2,360

Tabella 17: Caratteristiche volumetriche base

Una volta effettuato i calcoli volumetrici per un metro cubo di miscela stesa, note le desntià dei singoli materiali si sono ottenuti i volumi dei singoli materiali che compongono lo strato di base in conglmerato bituminoso. Infine, per poter inserire i valori in PaLATE, è stato necessario convertire i metri cubi in iarde cubiche.

Volumi strato di base		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Aggregati	486,3	636,1
Bitume	52,1	68,2
Polimero	8,3	10,9
Totale	**546,8**	**715,2**

Tabella 18: Volumi dei materiali costituenti lo strato di base

5.1.2 Emulsione bituminosa

Un'emulsione bituminosa rappresenta un sitema eterogeno nel quale di possono distinguere almeno due fasi, acqua e bitume miscelati con agenti tensoattivi o emulsionanti, impiegati per disperdere la componente di bitume e incrementare la stabilità del sistema. Uno dei parametri fondamentali nelle emulsioni bituminose è il contenuto residuo di bitume che può variare dal 50% al 70% [6, 40]e sono classificate in base al loro carattere ionico e alla velocità di rottura.

Come previsto dal Capitolato [40], prima della posa dello strato in conglomerato bituminoso occorre preparare adeguatamente la superficie di stesa attraverso l'utilizzo di emulsione bituminosa al fine di garantire sufficiente adesione tra gli strati. A tal proposito di distinguono mano d'attacco e mando di ancoraggio.

La mano d'attacco consiste nell'applicazione di emulsione bituminosa su uno strato in conglomerato bituminoso a caldo, prima della stesa dello strato sovrastante, fornendo una perfetta adesione tra gli strati, garantendo adeguata impermeabilità dello strato sottostante e realizzare una collaborazione strutturale solidale tra gli strati. La mano di ancoraggio si utilizza quando uno strato in conglomerato bituminoso viene steso su un strato in misto granulare [6] e ha la funzione di irrigidire la parte superiore dello strato non legato, riempire i vuoti superficiali e assicurare una superficie che consenta una corretta adesione tra i due strati.

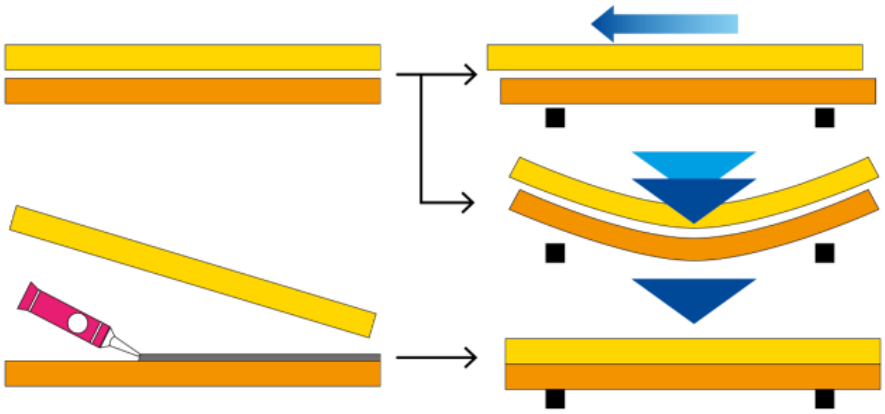


Figura 25: Meccanismo difunzionamento della mano d'attacco [6]

Nel caso in esame sono state previste due mani d'attacco (usura-binder, binder-base) e una mano di ancoraggio tra lo strato di base in conglomerato bituminoso e la fondazione. Per la realizzazione della mano d' attacco è stata utilizzata un'emulsione bituminosa cationica con un dosaggio tale che il bitume residuo sia pari a 0,30 kg/m^2, mentre per la mano di ancoraggio occorre garantire almeno 1 kg/m^2 di bitume residuo. Le caratteristiche dell'emulsione bituminosa e i volumi necessari per la realizzazione della mano d'attacco e di ancoraggio sono riportati nelle tabelle che seguono.

Superficie di posa	[m^2]	6000
Contenuto di legante	[%]	60
Contenuto di acqua	[%]	40
Densità emulsione bituminosa	[kg/m^3]	1000
Bitume residuo per mano d'attacco	[kg/m^3]	0,30
Bitume residuo per mano di ancoraggio	[kg/m^3]	1,00

Tabella 19: Caratteristiche emulsione bituminosa

Mano d'attacco	
Bitume residuo [kg]	1800
Acqua [kg]	1200
Massa totale emulsione bituminosa [kg]	3000
Emulsione bituminosa [m^3]	3

Tabella 20: Mano d'attacco

Mano di ancoraggio	
Bitume residuo [kg]	6000
Acqua [kg]	4000
Massa totale emulsione bituminosa [kg]	10000
Emulsione bituminosa [m^3]	10

Tabella 21: Mano di ancoraggio

5.1.3 Calcolo dei volumi per strati di fondazione e riempimento

Calcolo densità dei materiali costituenti

Le densità dei materiali sono state ricavate a partire dai valori di specific gravity (SG) considerando la densità dell'acqua a 4C , mentre per l'acqua di aggiunta è stata considerata la densità a 25C. In particolare, per RAP e sludge, sono stati considerati i valori di specific gravity relativi a due campioni, è stato valutato un valor medio e successivamente è stata calcolata la densità dei materiali.

	SG_1 [-]	SG_2 [-]	SG_m [-]
RAP	2,530	2,485	2,508
Sludge	2,786	2,810	2,798

Tabella 22: Densità RAP e sludge

Il cemento utilizzato è del tipo CEM I R42,5 a norma EN 197-1 di tipo Portland (tipo I) con specific gravity 3,15, inoltre nella miscela vi è la presenza di un additivo superfluidificante per calcestruzzo autocompattante (Advaflow 455) con densità di 1,060 g/cm^3. L'utilizzo del superfluidificante nasce dalla necessità di conferire all'impasto cementizio caratteristiche di elevata fluidità senza creare segregazione e garantire una totale efficacia alla miscela.

La miscela di aggregati è composta da diverse frazioni di sabbia e ghiaia, conoscendo le rispettive percentuali prese dalla scheda tecnica fornita da Tecno Piemonte e i valori di specific gravity forniti da indagini sperimentali, attraverso una media armonica ponderata è stato possibile calcolare la densità degli aggregati.

	[%]	Densità	
		[g/cm^3]	[g/cm^3]
sand 0-8	40	2,765	2,744
gravel 8-18	20	2,730	
gravel 18-30	40	2,730	

Tabella 23: Densità aggregati

$$Dens_{agg} = \frac{40 + 20 + 40}{\frac{40}{2{,}765} + \frac{20}{2{,}730} + \frac{40}{2{,}730}} = 2{,}744 \frac{g}{cm^3} \tag{51}$$

La tabella che segue riassume i valori di densità utilizzati nel calcolo.

Materiale	Densità
	[g/cm^3]
Cemento	3,150
Aggregati	2,744
RAP	2,507
Sludge	2,798
Additivo	1,060
Acqua	0,997

Tabella 24: Densità materiali

Sezione GG

La sezione GG oltre ai tre strati legati con bitume dispone di uno strato di fondazione di altezza 20 cm e di uno strato di riempimento costituito da una sezione ad arco rovescio che ha un'altezza nel punto più alto di 1 m. Entrambi gli strati sono costituiti da una malta cementizia autocompattante (SC-CBM) che prevede l'utilizzo di materiali di riciclo, quali sludge e RAP. E' opportuno notare che nello strato di riempimento è stata considerata la presenza dei sotto-servizi ai fini del calcolo del volume. In primo luogo sono state calcolate le densità dei materiali costituenti e successivamente è stato eseguito il calcolo dei volumi.

Fondazione in SC-CBM

I dati relativi al mix design sono stati forniti in seguito a prove sperimentali effettuate sul medesimo caso studio. Il volume totale dello strato di fondazione è pari a 1400 m^3 ed è stato calcolto considerando la lunghezza di 1 km dell'unità funzionale e l'area dello strato pari a 1,4 m^2.

Miscela SC-CBM (fondazione) di GG		
Dosaggio per 1 m^3		
Cemento	100	[kg]
Aggregati	885	[kg]
RAP	316	[kg]
Sludge	379	[kg]
Additivo	2	[kg]
Acqua	382	[kg]

Tabella 25: Mix-design fondazione SC-CBM

I volumi dei singoli materiali costituenti lo strato di fondazione sono stati ricavati a partire dal mix-design per un metro cubo di miscela, considerando le singole densità dei materiali e considerando il volume totale della fondazione pari a 1400 m^3. Segue una tabella che riporta i volumi finali in metri cubi e iarde cubiche.

Fondazione in SC-CBM (GG)		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Cemento	44,4	58,1
Aggregati	451,5	590,6
RAP	176,4	230,8
Sludge	189,6	248,0
Additivo	2,6	3,5
Acqua	536,4	701,6
Totale	**1401**	**1832,6**

Tabella 26: Volumi materiali costituenti la fondazione in SC-CBM (Sez. GG)

Riempimento in SC-CBM

Come citato inizialmente, ai fini del calcolo volumetrico dello strato di riempimento, è stata considerata la presenza dei sotto-servizi, in particolare alla sezione ad arco rovescio sono state sottratte le aree dei fori dove passano le varie utenze (area totale dei fori 0,8264 m^2), il volume totale dello strato di riempimento è pari a 4734 m^3.

La composizione dello strato di riempimento è simile allo strato di fondazione ma con un mix-design diverso. Si noti la scelta di un dosaggio minore di cemento rispetto allo strato di fondazione, ciò è giustificato dal fatto di voler limitare la resistenza a lungo termine in previsione di futuri scavi dovuti alla manutenzione delle utenze sotterranee. Noti i valori dei vari componenti per un metro cubo di miscela, come nel caso precedente sono stati ricavati i volumi necessari per l'unità funzionale considerata. Nella Tabella 27 e Tabella 28 sono riportati rispettivamente il mix-design e i volumi dei singoli materiali.

Miscela SC-CBM (riempimento) di GG		
Dosaggio per 1 m^3		
Cemento	60	[kg]
Aggregati	928,8	[kg]
RAP	331,7	[kg]
Sludge	398,1	[kg]
Additivo	1,2	[kg]
Acqua	366	[kg]

Tabella 27: Mix-design riempimento SC-CBM

Riempimento in SC-CBM (GG)		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Cemento	90,2	118
Aggregati	1602,2	2095,7
RAP	626	819,1
Sludge	673,5	881,0
Additivo	5,4	7,0
Acqua	1737,6	2272,8
Totale	**4735**	**6194**

Tabella 28: Volumi materiali costituenti il riempimento in SC-CBM (Sez. GG)

Sezione CG

La sezione CG prevede l'utilizzo di un pacchetto composto da tre strati in CB (usura, collegamento, base), fondazione in misto cementato (CBM) avente altezza di 20 cm e uno strato di riempimento in malta cementizia autocompattante SC-CBM.

Fondazione in misto cementato

Il volume dello strato di fondazione è lo stesso della sezione GG, dunque equivale a dire 1400 m^3. La definizione del mix-design del misto cementato è stata fatta considerando la scheda tecnica fornita da Tecno Piemonte, in particolare la miscela prevede l'utilizzo di cemento, acqua e aggregati.

Il cemento utilizzato è del tipo CEM II A/L R42,5 fornito da Buzzi, con densità 2,75 – 3,20 g/cm^3, il valore adottato nei calcoli è di 2,97 g/cm^3. La miscela di aggregati è identica a quella utilizzata per la fondazione e il riempimento in SC-CBM della sezione GG, dunque la densità degli aggregati è di 2,744 g/cm^3.

E' stato valutato il dosaggio dei componenti per un metro cubo di miscela e successivamente il calcolo volumetrico è stato esteso a tutto lo strato di fondazione. Ai fini del calcolo si è considerato il 97% della densità secca. La tabella che segue riporta le caratteristiche volumetriche della miscela.

Massa dell'unità di volume secca	2,3	[g/cm^3]
97 % Massa dell'unità di volume secca	2,2	[g/cm^3]
Contenuto d'acqua (su aggregati)	6,2	[%]
Percentuale di cemento in peso sull'aggregato	2,5	[%]
Percentuale di cemento sulla miscela	2,4	[%]
Percentuale di aggregati sulla miscela secca	97,6	[%]
Massa cemento al m^3	53,8	[kg/m^3]
Massa aggregati al m^3	2152,9	[kg/m^3]
Acqua al m^3	133,5	[kg/m^3]

Tabella 29: Caratteristiche volumetriche misto cementato (Sezione CG)

Note il dosaggio dei componenti per un m^{3}di miscela, le densità dei materiali e il volume dello strato sono stati ricavati i volumi dei singoli materiali per lo strato di fondazione interessato.

Fondazione in CBM (CG)		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Cemento	25,4	33,2
Aggregati	1098,4	1436,7
Acqua	187,4	245,2
Totale	**1311,2**	**1715,1**

Tabella 30: Volumi materiali costituenti la fondazione in misto cementato (Sez. CG)

Riempimento in SC-CBM

La procedura seguita per il calcolo volumetrico è la stessa fatta per il riempimento della sezione GG. Anche in questo caso la differenza si presenta nel dosaggio dei diversi componenti, in particolare in questo caso il quantitativo di cemento al metro cubo passa da 60 a 100 kg/m^3. Il mix–design per un metro cubo di miscela deriva prove sperimentali effettuate in precedenza ed è riportato in Tabella 31.

Miscela SC-CBM (riempimento) di CG		
Dosaggio per 1 m^3		
Cemento	100	[kg]
Aggregati	885	[kg]
RAP	316	[kg]
Sludge	379	[kg]
Additivo	2	[kg]
Acqua	382	[kg]

Tabella 31: Mix-design riempimento SC-CBM

I volumi finali dei singoli materiali per lo strato di riempimento considerato sono riportati nella tabella che segue:

Riempimento in SC-CBM (CG)		
Materiale	[m^3]	[yd^3]
Cemento	150	196,6
Aggregati	1527	1997
RAP	596,6	780,3
Sludge	641	839
Additivo	8,9	12
Acqua	1813,6	2372,2
Totale	**4737,2**	**6196,3**

Tabella 32: Volumi materiali costituenti il riempimento in SC-CBM (Sez. CG)

Sezione CS

La sezione denominata CS è composta da tre strati in CB, uno strato di fondazione da 20 cm in misto cementato e uno strato di riempimento composto da un terreno di tipo A1-a. Essendo tale sezione un caso totalmente teorico e mai realizzato, la tipologia di terreno è stata ipotizzata per completezza del seguente lavoro di tesi.

Fondazione in misto cementato

Per lo strato di fondazione in CBM (Cement Bound-Mixture) della sezione CS valgono le stesse considerazioni fatte per lo strato di fondazione della sezione CG in quanto hanno le stesse caratteristiche.

E' stato valutato il dosaggio dei componenti per un metro cubo di miscela e successivamente il calcolo volumetrico è stato esteso a tutto lo strato di fondazione. Ai fini del calcolo si è considerato il 97% della densità secca. Per quanto riguarda le caratteristiche volumetriche si fa riferimento ai dati presenti in Tabella 29, mentre per i volumi dei singoli materiali è possibile fare riferimento alla Tabella 30.

Riempimento in terreno

Come accennato in precedenza, la tipologia di terreno è stata puramente ipotizzata. Il terreno considerato è del tipo A1-a, in tale sottogruppo rientrano terreni aventi un contenuto di materiale grosso (trattenuto al setaccio 2 mm) minore o uguale al 50% e un contenuto di materiale fino minore o uguale al 15% (setaccio 0,063 mm). Appartengono a questo gruppo i materiali rocciosi non evolutivi e le terre granulari, pressochè insensibili all'azione dell'acqua e del gelo. Tale tipologia di terreni è impiegata per la costruzione di rilevati e sottofondi stradali in quanto dotati di buone caratteristiche meccaniche, tali parametri hanno portato alla scelta di questo tipo ti terreno. E' stata ipotizzata una densità del terreno pari a 2,00 g/cm^3, il volume di terreno necessario per la realizzazione dello strato è stato considerato pari al volume dello strato, ovvero 4734 m^3.

5.2 Distanze di trasporto

Un altro dato di input da inserire in PaLATE, oltre ai volumi dei singoli materiali che compongono i diversi strati della pavimentazione e le relative densità, sono le distanze di trasporto dei materiali in quanto esse vanno ad incidere sulle emissioni e sulle voci di costo.

Il conglomerato bituminoso, come anche l'emulsione bituminosa, viene prodotto nell'impianto di Salbertrand e poi trasferito presso il Traforo del Frejus. Ogni singolo materiale che compone la miscela CB viene trasportato dalle aziende produttrici fino a Salbertrand, dove viene composta la miscela. La Tabella 33 riporta i produttori dei singoli materiali e le relative distanze di trasporto in km e in miglia.

Trasporto dei componenti del CB			
	[km]	[mi]	modalità trasporto
Miscela di CB (aggregati, bitume, polimero) Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	14,5	Dumper truck
Fornitura bitume : raffineria IPLOM S.p.a di Busalla (Genova) IPLOM - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	230	143	Tanker truck
Fornitura polimero : Iterchimica s.r.l (Suisio prov. Bergamo) Iterchimica - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	248	154,1	Dumper truck
Fornitura filler : NICEM s.r.l. (Bergamo) NICEM - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	280	174	Dumper truck
Fornitura aggregati : fiume Dora Riparia - Centrale IREN Centrale IREN - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	3	1,86	Dumper truck
Emulsione bituminosa Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	14,5	Tanker truck

Tabella 33: Distanza di trasporto dei componenti del CB

Per gli strati legati con bitume occorre fare una precisazione, è stata effettuata una media pesata sulle distanze di trasporto di filler e aggregati (in termini di massa) sulla base delle schede tecniche fornite da Tecno Piemonte e della produzione dei due materiali. Questo discorso è stato tenuto in considerazione in quanto la distanza di trasporto di filler e aggregati è nettamente differente e per ottenere un output attendibile su PaLATE in termini di emissioni. Una media pesata in termini di massa è stata condotta per determinare un'unica distanza di trasporto.

	Misc. Secca	Aggregati	Filler	Distanza Fornitore-Sitalfa	
	[kg/m^3]	[%]	[%]	[km]	[mi]
Usura	2708	93	7	22,39	13,91
Binder	2728	95	5	16,85	10,47
Base	2735	96	4	14,08	8,75

Tabella 34: Distanza di trasporto aggregati-filler

La miscela cementizia auto-compattante SC-CBM è prodotta presso lo stabilimento di Salbertrand e poi trasportata al traforo del Frejus per la posa in opera. Ogni singolo materiale viene trasportato dal produttore allo stabilimento per poi essere lavorato. Nella tabella che segue si può notare come la distanza

di trasporto di sludge e RAP sia stata trascurata in quanto i due materiali sono presenti presso l'impianto di Salbertrand.

Trasporto dei componenti della miscela SC-CBM			
	[km]	[mi]	modalità trasporto
Miscela di SC-CBM (aggregati, cemento, additivo, rap, sludge) Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	14,5	Dumper truck
Fornitura cemento : Buzzi Unicem SpA Buzzi Unicem SpA - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	151	94	Tanker truck
Fornitore Gcp italiana Spa; additivo Adva Flow 455 (superplasticizer) Gcp Italiana Spa - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	208	129,2	Dumper truck
Fornitura aggregati : fiume Dora Riparia - Centrale IREN Centrale IREN - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	3	1,86	Dumper truck
Fornitore RAP: il materiale è gia presente presso l'impianto di Salbertrand	-	-	-
Fornitore Sludge: il materiale è gia presente presso l'impianto di Salbertrand	-	-	-

Tabella 35: Distanza di trasporto dei componenti della miscela SC-CBM

In analogia alla miscela SC-CBM, anche il misto cementato viene prodotto a Salbertrand e poi trasportato in cantiere. Segue la Tabella 36 dove vengono riportate le distanze di trasporto dei materiali.

Trasporto dei componenti del CBM			
	[km]	[mi]	modalità trasporto
Miscela di CBM (aggregati, cemento, acqua) Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	14,5	Dumper truck
Fornitura cemento : Buzzi Unicem SpA Buzzi Unicem SpA - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	151	94	Tanker truck
Fornitura aggregati : fiume Dora Riparia - Centrale IREN Centrale IREN - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	3	1,86	Dumper truck

Tabella 36: Distanza di trasporto dei componenti della miscela CBM

Per il terreno utilizzato nello strato di riempimento della sezione CS, è stata ipotizzata una distanza di trasporto simile a quella degli aggregati.

Trasporto del terreno (sezione CS)			
	[km]	[mi]	modalità trasporto
Terreno tipo A1-a	3	1,86	Dumper Truck

Tabella 37: Distanza di trasporto del terreno

Per quanto riguarda l'emulsione bituminosa, essa viene prodotta da Bitem S.r.l a Modena e viene successivamente trasportata presso lo stabilimento Sitalfa.

Trasporto emulsione bituminosa			
	[km]	[mi]	modalità trasporto
Bitem S.r.l, Modena - Impianto Sitalfa	372	231,15	Tanker Truck

Tabella 38: Distanza di trasporto dell'emulsione bituminosa

La calce utilizzata per il trattamento della sludge è stata ipotizzata avere una distanza di trasporto pari a quella del cemento, ovvero 151 km, e la medesima modalità di trasporto.

5.3 Life Cycle Inventory

L'analisi d'inventario descritta in questo paragrafo è stata eseguita per aggiornare la sector table presente nel foglio Emission Factors di PaLATE (EMF Transport). La sector table presenta i valori di emissione di default proposti dall'applicativo PaLATE e la maggior parte di essi fa riferimento allo scenario americano. Al fine di rendere lo studio del nostro caso in esame, rigoroso e attendibile, è stata condotta una ricerca specifica sui valori attuali di emissione per i materiali utilizzati e le procedure adottate.

Le emissioni e i consumi energetici per poter essere inseriti in PaLATE sono stati convertiti nella giusta unità di misura così da avere una coerenza in termini dimensionali. Le emissioni vengono trasformate in grammi su tonnellata corta, il consumo di energia in MJ/shton, l'elettricità in kWh/shton.

5.3.1 Fattori di emissione considerati da PaLATE

In questa sezione vengono esposte delle definizioni di carattere generale riguardo i fattori di emissione considerati in PaLATE presenti nella sector table. Le sostanze rilasciate nell'atmosfera sono strettamente legate ai processi di produzione dei materiali, al trasporto, alla costruzione iniziale, alla manutenzione e alla dismissione della pavimentazione.

- **Anidride Carbonica (CO_2)**: in letteratura nota anche come "diossido di carbonio" o "biossido di carbonio", si tratta di un ossido acido formato da una molecola di carbonio e due molecole di ossigeno. Tale sostanza si presenta naturalmente nell'atmosfera con una concentrazione limitata, non è tossica e non è nociva. Viene generata attraverso combustione o decomposizione di molecole organiche e dalla respirazione cellulare, fino a trovare la sua posizione nell'atmosfera dove contribuisce all'effetto serra naturale: fenomeno di termoregolazione naturale che contribuisce alla vita e alla nascita sulla Terra. La CO_2 è principalmente legata ad attività antropiche (industrie e automobili), dove una produzione incontrollata di queste porterebbe ad un aumento dell'effetto serra e dunque ad un incremento del surriscaldamento globale [38, 42, 43].

- **Monossido di Carbonio (CO)**: è una sostanza tossica e inquinante che si presenta sotto forma di gas incolore, inodore e insapore. Viene prodotto per combustione incompleta di materiale organico in presenza di scarso contenuto di ossigeno nell'ambiente. Il monossido di carbonio può essere prodotto da fonti di combustione non dotate di adeguati sistemi di aspirazione (cadaie, caminetti, stufe a legna o a gas..) e dal fumo derivante dal tabacco. In base al suo livello di concentrazione in un determinato am-

biente, può avere diversi effetti tossicologici sulla salute umana e provocare sino al coma e alla morte per asfissia.

- **Ossidi di Azoto (NO_x)**: con la sigla NO_x si identificano tutti gli ossidi di azoto e le loro miscele e si producono come sottoprodotti durante una combustione che avviene utilizzando aria. Tra i più importanti ossidi di azoto a livello di inquinamento atmosferico vi è l'ossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO_2). L'ossido di azoto (NO) è formato principalmente per reazione dell'azoto presente in aria con l'ossigeno atmosferico a temperature elevate, in particolare durante i processi di combustione per la produzione di energia elettrica, energia meccanica, vapore, calore, incenerimento, ecc.. L'ossido di azoto, una volta formatosi, interagendo con l'ossigeno durante il processo di raffreddamento, si trasforma parzialmente in biossido di azoto con formazione di una mescolanza dei due ossidi chiamato NO_x. L'inquinamento dovuto agli ossidi di azoto è dato principalmente dal traffico veicolare ed in particolare all'utilizzo di motori diesel, centrali termoelettriche e dai camini a legna.

- **Anidride Solforosa (SO_2)**: nota anche come "biossido di zolfo", "diossido di zolfo" o comunemente "ossido di zolfo", si presenta come un gas incolore solubile in acqua e dall'odore pesante. Il biossido di zolfo è uno degli inquinanti atmosferici più pericolosi ed è dato dall'ossidazione dello zolfo nei processi di combustione di carbone, petrolio e gasolio. La sua produzione è dovuta principalmente a fattori antropici è concentrata nei paesi più industrializzati. Le maggiori emissioni di SO_2 sono originate dalla combustione di carbone fossile e petrolio greggio per il riscaldamento domestico, la produzione industriale e quella di energia da parte delle centrali termoelettriche. L'esposizione a lungo termine al biossido di zolfo induce problemi nell'apparato respiratorio umano e porta all'intossicazione della specie vegetale.

- **Materiale Particolato (PM_{10})**: con il termine particolato vengono classificate tutte quelle sostanze solide e liquide presenti nell'aria che hanno dimensioni microscopiche, comunemente denominate come "polveri fini". Le particelle che compongono il particolato possono essere di natura organica o inorganica ed hanno la capacità di adsorbire sulla loro superficie diverse sostanze tossiche quali metalli, solfati, nitrati e composti volatili. Le polveri fini vengono classificate in base alla loro dimensione, più le particelle sono piccole maggiore sarà la capacità di penetrazione nell'apparato respiratorio. Con la sigla PM_{10} viene identificato il particolato con particelle di diametro inferiore a 10 µm e le principali fonti di produzione possono essere di tipo naturale (incendi boschivi, attività vulcanica, pollini e spore..) o di tipo antropico (traffico veicolare; residui dell'usura del manto stradale, dei freni e delle gomme; attività industriali...) [39].

- **Mercurio (Hg)**: il mercurio è un un metallo pesante altamente tossico riconosciuto come inquinante globale capace di influire negativamente

sulla salute dell'uomo e sull'ambiente. Di base è un elemento presente nell'ambiente per effetto di fenomeni naturali (incendi boschivi, eruzioni vulcaniche..) e per attività di carattere antropico; quest'ultime risultano essere la causa principale delle emissioni in aria e dei rilasci in acqua e nel suolo di mercurio. Tra le attività umane rientrano la combustione del carbon fossile, attività industriali che fanno uso di mercurio e dei suoi derivati, attività di estrazione nelle miniere di mercurio. Date le particolari caratteristiche fisico-chimiche del mercurio esso si distribuisce nell'ambiente e può essere trasportato per lunghe distanze nell'atmosfera, depositandosi anche molto lontano da luogo di emissione. Inoltre, non essendo soggetto a degradazione, il mercurio persite nel tempo e nell'ambiente [41].

- **Piombo (Pb)**: il piombo appartiene alla categoria dei metalli pesanti ed è un elemento altamente tossico, la sua presenza nell'ambiente è legata a cause naturali e a fenomeni di inquinamento originati da innumerevoli attività antropiche. L'esposizione a questo metallo per inalazione di aria o ingestione orale di terra e prodotti alimentari contaminati, comporta conseguenze negative sulla salute umana; in particolare la presenza nell'atmosfera di tale metallo è dovuta al traffico veicolare [41].

- **Generazione di rifiuti pericolosi (RCRA - Hazardous Waste Generated)**: un rifiuto pericoloso è un rifiuto con proprietà che lo rendono insidioso o in grado di avere un effetto nocivo sulla salute umana o sull'ambiente. I rifiuti pericolosi vengono generati da molte fonti, che vanno dai rifiuti dei processi di produzione industriale alle batterie e possono presentarsi in molte forme, inclusi liquidi, gas solidi e fanghi.

- **Potenziale di tossicità per l'uomo (HTTP - Human Toxicity Potential)**: l'indice HTP rappresenta il potenziale di tossicità umana e riflette il potenziale danno di un'unità di sostanza chimica rilasciata nell'ambiente e si basa sulla tossicità di un composto e sulla sua dose potenziale. Le emissioni possono essere valutate in termini di agenti cancerogeni e agenti non cancerogeni.

- **Potenziale di riscaldamento globale (GWP - Global Warming Potential)**: il GWP è un indicatore che rappresenta il contributo all'effetto serra di un gas serra relativamente all'effetto della CO_2, il cui potenziale di riferimento è 1. Ogni gas serra ha un potenziale di riscaldamento globale (GWP) differente e persite per diverso tempo nell'atmosfera. Ai fini della determinazione dell'indicatore GWP (Global Warming Potential) è opportuno convertire le emissioni dei gas serra in equivalenti di Anidride Carbonica CO_2 , in modo che possano essere confrontati. Nella tabellina che segue, la colonna a destra mostra quanto quella sostanza chimica riscalderebbe la terra in 100 anni rispetto all'anidride carbonica (CO_2). Facendo riferimento al metano, ad esempio, la tabella ci dice che 1kg di CO_2 equivale a 25 kg di CH_4[38, 42, 43].

Designation or Name	Chemical formula	Lifetime (years)	100 yr GWP (SAR)	100 yr GWP (AR4)
Carbon dioxide	CO_2	Note [1]	1	1
Methane	CH_4	12 [2]	21	25
Nitrous oxide	N_2O	114	310	298

Tabella 39: GWP [43]

- **Consumo totale di energia (GER - Gross Energy Requirement)**: il GER è un indicatore ambientale che rappresenta il fabbisogno energetico lordo, ovvero la somma di tutte le risorse energetiche non rinnovabili utilizzate per la produzione di un bene o servizio ed è espresso in unità di energia per unità fisica di prodotto o servizio. Tale indicatore fornisce una misura dell'intensità dell'uso delle risorse non rinnovabili e riflette la quantità di energia non rinnovabile sottratta alla terra per rendere disponibile un determinato prodotto o servizio [37].

5.3.2 Life Cycle Inventory - Bitume

L'analisi d'inventario eseguita per il bitume è stata sviluppata utilizzando i dati tecnici forniti dal report più recente stilato da Eurobitume [45]. Lo studio condotto da Eurobitume è del tipo cradle-to-gate (dalla culla al cancello) e risulta essere un'analisi rappresentativa della maggior parte delle raffinerie Europee a prescindere dalla localizzazione geografica, motivo per il quale si è fatto affidamento a tale studio.

Viene definito studio cradle-to-gate in quanto non viene considerato il trasporto secondario, ovvero il processo di stoccaggio intermedio e la distribuzione del prodotto presso stabilimenti specifici. In particolare l'inventario fornito da Eurobitume ricopre quattro fasi del ciclo di vita:

- estrazione del petrolio greggio;
- trasporto del petrolio greggio dal paese o dalla regione di estrazione;
- raffinazione;
- stoccaggio interno alla raffineria.

Lo studio è stato condotto in conformità alla normativa ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20], l'unità funzionale dichiarata di tale inventario è la produzione di 1 tonnellata (metrica) di bitume per uso stradale. Per l'analisi dei dati è stata considerata la tabella che presenta l'inventario del ciclo di vita per processi e infrastrutture, essa comprende i flussi associati alla costruzione delle infrastrutture necessarie per produrre, trasportare e raffinare il petrolio greggio.

Table 14. Summary Life-Cycle Inventory for the production of 1 tonne of bitumen – without infrastructure

Production of 1 tonne of bitumen (process without infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	24	0,3	0,037	0,079	25
Crude oil	kg	3,6	8,7	1,2	0,54	14
Consumption of non-energy resources						
Water[1)]	L	103	29	203	6,7	342
Emissions to air						
CO_2	g	90 139	21 248	18 814	6 595	136 797
SO_2	g	395	351	45	22	813
NO_x	g	250	604	19	8,0	881
CO	g	12	39	5,1	2,0	58
CH_4	g	376	11	2,9	2,6	392
NMVOC	g	327	30	2,4	0,91	361
Particulates	g	16	57	3,8	3,0	80
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	18 987	2 220	39	5.5	21 251
Biological Oxygen Demand	g	18 969	2 219	16	5,3	21 209
Suspended solids	g	47	0,7	6,38	0,23	54
Hydrocarbon (crude oil)	g	10,7	27	4,2	1,7	43,6
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	8.4	35	3.9	1,8	49

1) Excluding water cooling and turbine use

2) Excluding raw material

Table 15. Summary Life-Cycle Inventory for the production of 1 tonne of bitumen – with infrastructure

Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	26	1,0	0,054	0,082	27
Crude oil	kg	11,2	9,5	1,2	0,54	22
Consumption of non-energy resources						
Water[1)]	L	811	90	206	7,2	1 115
Emissions to air						
CO_2	g	130 157	33 258	19 278	6 650	189 343
SO_2	g	486	384	48	22	940
NO_x	g	549	646	20	8,3	1 224
CO	g	385	96	11,0	2,3	494
CH_4	g	486	42	4,3	2,7	535
NMVOC	g	411	39	3,0	0,98	455
Particulates	g	159	102	6,3	3,2	271
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	19 257	2 241	40	5.7	21 544
Biological Oxygen Demand	g	19 098	2 232	16	5,4	21 352
Suspended solids	g	260	34,2	7,22	0,55	302
Hydrocarbon (crude oil)	g	33.5	30	4.3	1.7	69.5
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	31.7	38	4,0	1,8	75

1) Excluding water cooling and turbine use

Tabella 40: LCI bitume [45]

I dati di nostro interesse sono stati presi e convertiti nelle unità di misura adottate da PaLATE. Segue una tabella che riporta i valori di emissione, consumi energetici e i relativi calcoli.

Bitume	
CO_2 [g/shton]	171769,3
CO [g/shton]	448,1
CH_4 [g/shton]	485,3
NO_x [g/shton]	1110,4
SO_2 [g/shton]	852,8
PM_{10} [g/shton]	245,8
Hg [g/shton]	-
Consumo acqua [g/shton]	1011512,2
GWP [g/shton]	183902,9
GER [MJ/shotn]	2169,2

Tabella 41: Fattori di emissione bitume

$$Wat.Cons. = \frac{1115\,[kg] \cdot 1000\left[\frac{g}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 1011512,2\frac{g}{shton} \tag{52}$$

$$GWP = \frac{189343\left[\frac{g}{tonne}\right] + 25 \cdot 535\left[\frac{g}{tonne}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 183902,9\frac{g}{shton} \tag{53}$$

$$GER = \frac{27\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 52,3\left[\frac{MJ}{kg}\right] + 22\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 44,5\left[\frac{MJ}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 2169,2\frac{MJ}{shton} \tag{54}$$

Per il calcolo del GER (Gross Energy Requirement) è stato considerato il potere calorifico del Natural gas e Crude oil, ovvero la quantità di calore prodotta dall'unità di massa di un determinato combustibile quando brucia completamente. Il potere calorifico del Natural gas è pari a 52,3 MJ/kg e del Crude oil 44,5 MJ/kg.

5.3.3 Life Cycle Inventory - Polimero

Per l'inventario del polimero utilizzato negli strati in conglomerato bituminoso è stata considerata la versione di Eurobitume del 2012 [44]. In questa edizione Eurobitume fornisce un inventario completo di bitume modificato con polimero (PMB). Considerando che nel nostro caso il polimero viene aggiunto in fase di miscelazione del conglomerato presso lo stabilimento di Sitalfa, non abbiamo dunque un bitume modificato con polimero di partenza. Dal documento sono stati estratti i valori di consumo e di emissione relativi alla sola produzione e trasporto del polimero non considerando il bitume.

Production of 1 tonne of PMB (process with infrastructure)	Unit	Bitumen	SBS (production & transport)	PMB milling	Total
Raw material					
Crude oil	kg	965	22,6		988
Consumption of energy resources					
Natural gas	kg	21,7	29,8	0,78	52,3
Crude oil	kg	48,7	20,1	0,3	69,1
Coal	kg	10,5	5,4	2,1	18,0
Uranium	kg	0,00025	0,00000	0,00015	0,0004
Consumption of non energy resources					
Water [1]	l	1 195	6 843	97	8 135
Emissions to air					
CO_2	g	218 252	117 719	10 046	346 016
SO_2	g	867	842	34	1 744
NO_x	g	1 102	614	18	1 734
CO	g	1 004	76	3	1 083
CH_4	g	694	493	18	1 205
Hydrocarbon	g	50,5	1 017	1	1 068
NMVOC	g	390	10	1	401
Particulates	g	290,1	99,8	9,9	400
Emissions to water					
Chemical Oxygen Demand	g	652	42	4	698
Biological Oxygen Demand	g	493	8	4	506
Suspended solids	g	216	56,6	14,4	287
Hydrocarbon	g	145,2	10,2	1,3	157
Phosphorous compounds	g	74,70	0,85	31,80	107,3
Nitrogen compounds	g	22,87	0,89	9,66	33,42
Sulphur compounds	g	1 738	35	788	2 561
Emissions to soil					
Hydrocarbon (oils)	g	149,8	1,9	1,3	153

Tabella 42: LCI polimero [44]

Anche in questo caso, come visto precedentemente per l'inventario del bitume, Eurobitume considera un approccio del tipo cradle-to-gate. Lo studio è stato condotto in conformità alla normativa ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20], l'unità funzionale dichiarata di tale inventario è la produzione di 1 tonnellata (metrica) di bitume per uso stradale, dalla quale è stata scorporata la parte inerente al solo polimero. I dati d'inventario includono i flussi associati alla costruzione delle infrastrutture necessarie per la produzione dell'unità funzionale considerata.

La tabella riportata sopra si riferisce alle emissioni del solo polimero dovute alla produzione e al trasporto. L'Eurobitume per stabilire tale emissioni considera una distanza di trasporto del polimero (fornitore - raffineria) pari a 500 km, nel nostro caso la distanza è circa la metà (248 km Iterchimica - Sitalfa). Attraverso una semplice proporzione sono state stabilite in maniera rigorosa le emissioni inerenti al caso studio.

Polimero	
CO_2 [g/shton]	52969,3
CO [g/shton]	34,2
CH_4 [g/shton]	221,8
NO_x [g/shton]	276,3
SO_2 [g/shton]	378,9
PM_{10} [g/shton]	44,9
Hg [g/shton]	-
Consumo acqua [g/shton]	3075055,1
GWP [g/shton]	58515,1
GER [MJ/shotn]	1182,6

Tabella 43: Fattori di emissione polimero

Di seguito vengono riportati tutti i calcoli effettuati:

$$Wat.Cons. = \frac{6843\,[kg] \cdot 1000\left[\frac{g}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} \frac{248\,[km]}{500\,[km]} = 3075055,1 \frac{g}{shton} \tag{55}$$

$$GWP = \frac{117719\left[\frac{g}{tonne}\right] + 25 \cdot 493\left[\frac{g}{tonne}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} \frac{248\,[km]}{500\,[km]} = 58515,1 \frac{g}{shton} \tag{56}$$

$$GER = \frac{29,8\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 52,3\left[\frac{MJ}{kg}\right] + 20,1\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 44,5\left[\frac{MJ}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} +$$

$$+ \frac{5,4\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 32,45\left[\frac{MJ}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 1182,6 \frac{MJ}{shton} \tag{57}$$

Per il calcolo del GER (Gross Energy Requirement) sono stati considerati i seguenti poteri calorifici: Natural gas 52,3 MJ/kg, Crude oil 44,5 MJ/kg, Coal 32,45 MJ/kg.

5.3.4 Life Cycle Inventory - Emulsione bituminosa

L'inventario per la produzione di emulsione bituminosa necessaria alla realizzazione della mano d'attacco e di ancoraggio è stato estratto dalla versione Eurobitume 2 [44].

Le emulsioni bituminose variano a seconda delle applicazioni, in generale sono composte da tre ingredienti: bitume, acqua e agente emulsionante anionico, cationico o non ionico. L'inventario proposto vede una soluzione di tipo cationica che incorpora bitume, un emulsionante di tipo amminico e acido cloridrico (soluzione maggiormente adottata in Europa). Lo studio è stato condotto in conformità alla normativa ISO 14040 e ISO 14044 [19, 20], l'unità funzionale dichiarata di tale inventario è la produzione di 1 tonnellata (metrica) di bitume residuo corrispondente a 1,54 tonne di emulsione bituminosa per uso stradale. Nella tabella sono riportati i dati per la produzione di 1 tonnellata di emulsione bituminosa. Comprende i flussi associati alla costruzione delle infrastrutture necessarie per produrre, trasportare e raffinare il petrolio greggio.

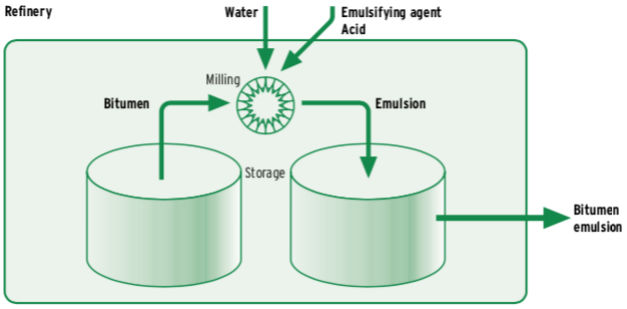


Figura 26: Produzione emulsione bituminosa [44]

Production of bitumen emulsion - 1 tonne of residual bitumen (process with infrastructure)	Unit	Bitumen	Emulsifier (production & transport)	HCl (production & transport)	Hot water (water & energy)	Emulsion milling	Total
Raw material							
Crude oil	kg	1 000	1,1				1 001,1
Consumption of energy resources							
Natural gas	kg	22,5	0,22	0,34	0,08	1,21	24,3
Crude oil	kg	50,5	1,4	0,4	1,8	0,4	54,4
Coal	kg	10,92	0,30	0,67	0,07	3,25	15,21
Uranium	kg	0,00026	0,00002	0,00004	0,00000	0,00023	0,0006
Consumption of non energy resources							
Water [1]	l	1 239	15	62	608	149	2 073
Emissions to air							
CO_2	g	226 167	4 602	3 985	5 459	15 455	255 669
SO_2	g	899	7,1	16	19	53	993
NO_x	g	1 142	20	10	7,7	27	1 207
CO	g	1 040	4,9	4,1	2,9	5	1 057
CH_4	g	719	6,0	7,7	3,7	28	764
Hydrocarbon	g	52,4	14,0	0,3	0,5	1,0	68
NMVOC	g	404	0,9	1,4	2,3	2,1	410
Particulates	g	300,6	3,0	4,2	1,9	15,2	324,9
Emissions to water							
Chemical Oxygen Demand	g	675	93	6,3	24	6,7	806
Biological Oxygen Demand	g	511	1,4	4,4	24	6,3	547
Suspended solids	g	224	2,1	7,9	1,9	22	258
Hydrocarbon	g	150	0,4	1,1	7,7	1,9	162
Phosphorous compounds	g	77,41	4,40	10,76	0,82	48,92	142,3
Nitrogen compounds	g	23,70	5,03	4,35	0,29	14,85	48,22
Sulphur compounds	g	1 801,0	127,1	319,7	21,5	1 212,8	3 482
Emissions to soil							
Hydrocarbon (oils)	g	155	0,2	1,2	8,1	2,0	167

Tabella 44: LCI emulsione bituminosa [44]

Seguono i calcoli effettuati per poter inserire i dati in PaLATE.

Emulsione bituminosa	
CO [g/shton]	622,8
Pb [g/shton]	2,16E-04
NO_x [g/shton]	711,2
SO_2 [g/shton]	585,1
PM_{10} [g/shton]	191,4
Hg [g/shton]	3,08E-05
Consumo acqua [g/shton]	1221509,9
GWP [g/shton]	161906,9
GER [MJ/shton]	2445,0

Tabella 45: Fattori di emissione emulsione bituminosa

Per il calcolo del GER (Gross Energy Requirement) sono stati considerati i seguenti poteri calorifici: Natural gas 52,3 MJ/kg, Crude oil 44,5 MJ/kg, Coal 32,45 MJ/kg, Uranium 500000 MJ/kg.

5.3.5 Life Cycle Inventory - Cemento

I dati di inventario del cemento sono stati reperiti dalla Portland Cement Association [46] che mette a disposizione un inventario chiamato "Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture". Questo documento rappresenta un

quadro completo delle emissioni dovute alla produzione del cemento Portland e il suo utilizzo è consigliato per condurre una valutazione del ciclo di vita di strutture in calcestruzzo e altre strutture contenenti cemento. L'unità funzionale considerata è una massa unitaria di cemento Portland. Il confine del sistema parte dalle operazioni di cava, coprendo tutti i processi di macinazione fino ad arrivare al trasporto associato a tutte le attività intermedie di produzione.

I risultati dell' LCI sono presentati per quattro processi del cementificio (umido, molto asciutto, secco con preriscaldatore e secco con preriscaldatore e precalcinatore) e per un valor medio ponderato di questi processi. La differenza principale di questi processi è il consumo di energia.

Classificazione dei cementi (UNI EN 197-1)

I cementi comuni sono classificati in cinque tipologie secondo la norma UNI EN 197-1[47], ogni tipologia è caratterizzata da una percentuale decrescente di clinker che è il costituente principale, sono raggruppati come segue:

- **CEM I Cemento Portland**: costituiti per almeno il 95% da clinker e dallo 0-5% da costituenti minori. Utilizzati nella realizzazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi;
- **CEM II Cemento Portland Composito**: hanno come costituenti principali oltre al clinker, in percentuale variabile tra il 65-94%, le loppe granulate d'altoforno, la silica fume, le pozzolane, le ceneri volanti, scisti calcinati e calcare. Hanno proprietà simili ai CEM I e sono utilizzati per calcestruzzi armati semplici e precompressi;
- **CEM III Cemento d'altoforno**: costituiti da clinker fino al 64%, e loppa granulata basica d'altoforno che può variare tra il 36-95% e in base ad essa sono individuati tre sottotipi. I CEM III sono utilizzati in situazioni in cui il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi e per la realizzazione di opere di grandi dimensioni;
- **CEM IV Cemento Pozzolanico**: costituito da clinker tra il 45-89%, e materiale pozzolanico naturale o artificiale. In base alla percentuale di materiale pozzolanico che varia tra l'11-55% sono individuati due sottotipi. Presentano una elevata resistenza agli attacchi chimici;
- **CEM V Cemento Composito**: costituiti da una miscela di clinker, loppa d'altoforno e pozzolana e sono adatti a a realizzare calcestruzzi esposti ad ambienti mediamente aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, ecc.. .

Nella classificazione dei cementi tradizionali (UNI EN 197-1), compaiono delle sigle che rappresentano i costituenti minerali presenti oltre al clinker.

Componenti		Sigla	Caratteristiche
Clinker di cemento Portland		K	Sviluppa forte calore di idratazione e presenta bassa resistenza agli attacchi chimici. Contribuisce alla resistenza meccanica in tempi brevi (2-7 giorni).
Loppa d'altoforno		S	Diversamente dalla pozzolana ha la caratteristica di indurire, sia pure lentamente, anche in assenza di calce. Sviluppa, rispetto al clinker, minore calore di idratazione.
Pozzolana	naturale	P	Sviluppa, rispetto al clinker, minore calore di idratazione; ha buona resistenza agli attacchi chimici.
	industriale	Q	È una scoria vetrosa della lavorazione di leghe metalliche non-ferrose, non impiegata in Italia.
Ceneri volanti	silicee	V	Sono polveri recuperate dai fumi di combustione delle centrali termoelettriche. È disponibile in Italia la cenere volante di tipo siliceo (dalla combustione del carbone); non è disponibile quella di tipo calcico (dalla combustione della lignite).
	calciche	W	
Scisti calcinati		T	Sono residui della torrefazione di scisti argillosi impregnati di bitume, non impiegati in Italia.
Calcare		L	Unico costituente privo di caratteristiche idrauliche, produce cementi di granulometria fine e con minore percentuale di clinker, riducendo il calore di idratazione.
Microsilice		D	Sottoprodotto del processo produttivo del silicio metallico o delle leghe metalliche ferro-silicio, si presenta in polvere finissima. È usata più spesso come additivo del calcestruzzo.
Filler		F	Materiali inorganici naturali o artificiali finissimi, funzionano come *riempitivi*, migliorando la lavorabilità degli impasti.

Figura 27: Costituenti minerali dei vari tipi di cemento

Nella tabella seguente viene riportata la classificazione dei cementi, la loro denominazione e la loro composizione in conformità alla norma UNI EN 197-1 [47].

Tipo di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno granulata	Microsilice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti secondari
			K	S	D	naturale P	industriale Q	silicica V	calcica W	T	L	
I	Cemento Portland	I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
II	Cemento Portland alla loppa	II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
		II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
		II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
	Cemento Portland al calcare	II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Cemento Portland composito	II/A-M	80-94					6-20 (b)				
		II/B-M	65-79					21-35 (b)				
III	Cemento d'altoforno	III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	0-5
IV	Cemento pozzolanico	IV/A	65-89	–			11-35		–	–	–	0-5
		IV/B	45-64	–			36-55		–	–	–	0-5
V	Cemento composito	V/A	40-64	18-30	–		18-30		–	–	–	0-5
		V/B	20-39	31-50	–		31-50		–	–	–	0-5

Figura 28: Tipologie di cementi e composizione (UNI EN 197-1)

Ogni sottotipo di cemento comune (UNI EN 197-1) può essere suddiviso in

tre diverse classi di resistenza indicate da una sigla alfanumerica. Ad esempio: 32.5 N, 42.5 N, 52.5 N. I numeri indicano la resistenza meccanica a compressione minima (N/mm^2) misurata a 28 giorni, detta resistenza normalizzata (N). Nei cementi a rapido indurimento i numeri che indicano la classe di resistenza sono seguiti dalla lettera "R", che indica la capacità del cemento di raggiungere (oltre alla resistenza normalizzata) una prefissata resistenza alle brevi stagionature, in genere ottenuta dopo due giorni (sette giorni per i CEM I).

I materiali di input considerati per la produzione di cemento sono: materiali primari che contribuiscono direttamente al processo o alle prestazioni del prodotto (calcare, carbone..) e materiali ausiliari che vengono utilizzati nel processo ma hanno un contributo minore (mezzi refrattari e di macinazione..) [46].

Sebbene l'acqua non contribuisca al prodotto, è considerata una materia prima perché viene utilizzata in quantità notevolmente elevate. Vengono considerate le voci "Water process" e "Water non-process". L'acqua di processo è utilizzata per produrre impasti nel processo a umido e nel processo semi-secco, mentre l'acqua di non processo comprende l'acqua usata per il raffreddamento a contatto e senza contatto, per i fanghi di discarica di polveri di forni da cemento e abbattimento delle polveri.

	Wet	Long dry	Preheater	Precalciner	Average
Cement raw material	**lb/ton of cement**				
Limestone	2,455	2,523	2,273	2,255	2,329
Cement rock, marl	538	262	141	499	414
Shale	130	26	45	135	104
Clay	125	69	200	108	119
Bottom ash	20	38	10	18	20
Fly ash	35	45	15	23	27
Foundry sand	0	21	10	5	8
Sand	114	72	73	76	81
Iron, iron ore	17	30	32	28	27
Blast furnace slag	50	77	68	18	40
Slate	14	0	0	0	2
Other raw material	6	58	118	47	53
Total raw meal*	**3,505**	**3,222**	**2,985**	**3,211**	**3,225**
Gypsum, anhydrite	113	85	99	95	97
Water, process	969	0	14	28	177
Water, non-process	1,148	2,266	2,267	1,183	1,505

Tabella 46: Consumo d'acqua per la produzione di una tonnellata corta di cemento [46]

Per i consumi energetici, in particolare elettricità e combustibile si è fatto riferimento alle tabelle seguenti. Il consumo di elettricità è espresso in kWh su tonnellata corta di cemento, mentre il consumo in termini energetici è espresso in GJ su tonnellata metrica di cemento.

	Wet	Long dry	Preheater	Precalciner	Average
Fuel and electricity	**Fuel or electricity unit/ton of cement**				
Coal, ton	0.121	0.106	0.117	0.101	0.107
Gasoline, gallon	0.0834	0.0118	0.0255	0.0233	0.0319
Liquefied petrol. gas, gallon	0	0.0096	0.0010	0.0035	0.0034
Middle distillates, gallon	0.171	0.160	0.193	0.326	0.255
Natural gas, 1000 ft^3	0.066	0.171	0.120	0.232	0.178
Petroleum coke, ton	0.0326	0.0528	0.0139	0.0134	0.0223
Residual oil, gallon	0.0043	0.0131	0	0.0150	0.0106
Wastes, ton	0.0634	0.0080	0.0037	0.0103	0.0177
Electricity, kWh	125	136	136	130	131

Tabella 47: Consumo di elettricità [46]

	Wet	Long dry	Preheater	Precalciner	Average
Energy source	**GJ/metric ton of cement**				
Coal	3.165	2.780	3.064	2.658	2.823
Gasoline	0.0121	0.0017	0.0037	0.0034	0.0046
Liquefied petroleum gas	0	0.0011	0.0001	0.0004	0.0004
Middle distillates	0.0277	0.0258	0.0311	0.0526	0.0412
Natural gas	0.0786	0.203	0.143	0.276	0.212
Petroleum coke	1.145	1.850	0.488	0.471	0.783
Residual oil	0.0008	0.0023	0	0.0026	0.0018
Wastes	1.476	0.187	0.087	0.240	0.412
Electricity	0.495	0.541	0.540	0.517	0.520
Total	**6.400**	**5.591**	**4.357**	**4.220**	**4.798**

Tabella 48: Consumi energetici [46]

In riferimento alla tabella sopra, oltre ai consumi energetici classici tipo elettricità, benzina, carbone.., sono considerati anche combustibili provenienti da fonti di scarto come rifiuti derivanti da pneumatici, rifiuti post-industriali, rifiuti soli ecc.. . Nel documento viene riportato che il 55% degli impianti in genere utilizza queste tipologie di rifiuti come combustibile.

Le emissioni nell'aria dovute alla produzione di cemento sono correlate ad ogni singola attività in ciascuna delle fasi del processo. La totalità delle emissioni nell'aria sono riportate di seguito, la tabella fa riferimento alla produzione di una tonnellata corta di cemento.

	Wet	Long dry	Preheater	Precalciner	Average
Emission	**lb/ton of cement**				
Particulate matter, total	5.25	4.92	4.14	4.64	4.70
Particulate matter, PM-10	0.648	0.575	0.531	0.598	0.593
Particulate matter, PM-2.5	1.98E-04	1.82E-04	1.69E-04	1.81E-04	1.82E-04
CO_2	2,200	2,010	1,700	1,750	1,850
SO_2	7.76	9.60	0.544	1.08	3.32
NO_x	7.16	5.87	4.70	4.20	5.01
VOC	0.132	0.0372	0.0256	0.130	0.100
CO	0.249	0.293	1.04	3.68	2.21
CH_4	0.112	0.0222	0.00859	0.105	0.0791
NH_3	0.00943	0.00958	0.00950	0.00952	0.00951
HCl	0.086	0.11	0.26	0.13	0.14
Hg	1.10E-04	1.67E-04	5.38E-05	1.39E-04	1.25E-04
Dioxins and furans, TEQ	1.90E-07	1.10E-06	7.10E-09	2.00E-07	2.98E-07

Tabella 49: Emissioni totali disperse nell'aria [46]

Cemento Portland	
CO_2 [g/shton]	839036,0
CO [g/shton]	1002,3
CH_4 [g/shton]	35,9
NO_x [g/shton]	2272,2
SO_2 [g/shton]	1505,7
PM_{10} [g/shton]	268,9
Hg [g/shton]	0,1
Consumo acqua [g/shton]	762842,5
GWP [g/shton]	839932,9
GER [MJ/shotn]	4352,7
Elettricità [kWh/shton]	131

Tabella 50: Fattori di emissione cemento

$$Wat.Cons. = (177 + 1505)\left[\frac{lb}{shton}\right] \cdot 453,33\left[\frac{g}{lb}\right] = 762842,5\frac{g}{shton} \tag{58}$$

$$GWP = (1850 + 25 \cdot 0,0791)\left[\frac{lb}{shton}\right] \cdot 453,33\left[\frac{g}{lb}\right] = 839932,9\frac{g}{shton} \tag{59}$$

$$GER = \frac{4,78\left[\frac{GJ}{tonne}\right] \cdot 1000\left[\frac{MJ}{GJ}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 4352,7\frac{MJ}{shton} \tag{60}$$

5.3.6 Life Cycle Inventory - Aggregati vergini

Gli indicatori GER e GWP sono stati valutati attraverso l'articolo di Blengini e Garbarino [48, 49]nel quale è stato eseguito uno studio di pianificazione e gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione (C&D) nella provincia di Torino, i dati forniti si riferiscono ad 1 tonnellata di aggregati. Nei due documenti si

fa un confronto tra l'utilizzo di aggregati vergini e riciclati, nel caso in esame sono stati presi i dati relativi agli aggregati vergini. I valori che seguono sono stati ricavati da un'analisi del ciclo di vita che parte dal processo di estrazione delle materie fino al momento in cui il materiale estratto e prodotto uscirà dall'impianto per essere trasportato verso i diversi fornitori (from cradle to gate - dalla culla al cancello). Gli indicatori considerati per gli aggregati vergini sono GER, GWP, consumo d'acqua e di elettricità.

Impatti ambientali potenziali (dati per 1 tonnellata)	Unità	AN (cava sottofalda)	AR (impianto mobile)	AR (impianto fisso)
Consumo di energia primaria (GER)	MJ	67.7	40.8	76.3
Global warming (CO_2 eq.)	kg	4.6	2.8	5.5
Acidificazione (moli H+ eq.)	moli	1.7	1.1	2.34
Eutrofizzazione (O_2 eq.)	kg	0.32	0.23	0.49
Smog fotochimico (C_2H_4 eq.)	g	0.06	0.04	0.08
Produzione di rifiuti	kg	0.03	-	-

Tabella 51: GWP e GER per la produzione di una tonnellata di aggregati vergini [48]

Il consumo di acqua e di elettricità sono stati ricavati dall'articolo di Angela Farina et al. [50]pari rispettivamente a 2,3 m^3/ton e 5,3 kWh/ton.

Aggregati vergini	
CO_2 [g/shton]	-
CO [g/shton]	-
CH_4 [g/shton]	-
NO_x [g/shton]	-
SO_2 [g/shton]	-
PM_{10} [g/shton]	-
Hg [g/shton]	-
Consumo acqua [g/shton]	2086527,4
GWP [g/shton]	4173,1
GER [MJ/shotn]	61,4
Elettricità [kWh/shton]	4,8

Tabella 52: Fattori di emissione aggregati vergini

$$Wat.Cons. = 2,3\left[\frac{m^3}{tonne}\right] \cdot \frac{10^6}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 2086527,4\frac{g}{shton} \tag{61}$$

$$GWP = \frac{4,6\left[\frac{kg}{tonne}\right] \cdot 1000\left[\frac{g}{kg}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 4173,1\frac{g}{shton} \tag{62}$$

$$GER = \frac{67,7\left[\frac{MJ}{tonne}\right]}{1,10231\left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 61,4\frac{MJ}{shton} \tag{63}$$

5.3.7 Life Cycle Inventory - Calce

L'industria della calce gioca un ruolo importante in Europa e ricopre una vasta gamma di applicazioni. Tradizionalmente è utilizzata nel settore dell'agricoltura, nel trattamento e la stabilizzazione dei terreni inquinati, per i processi di trattamento delle acque reflue. Utilizzata in maniera rilevante anche nelle industrie manifatturiere, dalla produzione di acciaio a materiali da costruzione ad alte prestazioni come ad esempio nel campo degli ingegneria civile. Nel settore delle costruzioni e dell'edilizia i prodotti a base di calce sono utilizzati come riempitivo e legante, ad esempio nei materiali da costruzione leggeri, mattoni di sabbia e calce e nelle malte. Nel campo dell'ingegneria civile la calce è utilizzata per fornire stabilità, durabilità e incrementare la sostenibilità dei progetti; l'utilizzo della calce è utilizzato anche nei conglomerati bituminosi a caldo per aumentare la durabilità.

La produzione di calce richiede energia e porta emissioni di CO_2. La maggiore energia è principalmente usata nella fase di calcinazione. Al 2010 il consumo medio di combustibile era di 4,25 GJ su tonnellata di calce viva prodotta [51]. Nel processo di produzione della calce, la fase di calcinazione ha l'intensità energetica più alta, l'efficienza energetica delle operazioni del forno ha un grande impatto sull'efficienza energetica complessiva e quindi sulle emissioni relative alla produzione di calce. L'efficienza energetica del forno dipende dalla tipologia di forno (verticale, orizzontale, altre tipologie) ma anche da:

- tipologia di calce;
- granulometria;
- umidità;
- combustibile;
- contenuto residuo di CO_2 nel prodotto di calce.

Il consumo minimo teorico di energia nel forno è di 3,18 GJ per tonnellata di CaO prodotta. La tabella seguente mostra la gamma di utilizzo del calore per i sei più importanti tipi di forni (JRC, 2013 (BREF)). Si può notare come i forni verticali (PFRK, ASK e MFSK) sono più efficienti di quelli orizzontali (LRK e PRK).

Kiln orientation:	Kiln type:	Heat use/consumption for quicklime production (GJ/tonne):
Vertical	Parallel flow regenerative kilns (PFRK)	3.2[41]-4.2
	Annular shaft Kilns (ASK)	3.3-4.9
	Mixed Feed Shaft Kilns (MFSK)	3.4-4.7
Horizontal	Long Rotary Kilns (LRK)	6.0-9.2
	Rotary Kilns with preheater (PRK)	5.1-7.8
Other Kilns		3.5-7.0

Tabella 53: Consumi energetici per la produzione di 1 tonnellata di calce [51]

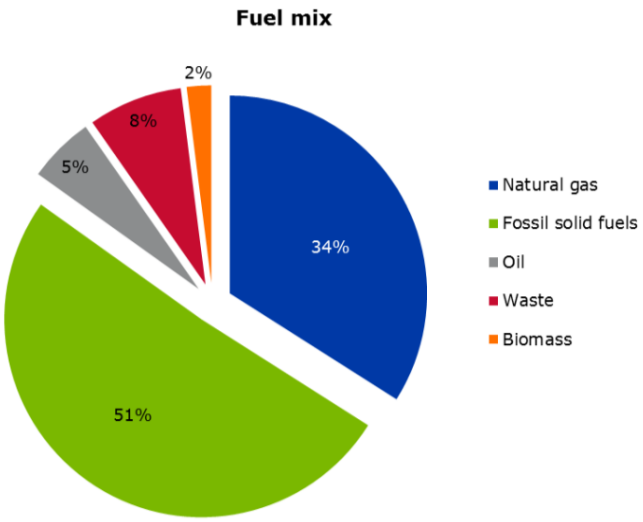


Figura 29: Fuel mix [51]

La maggior parte del consumo di energia nel processo di produzione della calce è il calore richiesto nel forno durante la fase di calcinazione. Questa energia proviene da combustibili fossili (gas naturale, combustibili solidi fossili e petrolio) o da rifiuti e biomassa. La Figura sopra mostra l'uso di energia per ciascuno di questi tipi di combustibile [51]. Il consumo di elettricità nella produzione di calce è piccolo, dell'ordine di grandezza di ±60 kWh/tonnellata di prodotto di calce (circa il 5% dell'uso totale di energia).

Per generare l'energia per il processo di produzione della calce, vengono bruciati combustibili fossili. La combustione di combustibili fossili causa emissioni di CO_2. La maggior parte delle emissioni derivanti dalla combustione di combustibili fossili ha origine nei forni, il resto delle emissioni di CO_2 relativi agli altri processi di produzione sono trascurabili in quanto relativamente piccoli rispetto alle emissioni causate dal forno.

- Le emissioni durante la lavorazione a valle e l'idratazione rappresentano circa l'1,5% delle emissioni totali di CO_2;
- Le emissioni durante l'estrazione e la preparazione della pietra rappresentano circa lo 0,7% delle emissioni totali di CO2.

Lime product	Process emissions (tonne CO_2 per tonne lime product)	Combustion emissions (tonne CO_2 per tonne lime product)	Electricity emissions (tonne CO_2 per tonne lime product)	Total emissions (tonne CO_2 per tonne lime product)
Quicklime	0.751	0.322	0.019	1.092
Dolime	0.807	0.475		1.301
Sintered dolime	0.913	0.635		1.567

Tabella 54: Emissioni totali di CO_2 per la produzione di una tonnellata di calce [51]

Calce	
CO_2 [g/shton]	-
CO [g/shton]	-
CH_4 [g/shton]	-
NO_x [g/shton]	-
SO_2 [g/shton]	-
PM_{10} [g/shton]	-
Hg [g/shton]	-
Consumo acqua [g/shton]	-
GWP [g/shton]	990646,9
GER [MJ/shotn]	6740,4
Elettricità [kWh/shton]	54,4

Tabella 55: Fattori di emissione calce

$$GWP = \frac{1,902 \left[\frac{tonne\, CO2_{eq}}{tonne}\right] \cdot 10^6 \left[\frac{g}{tonne}\right]}{1,10231 \left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 990646,9 \frac{g}{shton} \tag{64}$$

$$GER = \frac{(4,25 + 3,18) \left[\frac{MJ}{tonne}\right]}{1,10231 \left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 6740,4 \frac{MJ}{shton} \tag{65}$$

5.3.8 Life Cycle Inventory - Acqua

Per determinare le emissioni dovute alla produzione alla totalità dei processi di fornitura d'acqua si è fatto riferimento al documento americano di Stokes [52]. Un estratto del documento è riportato nella tabella seguente, dove vengono riportate differenti fonti di distribuzione di acqua, nel caso in esame si è fatto riferimento alla voce IMP (imported water).

water source	energy (MJ/m^3)	GHG (g CO_2 equiv/m^3)	NO_x (g/m^3)	PM (g/m^3)	SO_x (g/m^3)
imported water (IMP)	18	1093	1.9	0.40	2.9
desalinated ocean water, conventional pretreatment (DC)	42	2465	3.4	0.77	6.9
desalinated ocean water, membrane pretreatment (DM)	41	2395	2.9	0.71	9.4
desalinated brackish groundwater (DBG)	27	1628	2.0	0.41	4.2
recycled water (REC)	17	1023	1.0	0.48	2.9

Tabella 56: LCI acqua

Acqua	
CO_2 [g/shton]	-
CO [g/shton]	-
CH_4 [g/shton]	-
NO_x [g/shton]	1,7
SO_2 [g/shton]	2,6
PM_{10} [g/shton]	-
Hg [g/shton]	-
Consumo acqua [g/shton]	-
GWP [g/shton]	991,6
GER [MJ/shotn]	16,3
Elettricità [kWh/shton]	-

Tabella 57: Fattori di emissione acqua

$$GWP = 1093 \left[\frac{g}{m^3}\right] \cdot \frac{1 \left[\frac{Mg}{m^3}\right]}{1,10231 \left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 991,5 \frac{g}{shton} \tag{66}$$

$$GER = 18 \left[\frac{MJ}{m^3}\right] \cdot \frac{1 \left[\frac{Mg}{m^3}\right]}{1,10231 \left[\frac{shton}{tonne}\right]} = 16,3 \frac{MJ}{shton} \tag{67}$$

5.3.9 Life Cycle Inventory - Produzione diesel

I dati relativi alla produzione del diesel sono stati reperiti dallo tesi di Federica Zuccalà [36] e fanno riferimento alla produzione di 1 kg di diesel. Il consumo d'acqua è stato ricavato da Sun et al. [53] e fa riferimento alla produzione di 1 gallone di diesel.

Produzione diesel	
CO [g/shton]	694,5
Pb [g/shton]	1,51E-01
NO_x [g/shton]	2055,7
SO_2 [g/shton]	2752,4
PM_{10} [g/shton]	199,1
Hg [g/shton]	2,37E-02
Consumo acqua [g/shton]	327092,0
GWP [g/shton]	543404,3
GER [MJ/shton]	44179,9

Tabella 58: Fattori di emissione produzione diesel

$$Wat.Cons = \frac{0,3 \left[\frac{gal_w}{gal_g}\right] \cdot 3,785 \left[\frac{l}{gal_w}\right] \cdot 1 \left[\frac{kg}{l}\right] \cdot 10^3 \left[\frac{g}{kg}\right]}{6,943 \left[\frac{lb}{gal_g}\right] \cdot 0,0005 \left[\frac{shton}{lb}\right]} = 327092 \frac{g}{shton} \tag{68}$$

$$GWP = \frac{0,599\left[\frac{kg}{kg}\right] \cdot 1000\left[\frac{g}{kg}\right]}{1,10231E-03\left[\frac{shton}{kg}\right]} = 543404,3\frac{g}{shton} \tag{69}$$

$$GER = \frac{48,70\left[\frac{MJ}{kg}\right]}{1,10231E-03\left[\frac{shton}{kg}\right]} = 44179,9\frac{MJ}{shton} \tag{70}$$

5.3.10 Life Cycle Inventory - Attrezzature

Nella sezione seguente viene riportato un inventario di tutti i mezzi considerati nell'analisi e le principali caratteristiche di ognuno. La maggior parte dei mezzi utilizzati, in assenza di fonti più precise, sono stati reperiti dal foglio "Equipment Details"in PaLATE, mentre il Pulvimixer utilizzato per la miscelazione di sludge con clace e il mezzo utilizzato per la stesa dell'emulsione bituminosa si è fatto riferimento all'inventario presente nel documento di Celauro [57].

Mezzi di trasporto	Macchina	Energia [MJ/l]	Capacità [Mg]	Efficienza carburante [l/km]
Trasporto agg, pol, ecc	Dump Truck	35,83	20,0	0,42
Trasporto cemento/bitume	Tanker Truck	35,83	20,0	0,42

Tabella 59: Mezzi di trasporto

Operazione	Macchina	Modello/Produttore	Potenza motore [hp]	Produttività	Consumo carburante [l/h]
Compattazione strati CB	Rullo gommato	Dynapac CP134	100	884 [shton/h]	25,1
Compattazione strati CB	Rullo metallico	Ingersol rand DD110	125	285 [shton/h]	32,7
Stesa degli strati legati con bitume	Vibrofinitrice	Dynapac F25C	126	1700 [shton/h]	31,6
Stesa emulsione bituminosa	Spargitore di legante	Wirtgen SW16MC	360	150 [m^3/h]	2
Compattazione terreno/misto cementato	Vibr. Soil compactor	Dynapac CA262D	174	1832	27,6
Carico calce	Pala caricatrice	John Deere 644E	160	490 [shton/h]	40,1
Miscelazione della sludge con calce	Soil Stabilizer Pulvimixer	Wirtgen WR240i	600	800 [m^3/h]	80
Stesa miscele SC-CBM	Mixer truck	Volvo Xpeditor	305	19 [shton/trip]	0,2

Tabella 60: Mezzi usati per le lavorazioni

5.4 Life Cycle Cost

Per definire i costi unitari dei materiali da costruzione utilizzati e inserirli in PaLATE si è fatto riferimento al Prezzario 2020 della Regione Piemonte [54]. Nell'Allegato B sono presenti diverse sezioni contrassegnate da un numero dove sono elencati i prezzi unitari per ogni categoria trattata. Per ogni materiale considerato vi è il numero che indica la sezione, un codice caratteristico, una breve descrizione, il prezzo unitario ed eventuali note aggiuntive.

I fattori che entrano in gioco nell'analisi dei costi su PaLATE sono volumi, densità e costi unitari dei singoli materiali (€/m^3). Per alcuni materiali è stato necessario convertire le voci di costo in euro al metro cubo in quanto il prezzario le riporta rispetto all'unità di peso. Successivamente tutte le voci di costo considerate sono state convertite in dollari su iarde cubiche ed inserite come valori di default in PaLATE.

Aggregati vergini

Il costo unitario degli aggregati è stato calcolato attraverso una media dei costi di sabbia, pietrischetto e pietrisco ed è pari a 24,6 €/m^3.

01	01.P03.A10.010	sabbia	m³	29,45
01	01.P03.A10.020	pietrischetto	m³	22,88
01	01.P03.A10.030	pietrisco	m³	21,56

Tabella 61: Costo aggregati vergini

Cemento

Il costo del cemento (CEM R42,5 - UNI EN 197-1) è fornito dal prezzario 2020 della Regione Piemonte ed è espresso in €/quintale. Per definire il costo per unità di volume del cemento è stato necessario considerare il peso specifico dello stesso, pari a 3150 kg/m^3, il costo al finale è pari a 338,6 €/m^3.

01	01.P02.A05	Cementi comuni conformi alla norma UNI EN 197-1		
01	01.P02.A05.015	sfuso, tipo 42,5 R	q	10,75

Tabella 62: Costo cemento

Bitume

Il costo del bitume è stato reperito dal prezzario 2020 della Regione Piemonte ed è espresso in €/kg. Anche in questo caso la voce di costo è stata convertita in euro al metro cubo e successivamente in dollari su iarde cubiche. La densità del bitume considerato è pari a 1050 kg/m^3, il costo finale è pari a 535,5 €/m^3.

01	01.P10.A50	Bitume semisolido in cisterna fornito a pie' d'opera per pavimentazioni stradali		
01	01.P10.A50.010	Con penetrazione 50/80	kg	0,51

Tabella 63: Costo bitume

Acqua

Il costo dell'acqua per usi industriali, comprese ulteriori spese dovute alla depurazione e allacciamento ad acquedotto od altra fonte è stato identificato sul prezzario 2020 della Regione Piemonte.

25	25.P05.D40	Acqua		
25	25.P05.D40.010	Fornitura di acqua per usi industriali presso cantiere di lavoro comprese le spese per allacciamento ad acquedotto od altra fonte, in questo caso compresa la depurazione, per il confezionamento di calcestruzzi o per altri usi.	m³	1,37

Tabella 64: Costo acqua

RAP

Essendo il RAP un materiale interamente riciclato, esso non ha un costo di produzione. Pertanto si è scelto di attribuire al RAP il costo del diesel utilizzato per il trattamento del materiale.

Terreno per riempimento

Il terreno utilizzato nella sezione CS per il riempimento dello strato inferiore è appartenente al gruppo A1-a. Il costo è stato identificato sul prezzario regionale del Piemonte 2020. Il costo considerato è dovuto alla fornitura (per cave con distanze minore di 5 km) e per la formazione dello strato per un totale di 19,3 €/m^3.

25	**25.A02.A35**	**Fornitura materiali per rilevati da cave con distanza < 5 KM. Fornitura in cantiere di materiali per la formazione di rilevati provenienti da cave di prestito, appartenenti ai gruppi A.1a, A.2-4, A.2-5, A.3; compresa la cavatura, l'indennita' di cava, il carico, il trasporto e lo scarico del materiale e tutti gli altri oneri indicati nelle norme tecniche. Il trasporto deve intendersi fino alla distanza di 5 km misurati sul percorso stradale, sia su piste di cantiere che su strade pubbliche di qualunque tracciato plano-altimetrico, dalla cava dal punto medio del cantiere inteso come baricentro dei rilevati.**		
25	**25.A02.A35.005**	**Per la formazione dei rilevati**	**m³**	**11,34**
25	25.A02.A35.010	Per riempimento di cavi ovvero per precariche	m³	2,69
25	**25.A02.A57**	Formazione di rilevato stradale gruppi A1, A2-4, A2-5, A3. Sistemazione in rilevato o in riempimento di materiali idonei come da norme tecniche appartenenti ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 ovvero di frantumati di roccia o smarino di galleria, mediante idonea compattazione del piano di posa nei tratti in trincea con rullo vibrante e livellamento con idoneo mezzo		
25	**25.A02.A57.005**	**con inerte naturale per rilevato, da cave**	**m³**	**7,99**

Tabella 65: Costo terreno

Calce

La calce è stata utilizzata per trattare preventivamente i fanghi minerali (sludge) utilizzati per le miscele SC-CBM e il suo costo è stato reperito dal documento EuLA 2014 [51]. Nel contesto Europeo la calce ha un prezzo che va da 55 a 70 €/ton, nel nostro caso stato scelto il valore di 55 €/ton, successivamente è stato convertito in €/m^3 ed è stata considerata una densità di 3340 kg/m^3, il prezzo finale è di 183,7 €/m^3.

Polimero e additivo

Il polimero utilizzato per gli strati in conglomerato bituminoso è del tipo "Superplast" fornito da Iterchimica S.r.l ed ha un costo di 1,32 €/kg, mentre l'addivito utilizzato per le miscele SC-CBM è un supefluidificante di nuova generazione a basso dosaggio denominato "AdvaFlow 455" e ha un prezzo di 1,92 €/kg.

Emulsione bituminosa

25	25.A15.A83	Provvista e stesa di emulsione bituminosa al 55% di bitume in ragione di		
25	25.A15.A83.005	kg 1,000/mq per eventuale ancoraggio dello strato di base sullo strato di fondazione in misto cementato	m²	0,67

Tabella 66: Costo emulsione bituminosa al m^2

Fondazione in misto cementato (CBM)

Il costo al metro cubo per la realizzazione dello strato di fondazione in misto cementato è stato preso dal prezzario regionale 2020 della Regione Piemonte.

25	25.A15.A05	Strato di fondazione in misto cementato		
25	25.A15.A05.005	Strato di fondazione in misto cementato, di qualsiasi spessore, costituito da una miscela (inerti, acqua, cemento) di appropriata granulometria, il tutto corrispondente alle prescrizioni delle norme tecniche, compreso l'onere del successivo spandimento sulla superficie dello strato di una mano di emulsione bituminosa nella misura di un kg/m² , saturata da uno strato di sabbia; compresa la fornitura dei materilai, prove di controllo in sito, lavorazione e costipamento dello strato con idonee macchine ed ogni altro onere, misurato a costipamento avvenuto.	m³	45,92

Tabella 67: Costo fondazione in misto cementato

Strati in conglomerato bituminoso

Per gli strati in conglomerato bituminoso è stata eseguita una media pesata sui volumi degli strati di base, binder e usura tale da ottenere un valore univoco e poi inserirlo in PaLATE. Il prezzo considerato è 140,5 €/m^3.

25	25.A15.A10	Conglomerato bituminoso per strato di base come da norme tecniche, compreso ogni onere, misurato dopo compattazione.		
25	25.A15.A10.005	Per ogni m³ di conglomerato compattato in opera e per qualsiasi spessore	m³	128,30

Tabella 68: Costo strato di base in CB

25	25.A15.A15	Provvista e stesa di conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder)come da norme tecniche. Steso con vibrofinitrice ed assetto variabile a perfetta regola d'arte secondo la vigente normativa e le eventuali indicazione della direzione lavori, compresa la cilindratura con rullo statico o vibrante con idoneo effetto costipante, misurato dopo compattazione. Esclusa eventuale fornitura e stesa di emulsione per mano di attacco		
25	25.A15.A15.005	Per ogni m³ di conglomerato compattato in opera e per qualsiasi spessore	m³	143,58

Tabella 69: Costo strato di binder in CB

25	25.A15.A20	Provvista e stesa diconglomerato bituminoso per tappeto di usura come da norme tecniche. Steso con vibrofinitrice ad assetto variabile a perfetta regola d'arte secondo la vigente normativa e le eventuali indicazioni della direzione lavori, compresa la cilindratura con rullo statico o vibrante con idoneo effetto costipante, misurato dopo compattazione. Esclusa fornitura e stesa i emulsione per mano di attacco.		
25	25.A15.A20.005	Per ogni m³ di conglomerato compattato in opera e per qualsiasi spessore	m³	167,38

Tabella 70: Costo strato di usura in CB

Riempimento e fondazione in SC-CBM

Il costo per la realizzazione e la posa dello strato di riempimento con una quantità di cemento pari a 60 kg/m^3 è di 40 €/m^3. Per determinare il costo della fondazione avente una quantità maggiore di cemento pari a 100 kg/m^3 è stata effettuata una proporzione per determinare il prezzo esatto, ottenendo un valore di 66,7 €/m^3.

Sezione GG

La sezione GG è costituita da un pacchetto di strati in conglomerato bituminoso (usura, binder, base), una fondazione in malta cementizia (SC-CBM) contenente materiali da riciclo con una dosaggio di cemento di 100 kg/m^3, uno strato di riempimento in malta cementizia con un dosaggio di cemento di 60 kg/m^3.

	[€/m^3]	[$/yd^3]
Conglomerato bituminoso per strato di base	140,5	130,0
Conglomerato bituminoso per strato di binder		
Conglomerato bituminoso per strato di usura		
Fondazione SC-CBM (cem 100 kg/m^3)	67	61,7
Riempimento SC-CBM (cem 60 kg/m^3)	40	37,0

Tabella 71: Costi per la stesa dei materiali della sezione GG

Sezione CG

La sezione CG è costituita da un pacchetto di strati in conglomerato bituminoso (usura, binder, base), una fondazione in misto cementato (CBM), uno strato di riempimento in malta cementizia (SC-CBM) con un dosaggio di cemento di 100 kg/m^3.

	[€/m^3]	[$/yd^3]
Conglomerato bituminoso per strato di base	140,5	130,0
Conglomerato bituminoso per strato di binder		
Conglomerato bituminoso per strato di usura		
Fondazione in misto cementato (CBM)	46	42,5
Riempimento SC-CBM (cem 100 kg/m^3)	66,7	61,7

Tabella 72: Costi per la stesa dei materiali della sezione CG

Sezione CS

La sezione CS è costituita da un pacchetto di strati in conglomerato bituminoso (usura, binder, base), una fondazione in misto cementato (CBM), uno strato di riempimento in terreno compattato.

	[€/m^3]	[$/yd^3]
Conglomerato bituminoso per strato di base	140,5	130,0
Conglomerato bituminoso per strato di binder		
Conglomerato bituminoso per strato di usura		
Fondazione in misto cementato CBM	45,9	42,5
Riempimento in terreno	19,3	17,9

Tabella 73: Costi per la stesa dei materiali della sezione CS

Infine, viene riportata una tabella riassuntiva con tutti i costi dei singoli materiali utilizzati nel caso studio e con le relative conversioni per poter essere inseriti nell'applicativo PaLATE.

Materiali utilizzati	UM	€	media	$/yd^3
Sabbia	[€/m^3]	29,5	24,6	22,8
Pietrischetto	[€/m^3]	22,9		
Pietrisco	[€/m^3]	21,6		
CEM I 42,5 R sfuso	[€/m^3]	338,6	-	313,3
Bitume 50/80	[€/m^3]	535,5	-	495,4
RAP	[€/m^3]	12,9	-	12,0
Strato di fondazione in misto cementato	[€/m^3]	45,9	-	42,5
Conglomerato bituminoso per strato di base	[€/m^3]	128,3	140,5	130,0
Conglomerato bituminoso per strato di binder	[€/m^3]	143,6		
Conglomerato bituminoso per strato di usura	[€/m^3]	167,4		
Emulsione bituminosa	[€/m^2]	0,7	-	-
Terreno per riempimento	[€/m^3]	19,3	-	17,9
Fondazione in SC-CBM (cem 100 kg/m^3)	[€/m^3]	66,7	-	61,7
Riempimento in SC-CBM (cem 60 kg/m^3)	[€/m^3]	40,0	-	37,0
Riempimento in SC-CBM (cem 100 kg/m^3)	[€/m^3]	66,7	-	61,7
Sludge	-	-	-	-
Polimero per CB	[€/m^3]	650		601,32
Calce (Quicklime)	[€/m^3]	183,7	-	170
Costo additivo per SC-CBM	[€/m^3]	2035,2		1882,79
Acqua	[€/m^3]	1,4	-	1,3

Tabella 74: Costi dei materiali utilizzati

6 Intepretazione dei risultati

Il seguente capitolo ha lo scopo di fornire un'intepretazione oggettiva dei risultati ottenuti per le diverse sezioni analizzate attraverso l'applicativo PaLATE. In particolare, gli output analizzati sono di tipo ambientale ed economico.

Risultati ambientali

Al fine di trarre delle conclusioni coerenti in termini ambientali e con le ricerche eseguite durante lo studio, si è deciso di analizzare solo una parte dei fattori di emissione considerati dall'applicativo PaLATE: consumo d'acqua, GWP (Global Warming Potential) e GER (Gross Energy Requirement). Tale scelta è giustificata dalle ricerche eseguite per la composizione dell'inventario (LCI) dei singoli materiali utilizzati nella trattazione.

Nella fase di ricerca dell'inventario sono state consultate diverse fonti di diversa provenienza, dopo un'attenta analisi si è scelto di considerare quelle che potessero rispecchiare al meglio il caso studio ed in particolare attinenti al contesto Europeo in maniera tale da non sovrastimare i risultati. Unica eccezione è stata fatta per l'inventario del cemento Portland e per quello relativo al consumo d'acqua [46, 52]che provengono dal contesto Americano, in assenza di fonti più vicine allo scenario Europeo si è scelto di utilizzare le suddette.

I risultati ambientali ottenuti sono sintetizzati nelle tabelle che seguono con le rispettive unità di misura.

	Consumo d'acqua [Mg]	GWP [Mg]	GER [MJ]
Material Production	21.104	147	1.789.440
Material Transportation	2	22	249.261
Processes	17	154	1.982.258
Totale	21.124	323	4.020.959

Tabella 75: Risultati ambientali sezione CS

	Consumo d'acqua [Mg]	GWP [Mg]	GER [MJ]
Material Production	15.609	932	8.259.061
Material Transportation	3,2	36	413.689
Processes	17	149	1.978.688
Totale	15.629	1.117	10.651.438

Tabella 76: Risultati ambientali sezione CG

	Consumo d'acqua [Mg]	GWP [Mg]	GER [MJ]
Material Production	13.184	920	8.730.698
Material Transportation	3	33	375.802
Processes	0,2	2	20.317
Totale	13.187	955	9.126.817

Tabella 77: Risultati ambientali sezione GG

I risultati espressi nelle tabelle precedenti sono di seguito riportati in forma grafica. La struttura dei grafici è stata suddivisa per ogni indicatore analizzato e per le rispettive fasi: produzione, trasporto, lavorazione.

Analizzando il consumo d'acqua è possibile notare come la sezione CS necessita di quantitativo nettamente superiore d'acqua per la realizzazione rispetto alle altre due sezioni. Tale risultato è dovuto principalmente alla produzione dei materiali, come ad esempio l'estrazione e la lavorazione degli aggregati vergini, la produzione del bitume, in particolar modo riveste un ruolo fondamentale il trattamento del terreno in fase di costipamento. Il consumo d'acqua delle sezioni CG e GG risulta essere minore ed è principalmente casuato dalla fase di produzione iniziale dei materiali e dal quantitativo richiesto nel mix - design (Tabelle 25, 27, 29, 31).

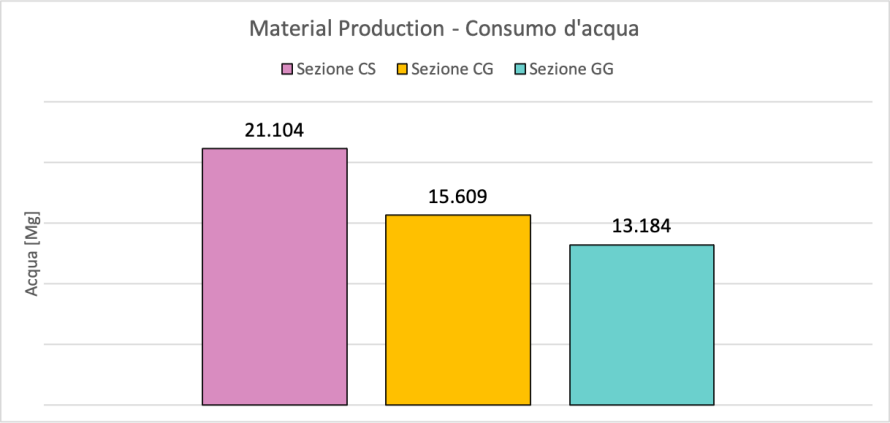


Figura 30: Material Production - Consumo d'acqua

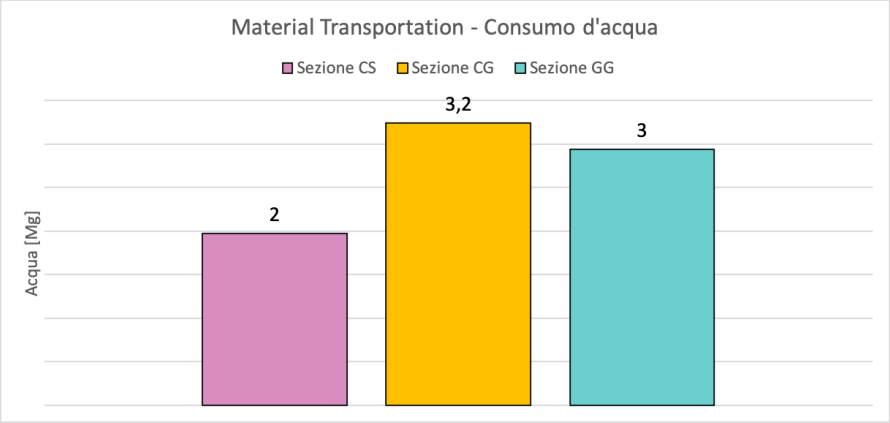


Figura 31: Material Transportation - Consumo d'acqua

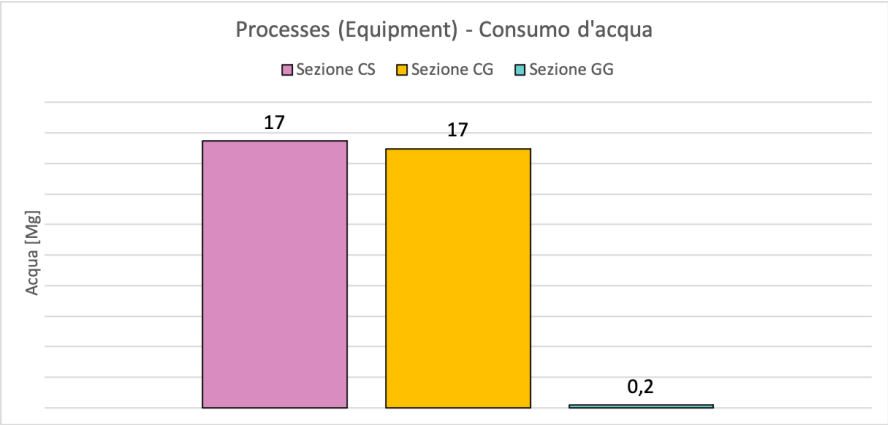


Figura 32: Processes (Equipment) - Consumo d'acqua

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) risulta nettamente maggiore nella fase di produzione dei materiali per le sezioni CG e GG, in entrambi i casi l'indicatore GWP è quasi sette volte quello della sezione CS. Nel calcolo dell'indicatore GWP, in particolare nella fase di trasporto dei materiali, è stato considerato il contributo ulteriore di CO_2 dovuto ai processi di combustione dei motori. Oltre alle emissione dovute di CO_2 dovute alla fase di costruzione iniziale, nello specifico sono stati considerati i litri di diesel necessari al trasporto del singolo materiale in esame (aggregati vergini, bitume, cemento, trattamento dei fanghi minerali con calce...), sono stati convertiti in kg di diesel e successivamente moltiplicati per il fattore di emissione CO_2 relativo alla produzione del diesel.

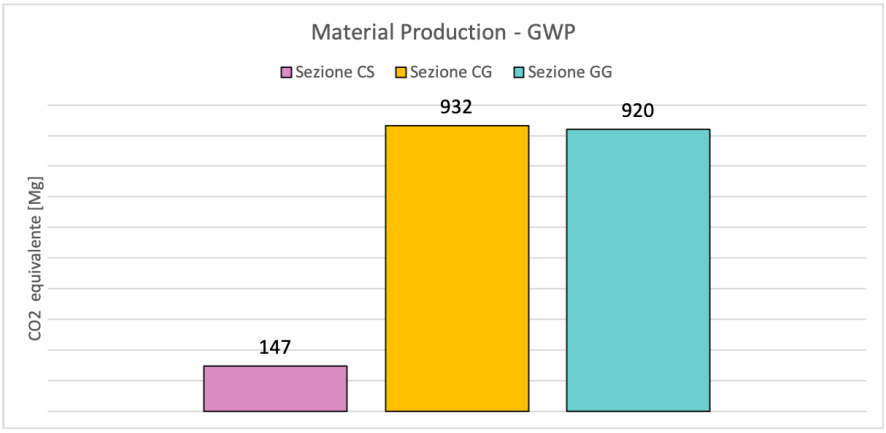


Figura 33: Material Production - GWP

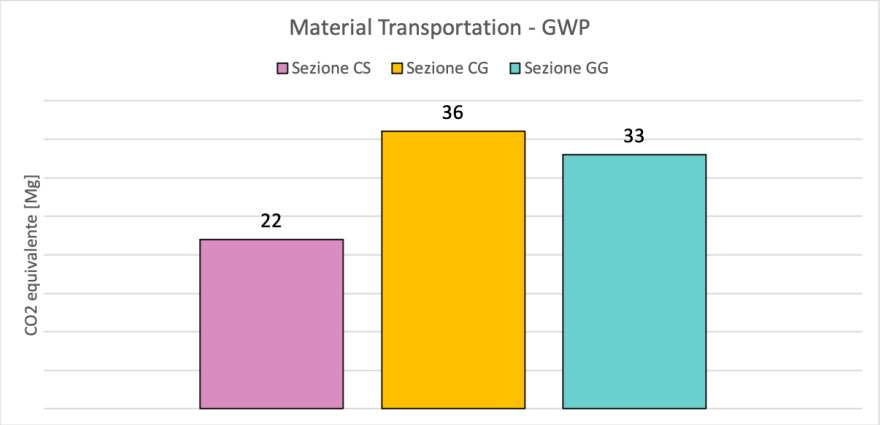


Figura 34: Material Transportation - GWP

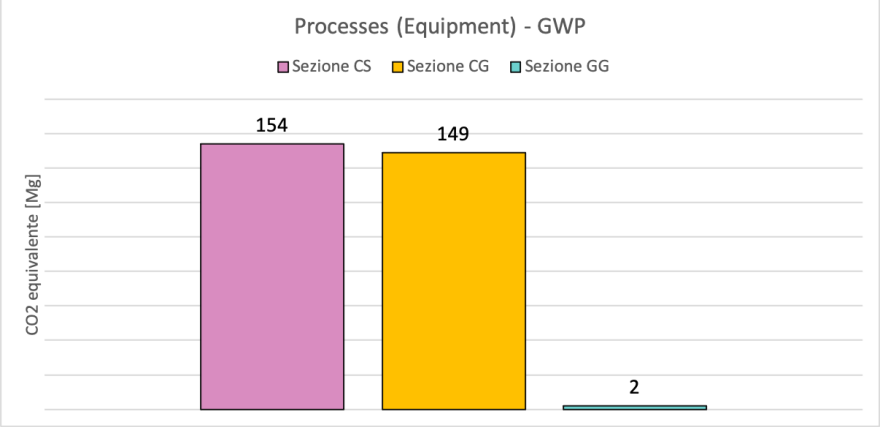


Figura 35: Processes (Equipment) - GWP

Da notare come il valore di GWP nella fase di lavorazione dei materiali, per la sezione GG è ridotto ai minimi termini. Tale dato era in un certo senso prevedibile considerando che gli strati di fondazione e riempimento sono realizzati con miscele cementizie autocompattanti e autolivellanti (SC-CBM), pertanto non necessitano di operazioni di compattazione e vibrazione.

Nel calcolo del GER, nella fase iniziale di produzione dei materiali, è stato sommato il contributo energetico dovuto al consumo di elettricità. Tale procedura è stata eseguita per i materiali che nel proprio inventario riportavano il quantitativo di energia elettrica necessario alla produzione, nello specifico si è fatto riferimento alle voci di cemento e calce. Per poter includere l'energia elettrica all'interno dell'indicatore GER è stato necessario convertire l'unità di

misura da kWh/shton in MJ/shton e poi moltiplicare per la massa del materiale prodotto espressa in shton.

Con riferimento alla fase di produzione dei materiali, il fabbisogno energetico (GER) richiesto dalle sezioni CG e GG supera di gran lunga quello richiesto per la sezione CS. Analizzando la Figura 38, si può notare che il GER delle sezioni CS e CG assume un valore molto elevato nella fase di utilizzo delle attrezzature; tale risultato è dovuto alle procedure di compattazione dello strato di fondazione in misto cementato, l'utilizzo della vibrofinitrice e le operazioni di posa e costipamento per il riempimento in terreno della sezione CS.

Osservando le figure che seguono si può notare come il dispendio energetico richiesto per la realizzazione delle sezioni CG e GG sia molto elevato nella fase di produzione dei materiali e nella fase di lavorazione. Tale risultato è dovuto certamente alla quantità elevata di fonti non rinnovabili utilizzate, quali carbone utilizzato per i processi di combustione, petrolio e gas naturali.

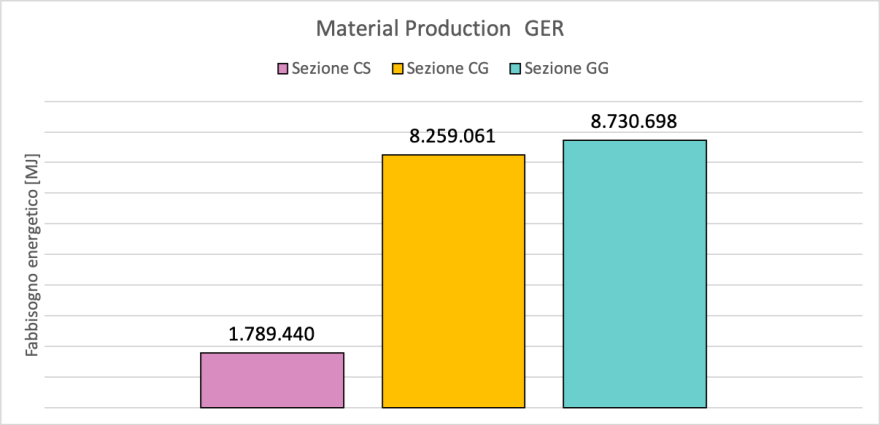


Figura 36: Material Production - GER

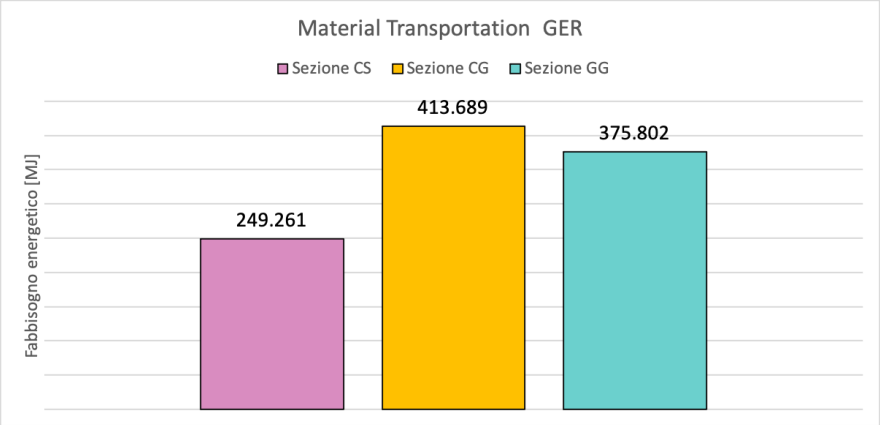


Figura 37: Material Transportation - GER

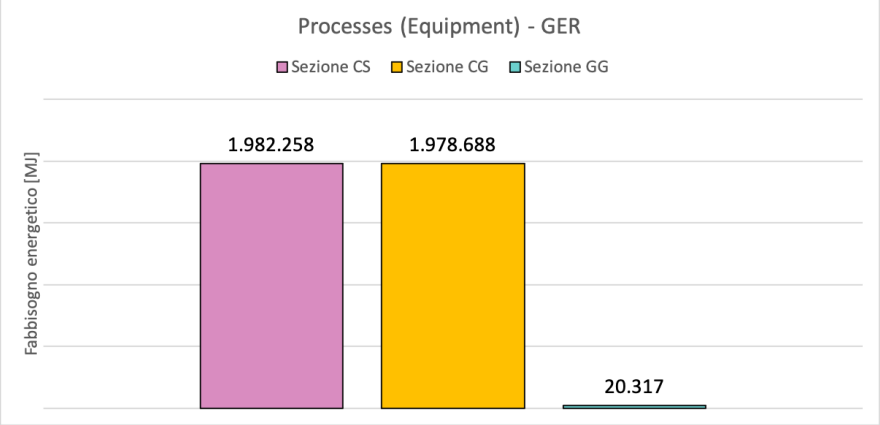


Figura 38: Processes (Equiment) - GER

Le discrepanze riscontrate nei risultati ottenuti riguardo gli indicatori GWP e GER sono principalmente dovute ai processi di produzione del cemento e della calce utilizzati nelle sezioni CG e GG; tali materiali risultano essere significativi nei confronti del potenziale di riscaldamento globale e del fabbisogno energetico.

Per avere una visione generale ed oggettiva, i risultati espressi precedentemente sono stati normalizzati rispetto al totale di ogni singolo indicatore per tutte e tre le sezioni esaminate. Lavorando in questo modo è stato possibile ricavare il valore relativo ad ogni singola fase considerata (Material Production, Material Transportation, Processes) in termini di percentuale.

Inoltre, assumendo l'ipotesi di stabilire un programma di manutenzione uguale per tutte e tre le sezioni (anche se nella realtà non è così), sono stati

normalizzati i risultati rispetto alla vita utile e dunque sono stati spalmati gli impatti legati alla costruzione iniziale sulla durata della pavimentazione.

Le figure seguenti danno un'indicazione visiva e aiutano a comprendere meglio l'impronta ambientale delle soluzioni analizzate.

Sezione CS

La percentuale maggiore di consumo d'acqua della sezione CS è dovuta alla fase di produzione dei materiali, mentre per le operazioni di trasporto e lavorazione essa può essere ritenuta praticamente trascurabile. Per la determinazione degli indicatori GWP e GER rivestono un ruolo importante la fase di produzione e di lavorazione dei materiali; essendo la sezione CS realizzata con materiali tradizionali le fasi di stesa, compattazione e finitura comportano un consumo energetico elevato. La fase di trasporto dei materiali risulta avere una percentuale moderata per gli indicatori GWP e GER rispetto al totale delle emissioni.

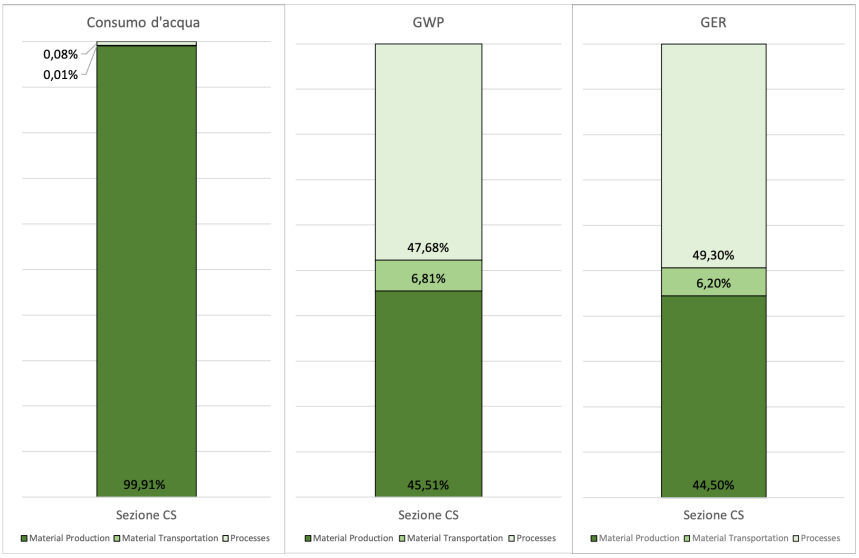


Figura 39: Risultati sezione CS

I risultati ottenuti nella Tabella 75 sono stati normalizzati rispetto alla vita utile della sezione CS che risulta essere di 20,2 anni; il valore della vita utile deriva da un calcolo strutturale basato su un approccio meccanicistico-empirico, convertendo i volumi di traffico in carichi equivalenti di 80 kN per singolo asse (ESAL), prendendo in considerazione le condizioni ambientali e le proprietà dei materiali [58].

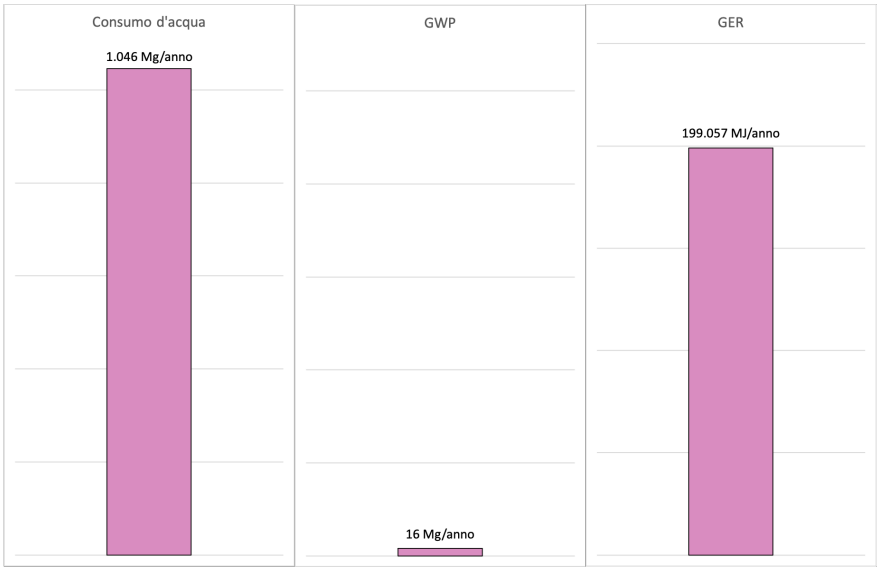


Figura 40: Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione CS

La normalizzazione dei risultati rispetto alla vita utile rappresentata in Figura 40, da un'indicazione numerica sulle ipotesi di manutenzione stabilite in precedenza. Il consumo d'acqua si aggira attorno alle 1000 tonnellate per anno di vita utile, il potenziale di riscaldamento globale assume un valore di 16 tonnellate/anno, mentre il fabbisogno energetico raggiunge quasi i 200 MJ/anno.

Sezione CG

Nel caso della sezione CG l'impatto ambientale più rilevante è da attribuire alla fase iniziale di produzione dei materiali per tutti e tre gli indicatori.

Confrontando i dati ottenuti con la sezione CS, è possibile notare che l'utilizzo della miscela SC-CBM per lo strato di riempimento ha ridotto drasticamente il GWP e il GER nella fase di Processes. Tali miscele essendo autolivellanti e autocompattanti non necessitano di alcun tipo di compattazione o vibrazione in cantiere, esse vengono posate in opera attraverso un tradizionale sistema di pompaggio.

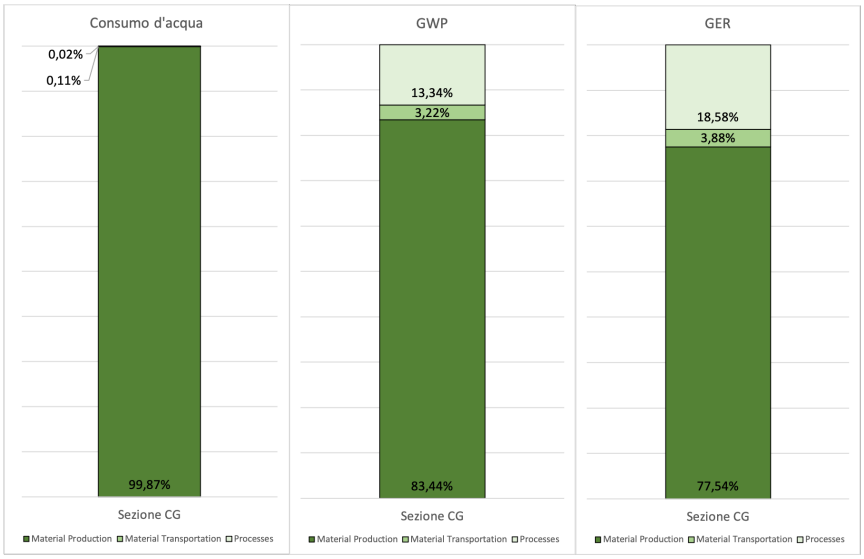


Figura 41: Risultati sezione CG

D'altro canto però, l'utilizzo di tali miscele ha portato ad avere un aumento in percentuale del GWP e del GER nella fase di produzione dei materiali di quasi il doppio. Tale fenomeno è da attribuirsi alla produzione del cemento e della calce, la figura che segue riportata le percentuali di quanto tali leganti influiscono sul totale di questi indicatori.

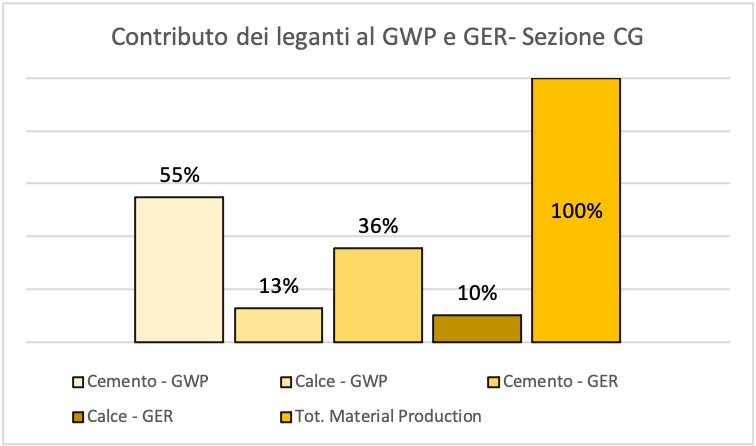


Figura 42: Contributo dei leganti - Sezione CG

E' importante notare che la produzione del cemento ricopre più del 50% delle emissioni di CO_2, mentre la produzione totale di calce e cemento raggiunge quasi il 70% delle emissioni di CO_2.

Analizzando l'indicatore GER, si deduce che il cemento rappresenta più di un terzo del fabbisogno energetico in fase di produzione; entrambi i leganti ricoprono quasi il 50% dell'energia necessaria in fase di produzione dei materiali.

Come fatto per la sezione CS, anche per la sezione CG gli impatti legati alla costruzione sono stati distribuiti sulla durata della pavimentazione che risulta essere pari a 26 anni. I risultati sono riportati in Figura 43. Si può notare come il consumo d'acqua sia nettamente inferiore rispetto a quello della sezione CS, mentre gli indicatori GWP e GER spalmati sulla vita utile risultano essere superiori.

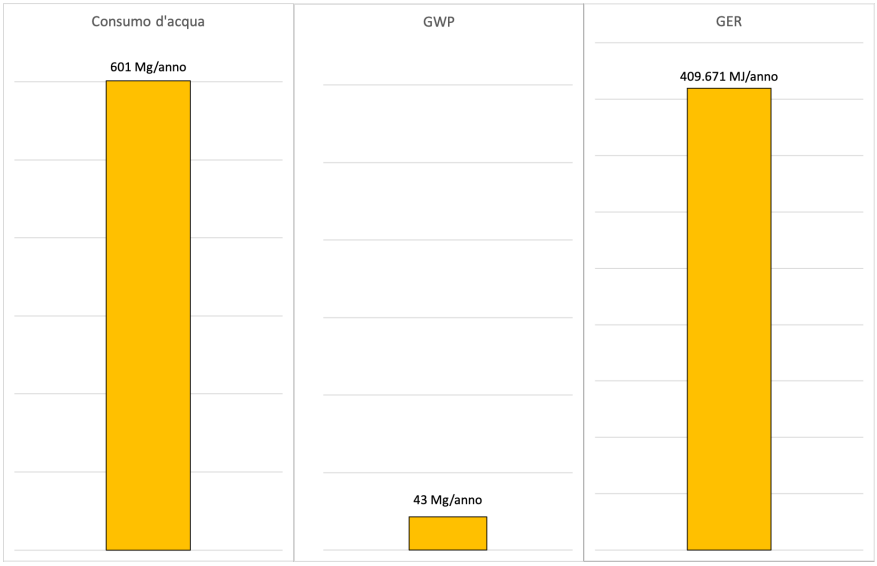


Figura 43: Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione CG

Sezione GG

Per la sezione GG possono essere fatte le stesse considerazioni della sezione CG. L'impronta ambientale viene ridotta notevolmente per la fase di Processes, questo avviene in quanto gli strati di fondazione e di riempimento sono realizzati entrambi con la miscela SC-CBM. Una volta arrivati sul cantiere per tali strati non ci sarà bisogno di lavorazioni aggiuntive in quanto non necessitano di compattazione e vibrazione. Scegliendo tale soluzione, gli unici strati che necessitano di lavorazione in cantiere sono gli strati superiori in conglomerato bituminoso.

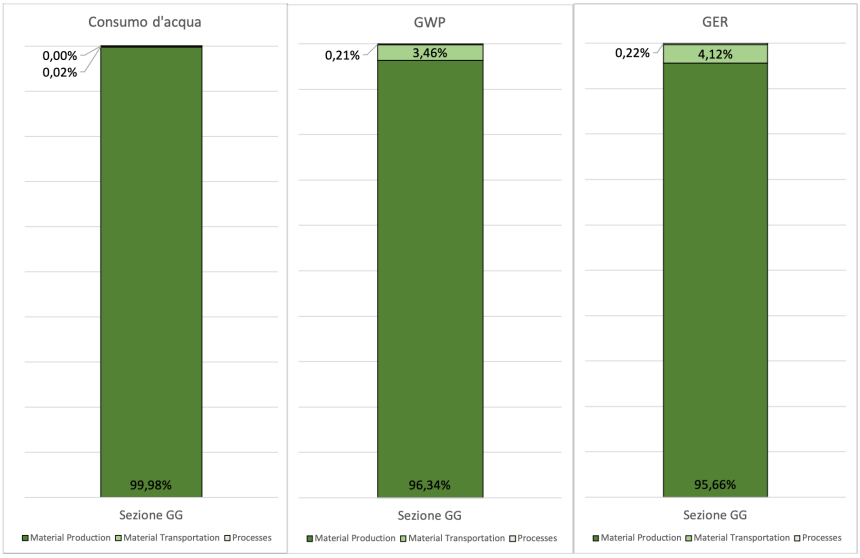


Figura 44: Risultati sezione GG

Anche in questo caso gli indicatori GWP e GER tendono ad alzare il loro valore percentuale nella fase di produzione dei materiali a causa dei processi produttivi di cemento e calce. I contributi della produzione della calce e del cemento sono di seguito riportati.

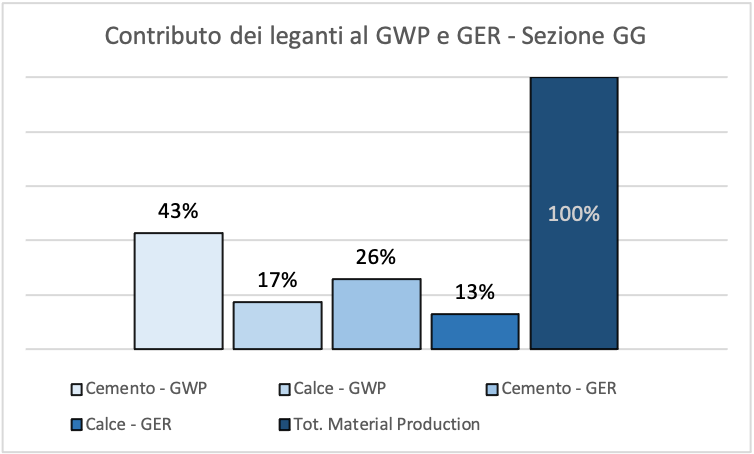


Figura 45: Contributo dei leganti - Sezione GG

Cemento e calce contribuiscono al 60% delle emissioni di CO_2, mentre quasi il 40% per l'indicatore GER.

I risultati ottenuti nella Tabella 77 sono stati normalizzati rispetto alla vita utile della sezione GG che risulta essere di 15,8 anni. I risultati normalizzati rispetto alla durata della pavimentazione risultano essere superiori a quelli della sezione CG, tale conclusione è dovuta al basso valore di vita di progetto della pavimentazione GG.

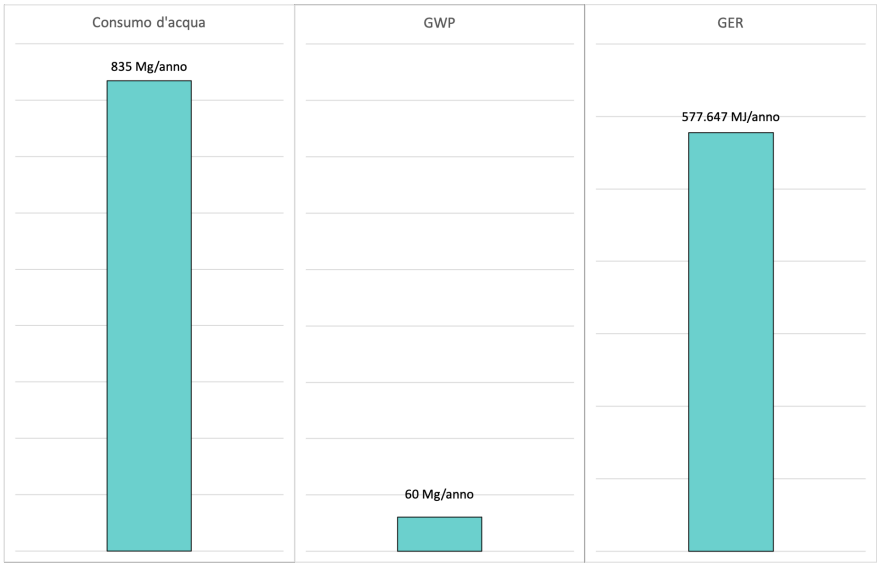


Figura 46: Risultati normalizzati rispetto alla vita utile - Sezione GG

Risultati economici

Da un punto di vista economico in primo luogo sono stati considerati i costi totali per la realizzazione dell'unità funzionale delle tre sezioni (CS, CG, GG), ovvero il costo per la produzione dei materiali, la lavorazione e la messa in opera degli stessi. Inoltre, è stata eseguita l'analisi economica dei tre casi in esame suddivisa per i costi dei singoli materiali (estrazione materie prime, lavorazione, ...) escludendo le spese generali, la manodopera e i costi dei mezzi d'opera utilizzati. I risultati ottenuti sono sintetizzati nella Tabella 76 per entrambi i casi.

	Aggregati Vergini	Bitume	Cemento	Additivo	Emulsione Bituminosa	Acqua	Polimero	Terreno	RAP	Calce	Totale (senza spese)	Totale
Sezione CG	88.939 €	61.754 €	60.472 €	18.504 €	6.255 €	2.786 €	10.557 €	-	554 €	6.022 €	255.844 €	492.802 €
Sezione GG	74.636 €	61.754 €	46.314 €	16.606 €	6.255 €	3.167 €	10.557 €	-	746 €	22.809 €	242.843 €	401.454 €
Sezione CS	50.721 €	61.754 €	8.737 €	-	6.255 €	650 €	10.557 €	93.004 €	-	-	231.678 €	310.519 €

Tabella 78: Voci di costo totali

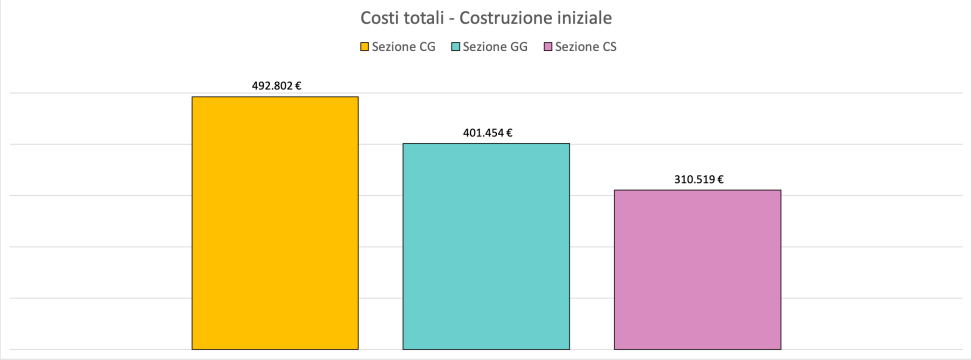


Figura 47: Costi totali - Costruzione iniziale

Come fatto per i risultati ambientali, anche i costi totali legati alla costruzione sono stati normalizzati rispetto alla vita utile di ciascuna di esse. Confrontando la Figura 47 con la Figura 48 è possibile notare come all'aumentare della vita utile i costi totali di realizzazione tendono a cambiare. La sezione CG risulta essere la più costosa, ma se il suo costo viene spalmato sugli anni di vita utile si osserva come tale valore risulti più basso della sezione GG e leggermente superiore a quello della sezione CS.

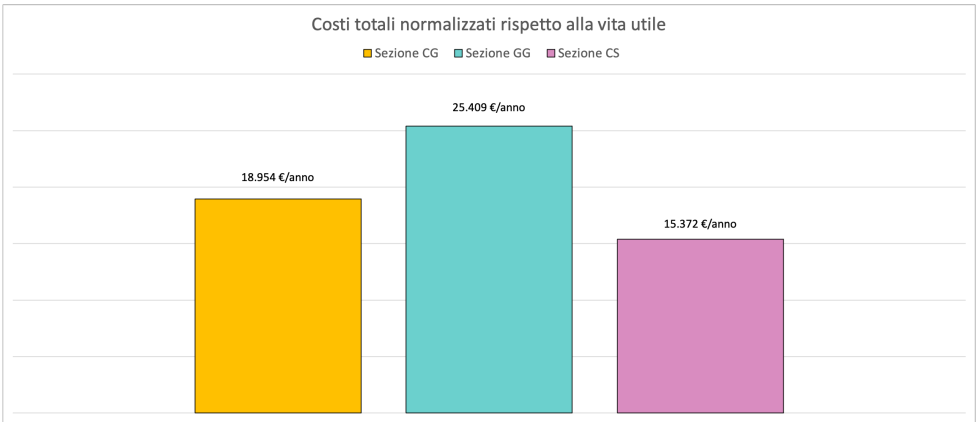


Figura 48: Costi totali normalizzati rispetto alla vita utile

Dalla Tabella 78 e dalla Figura 47 si evince che la sezione CG è quella che ha un costo maggiore di realizzazione, seguono la sezione GG e la sezione CS. La sezione CS risulta essere la più semplice in termine di composizione e la più economica nonostante non siano stati utilizzati materiali da riciclo. La differenza di costo è governata dalla presenza del cemento per le sezioni CG e GG, il trattamento dei fanghi minerali con calce e il quantitativo variabile di aggregati vergini utilizzati.

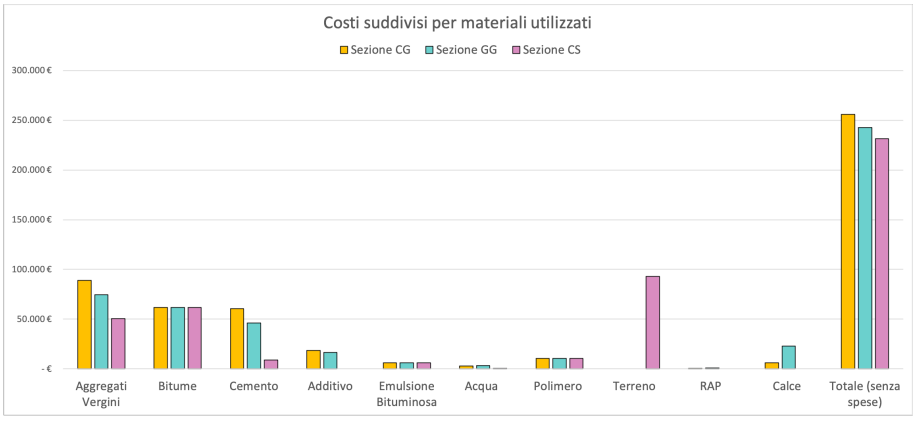


Figura 49: Costi suddivisi per materiali

La Figura 45 riporta le voci di costo per i singoli materiali utilizzati nei tre casi, anche in questo caso è possibile notare con maggiore evidenza che il costo maggiore è da attribuire alla sezione CG, nonostante non siano state considerate le percentuali di manodopera, spese generali e attrezzature.

Dalla Figura 45 si può notare come tutte e tre le sezioni siano accomunate da un costo costante di bitume, polimero ed emulsione bituminosa; mentre per

la sezione CS gioca un ruolo determinante in termini di costi il riempimento in terreno (considerando che il volume totale è di 4734 m^3). I materiali da riciclo come sludge e il RAP utilizzati nelle miscele SC-CBM hanno un costo relativamente basso; in particolare per i fanghi minerali il costo è stato considerato praticamente nullo, mentre il costo del RAP è stato ritenuto essere pari al costo del diesel utilizzato dal mulino per il trattamento preventivo e per la vagliatura.

Considerazioni finali e sviluppi futuri

Il concetto di sostenibilità oramai non è più visto come un aspetto prettamente teorico ma è entrato a far parte della nostra quotidianità. Adottare una teoria di sostenibilità economica ed ambientale può portare gli amministratori pubblici e privati a ridurre i consumi e i costi connessi alla produzione di beni e servizi.

Oggigiorno il settore delle costruzioni necessità di essere controllato e revisionato nella sua totalità, ovvero richiede una particolare attenzione nell'utilizzo dei materiali e delle teniche di costruzione così da poter avere un controllo dell'efficienza ambientale. La misura della sostenibilità può essere valutata seguendo due metodologie: adottando un'analisi multicriteri che dà un indice "qualitativo" o utilizzando un approccio che si basa su dei parametri di carattere scientifico che danno una misura "quantitativa".

La metodologia di valutazione del ciclo di vita LCA utilizzato nel presente lavoro di tesi rientra nella seconda categoria appena citata. Adottando un'analisi LCA per la valutazioni dei carichi ambientali ed economici connessi con un bene o servizio, non si andranno ad annullare i costi energetici ed ambientali ma si potrà avere la trasparenza di ogni singolo processo e successivamente proporre degli interventi di miglioramento.

L'analisi condotta nel caso in esame è del tipo "cradle-to-laid", ovvero dalla culla al cancello. Nello specifico, sono stati valutati i carichi ambientali di tre soluzioni diverse e i rispettivi oneri economici. Lo studio si è concentrato sulla fase di produzione dei materiali, dall'approvvigionamento delle materie prime al ciclo produttivo, al trattamento delle stesse, al trasporto e alla messa in opera.

Sulla base dei risultati ottenuti si può notare come la sezione standard CS proposta in fase preliminare risulti la più conveniente da un punto di vista economico, mentre le pavimentazioni innovative CG e GG sono decisamente più costose. D'altro canto, valutando il lato ambientale, le pavimentazioni CG e GG risultano avere maggiore sostenibilità (nelle fasi di trasporto dei materiali e della messa in opera) in quanto l'utilizzo delle miscele SC-CBM riduce di gran lunga le operazioni di cantiere (compattazione, vibrazione, ...) e i relativi impatti.

La scelta finale vede l'utilizzo della pavimentazione CG [58] in quanto offre vantaggi in termini di vita utile (26 anni) non trascurabili rispetto alla sezione CS (20,2 anni), facilità di costruzione (non necessità di compattazione lo strato di riempimento), miglioramento della conducibilità termica (molto importante per la presenza di una linea interrata ad alta tensione), possibilità di introdurre una quantità rilevante di materiali da riciclo (RAP e fanghi minerali) e facilità di scavo in previsione di manutenzione futura.

La sezione GG, nonostante avesse strato di fondazione e riempimento realizzati con miscele innovative, non ha soddisfatto i requisiti di vita utile (15,8 anni) per i carichi di progetto, pertanto non è stata considerata come buon candidato per il caso studio.

Osservando gli impatti normalizzati rispetto alla vita utile (Figure 40, 43, 46) si deduce che il minor consumo d'acqua per anno di vita utile è dato dalla sezione CG (600 tonnellate/anno), mentre il consumo maggiore dalla sezione CS (più di 1000 tonnellate/anno). Ragionando in termini di GWP e GER la sezione che assume i valori più critici è la sezione GG, mentre la sezione CS assume i valori più bassi. Pertanto, avendo analizzato gli impatti legati alla costruzione spalmati sulla durata delle tre pavimentazioni, la sezione CG risulta essere il compromesso migliore rispetto alle altre due.

Sebbene l'utilizzo di materiali da riciclo come il RAP e i fanghi minerali utilizzati nelle miscele cementizie SC-CBM abbiano portato a delle migliorie prestazionali, l'utilizzo del cemento e della calce ha sensibilmente innalzato il valore del GWP e del GER nella fase di produzione dei materiali per le sezioni CG e GG.

A tal proposito, studi futuri possono essere condotti introducendo leganti innovativi come alternativa al classico cemento Portland, come ad esempio i leganti "geopolimerici" [59] (composti da minerali argillosi, ceneri volanti e scorie d'altoforno granulate) o le polveri di cemento da elettrofiltro (CKD - Cement Kiln Dust), così da ridurre i carichi ambientali dovuti alla produzione iniziale e innalzare il livello di sostenibilità.

Lo studio LCA riportato nel seguente lavoro di tesi, seppur parziale, potrebbe essere un esempio pratico e un punto di partenza per ulteriori studi sulla valutazione del ciclo di vita di pavimentazioni stradali introducendo le fasi di manutenzione nel corso della vita utile e la dismissione dell'opera.

Allegato A

Modifiche apportate all'applicativo PaLATE

Il presente allegato fa riferimento alla tesi di Federica Zuccalà [36] nella quale sono stati segnalati degli errori dimensionali e di riferimento cella riscontrati durante l'utilizzo dell'applicativo PaLATE e delle opportune modifiche da riportare.

Foglio "EMF Transport" - Particolato PM_{10}

Le emissioni di particolato attribuite ai processi di carico, scarico e alle operazioni da cava sono classificate attraverso l'utilizzo degli SCC (Source Classification Code) e sono riportate all'interno del foglio EFM Transport di PaLATE. L'inventario di default fornito da PaLATE si basa su dati forniti dall'EPA (Environmental Protecion Agency), un'agenzia federale statunitense che si occupa della protezione ambientale e della salute umana. Attraverso l'ausilio del database fornito da WebFIRE che contiene i fattori di emissione definiti dall'EPA per gli inquinanti derivanti da processi industriali e non, e per gli inquinanti atmosferici, utilizzando gli SCC sono stati riscontrati degli errori su PaLATE.

	A	B	C	D	E	F	G	H
61								
62	**FIRE-EPA:**							
63				**EPA - SCC**	PM10 (kg/Mg)			
64			truck loading	3-05-020-32	8,00E-06			
65			truck unloading	3-05-020-31	5,00E-06			
66								
67		secondary crushing/screening - stone quarrying processing		3-05-020-02	6,18E-03	1,50E-02	uncontrolled	
68		secondary crushing/screening - stone quarrying processing		3-05-020-03	3,46E-04	8,40E-04	wet suppression	
69		fines mill - stone quarrying processing		3-05-020-05	6,18E-03	1,50E-02	uncontrolled	
70		fines mill - stone quarrying processing		3-05-020-05	8,24E-04	2,00E-03	wet suppression	
71	s operations: screen/convey/handling - stone quarrying processing			3-05-020-06	5,77E-04	1,40E-03	uncontrolled	
72	s operations: screen/convey/handling - stone quarrying processing			3-05-020-06	1,98E-05	4,80E-05	wet suppression	
73		drying - stone quarrying processing		3-05-020-12	2,06E+00	5,00E+00	uncontrolled	
74		fines screening - stone quarrying processing		3-05-020-21	2,93E-02	7,10E-02	uncontrolled	
75		fines screening - stone quarrying processing		3-05-020-21	8,65E-04	2,10E-03	uncontrolled	
76		hauling - stone quarrying processing		3-05-020-11	0,0294	lb/miles vehicle	traveled	
77								
78								
79								
80		aggregate storage - construction sand and gravel		3-05-025-02	4,94E-02	1,20E-01		
81		material transfer and conveying - construction sand and gravel		3-05-025-03	1,19E-02	2,90E-02		
82		pile forming stacker - construction sand and gravel		3-05-025-05	2,47E-02	6,00E-02		
83		bulk loading - construction sand and gravel		3-05-025-06	9,89E-04	2,40E-03		
84		screening - construction sand and gravel		3-05-025-11	4,94E-02	1,20E-01		
85					**1,37E-01**			
86								
87		hauling - construction sand and gravel		3-05-025-04	6,20E+00	lb/miles vehicle	traveled	
88								
89			Fly ash sintering	3-05-009-01	2,80E-01	6,80E-01		
90			Fly ash sintering - dryer	3-05-009-16	2,58E-01	6,26E-01		
91								

Figura 50: Fattori di emissione PM_{10} (iniziali)

La figura riportata sopra rappresenta i valori di emissione riferiti al particolato. Nella colonna "F" sono riportati i valori di PM10 in lb/shot tons e nella colonna "E" PaLATE li converte in kg/Mg.

- Sul foglio "EMF Transport" sono state invertite le celle E64 ed E65 (valori di particolato riferiti alle voci "truck loading" e "truck unloading" rispettivamente)e modificato le celle di un ordine di grandezza la cella E64 (5,00E-05)
- Nella colonna "F" sono riportati i valori di PM_{10} in lb/shot tons (derivati da WebFire sulla base dei dati forniti da EPA) e nella colonna "E" PaLATE li converte in kg /Mg.

Esempio. Considerando SCC – 30502005 "fines mill – stone quarrying processing" , PaLATE converte I valori di PM10 da libbra su tonnellata corta (colonna F) in kilogrammo su megagrammo (colonna E). PM_{10} = 0,015 lb/shot ton (cella F69), PaLate converte in kg/Mg secondo la seguente relazione:

$$PM_{10} = \frac{emissione\, PM_{10}\left[\frac{lb}{shoton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{lb}\right]}{conv\left[\frac{shton}{ton}\right] \cdot conv\left[\frac{kg}{Mg}\right]} \tag{71}$$

$$PM_{10} = \frac{0{,}015\left[\frac{lb}{shoton}\right] \cdot 454\left[\frac{g}{lb}\right]}{1{,}102\left[\frac{shton}{ton}\right] \cdot 1000\left[\frac{kg}{Mg}\right]} = 6,18E-03\frac{g \cdot Mg \cdot Mg}{ton \cdot shoton \cdot kg} \tag{72}$$

Si nota come la relazione sia errata in quanto non riporta il risultato in kg/Mg. La relazione necessita di essere modificata e dunque quella corretta si presenta nella seguente forma:

$$PM_{10} = \frac{emissione\, PM_{10}\left[\frac{lb}{shoton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{lb}\right] \cdot C\left[\frac{shton}{ton}\right]}{conv\left[\frac{kg}{Mg}\right]} \tag{73}$$

$$PM_{10} = \frac{0,015\left[\frac{lb}{shoton}\right] \cdot 454\left[\frac{g}{lb}\right] \cdot 1,102\left[\frac{shton}{ton}\right]}{1000\left[\frac{kg}{Mg}\right]} = 7,5E-03\frac{kg}{Mg} \tag{74}$$

La correzione sopra esposta è stata eseguita per tutta la colonna E relativa al PM_{10}.

		EPA - SCC	PM10 (kg/Mg)		
	truck loading	3-05-020-32	5,00E-05		
	truck unloading	3-05-020-31	8,00E-06		
				PM10 (lb/shot ton)	
secondary crushing/screening - stone quarrying processing		3-05-020-02	7,50E-03	1,50E-02	uncontrolled
secondary crushing/screening - stone quarrying processing		3-05-020-03	2,70E-04	5,40E-04	wet suppression
fines mill - stone quarrying processing		3-05-020-05	7,50E-03	1,50E-02	uncontrolled
fines mill - stone quarrying processing		3-05-020-05	6,00E-04	1,20E-03	wet suppression
miscellaneous operations: screen/convey/handling - stone quarrying processing		3-05-020-06	5,50E-04	1,10E-03	uncontrolled
miscellaneous operations: screen/convey/handling - stone quarrying processing		3-05-020-06	2,30E-05	4,60E-05	wet suppression
drying - stone quarrying processing		3-05-020-12	2,50E+00	5,00E+00	uncontrolled
fines screening - stone quarrying processing		3-05-020-21	3,60E-02	7,20E-02	uncontrolled
fines screening - stone quarrying processing		3-05-020-21	1,10E-03	2,20E-03	uncontrolled
hauling - stone quarrying processing		3-05-020-11	0,0294	lb/miles vehicle traveled	
aggregate storage - construction sand and gravel		3-05-025-02	6,00E-02	1,20E-01	
material transfer and conveying - construction sand and gravel		3-05-025-03	1,45E-02	2,90E-02	
pile forming stacker - construction sand and gravel		3-05-025-05	3,00E-02	6,00E-02	
bulk loading - construction sand and gravel		3-05-025-06	1,20E-03	2,40E-03	
screening - construction sand and gravel		3-05-025-11	6,00E-02	1,20E-01	
			1,66E-01		
hauling - construction sand and gravel		3-05-025-04	6,20E+00	lb/miles vehicle traveled	
Fly ash sintering		3-05-009-01	3,40E-01	6,80E-01	
Fly ash sintering - dryer		3-05-009-16	3,13E-01	6,26E-01	

Figura 51: Fattori di emissione PM_{10} (rettificati)

I valori aggiornati di PM_{10} sono stati ricavati da WebFIRE, un sito web che contiene un database dove sono presenti i fattori di emissione definiti dall'EPA (definiti dagli SCC) per gli inquinanti derivanti da processi industriali e non, e per gli inquinanti atmosferici [36].

Foglio "EMF Transport" - Consumo d'acqua

Nel foglio EMF Transport viene riportato un errore sull'unità di misura relativa al consumo d'acqua.

Sector	CO_2	CO	NO_2	SO_2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
units	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Asphalt paving mixtu	183.016	42	44	27	48	1.968	18	1,E-03	5,E-02	3.560	96
Ready-mixed concre	37.099	337	551	484	172	536	19	1,E-03	6,E-02	932	169
Blast furnaces and s	544.446	1.828	969	766	338	8.589	342	1,E+01	4,E+00	13.473	18.037
Sand and Gravel	10.922	14	22	11	183	154	10	4,E-07	3,E-03	179	21
Bitumen	1.121.978	4.736	6.239	5.653	1.057	19.757	784	4,E-02	2,E+00	350.942	8.292
cement	264.925	1.132	3.186	3.158	597	3.775	165	3,E-03	3,E-01	1.636	1.871
concrete additives	2.302.229	11.804	9.374	6.930	3.371	38.464	1.619	7,E-02	5,E+00	573.686	35.885
asphalt emulsion	969.318	4.092	5.390	4.884	914	17.069	678	3,E-02	1,E+00	303.191	7.164
water	0,497	0,002	0,003	0,003	0,001	0,006	0,000	4,E-10	9,E-07	0	0
units	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	MJ/kWh	kWh/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Electric services (util	1243,97	0,37	3,56	6,97	0,24	12,90	0,02	4,67E-08	1,89E-04	1,52	0,08

Figura 52: Sector table

Facendo riferimento all'ultima colonna della sector table sopra esposta, si nota che l'unità di misura che esprime il consumo d'acqua è g/short ton.

	M	N	O
109	gal/$		
110	**Water Consumption**	all prices from [Means 1995] "F	
111	3,79	28 $/Mg	25 $/ton
112	6,03	31 $/Mg	28 $/ton
113	66,26	300 $/Mg	272 $/ton
114	2,15	11 $/Mg	10 $/ton
115	9,14	1.000 $/Mg	907 $/ton
116	22,27		84 $/ton
117	18,71	2.114 $/Mg	1.918 $/ton
118	9,14	864 $/Mg	784 $/ton
119	2,01		0,00082 $/ton
120	0,81	0,10 $/kWh	
121			
122			
123	**Water Consumption**		
124	g/ton		
125	96		
126	169		
127	18.037		
128	21		
129	8.292		
130	1.871		
131	35.885		
132	7.164		
133	0		
134	g/kWh		
135	0,08		

Figura 53: Consumo d'acqua (errato)

Il consumo d'acqua presente nella cella M125 è calcolato da PaLATE nel seguente modo:

$$Wat.Cons. = Wat.Cons. \left[\frac{gal}{\$}\right] \cdot prezzo \left[\frac{\$}{shton}\right] \tag{75}$$

$$Wat.Cons. = 3,79 \left[\frac{gal}{\$}\right] \cdot 25,4 \left[\frac{\$}{shton}\right] = 96 \left[\frac{gal}{shton}\right] \tag{76}$$

E' evidente come le unità di misura non siano rispettate. La formulazione viene corretta nel seguente modo:

$$Wat.Cons. = Wat.Cons. \left[\frac{gal}{\$}\right] \cdot prezzo \left[\frac{\$}{shton}\right] \cdot C \left[\frac{l}{gal}\right] \cdot C \left[\frac{g}{l}\right] \tag{77}$$

$$Wat.Cons. = 3,79 \left[\frac{gal}{\$}\right] \cdot 25,4 \left[\frac{\$}{shton}\right] \cdot 3,785 \left[\frac{l}{gal}\right] \cdot 1000 \left[\frac{g}{l}\right] \tag{78}$$

$$Wat.Cons. = 364583 \left[\frac{g}{shton}\right] \tag{79}$$

La formulazione è stata applicata a tutta la colonna relativa al consumo d'acqua.

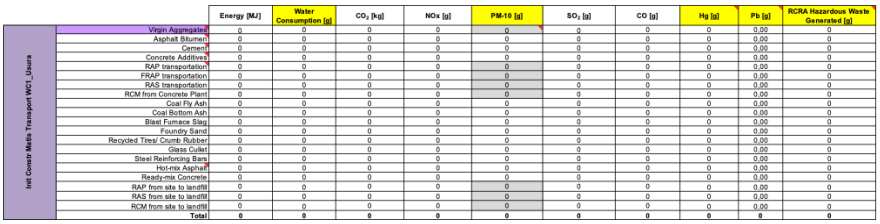
	M	N	O
109	gal/$		
110	Water Consumption	all prices from [Means 1995] ‘	
111	3,79	28 $/Mg	25 $/ton
112	6,03	31 $/Mg	28 $/ton
113	66,26	300 $/Mg	272 $/ton
114	2,15	11 $/Mg	10 $/ton
115	9,14	1.000 $/Mg	907 $/ton
116	22,27		84 $/ton
117	18,71	2.114 $/Mg	1.918 $/ton
118	9,14	864 $/Mg	784 $/ton
119	2,01		0,00082 $/ton
120	0,81	0,10 $/kWh	
121			
122			
123	Water Consumption		
124	g/ton		
125	364.583		
126	641.509		
127	68.270.134		
128	81.305		
129	31.385.962		
130	7.079.888		
131	135.825.771		
132	27.115.481		
133	6		
134	g/kWh		
135	307,34		

Figura 54: Consumo d’acqua (rettificato)

Foglio “ENV Results“ - Correzioni dimensionali

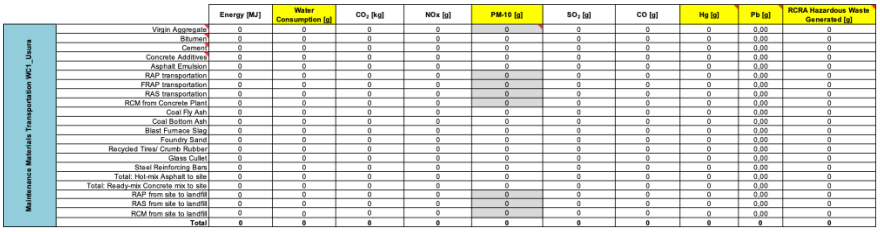
Facendo riferimento al foglio “Environmental Results” che racchiude gli output ambientali, sono stati riscontrati degli errori dimensionali nel processo di trasporto relativo alla costruzione iniziale e alla fase di manutenzione. In particolare le colonne relative a RCRA Hazardous Waste Generated, Pb, Hg e PM_{10} sono caratterizzate da un errore che non restituisce un valore in grammi, pertanto tutte le colonne sono state correttamente modificate. Di seguito si riportano a titolo di esempio le modifiche apportate per il solo strato di usura nella fase di trasporto dei materiali relative a costruzione iniziale e manutenzione.

Per ogni materiale considerato, le voci Water Consumption, Hg, Pb, RCRA (selezionate in giallo nella tabella che segue) nella versione iniziale di PaLATE fanno riferimento ai valori di emissione dell’emulsione bituminosa. Dopo un’attenta analisi si è capito che il riferimento era sbagliato e che non sono i valori di emulsione bituminosa ad entrare in gioco ma i valori di emissione relativi alla produzione del diesel, pertanto la riga presente nella sector table di PaLATE denominata “Asphalt Emulsion” è stata rinominata come “Diesel Production”. Successivamente è stata introdotta una nuova riga con i valori di emissione relativi all’emulsione bituminosa.



		Energy [MJ]	Water Consumption [g]	CO_2 [kg]	NOx [g]	PM-10 [g]	SO_2 [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [g]
Init Constr Matls Transport WC1_Usura	Virgin Aggregate	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Asphalt Bitumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Cement	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Concrete Additives	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAP transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	FRAP transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAS transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RCM from Concrete Plant	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Coal Fly Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Coal Bottom Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Blast Furnace Slag	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Foundry Sand	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Glass Cullet	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Steel Reinforcing Bars	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Hot-mix Asphalt	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Ready-mix Concrete	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAP from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAS from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RCM from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 55: Costruzione iniziale (usura) - Trasporto materiali



		Energy [MJ]	Water Consumption [g]	CO_2 [kg]	NOx [g]	PM-10 [g]	SO_2 [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [g]
Maintenance Materials Transportation WC1_Usura	Virgin Aggregate	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Bitumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Cement	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Concrete Additives	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Asphalt Emulsion	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAP transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	FRAP transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAS transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RCM from Concrete Plant	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Coal Fly Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Coal Bottom Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Blast Furnace Slag	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Foundry Sand	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Glass Cullet	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Steel Reinforcing Bars	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Total: Hot-mix Asphalt to site	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Total: Ready-mix Concrete mix to site	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAP from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RAS from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	RCM from site to landfill	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0
	Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 56: Manutenzione (usura) - Trasporto materiali

Adesso si riportano le correzioni fatte su PaLATE sulle voci RCRA, Pb, Hg e PM_{10}. I valori di RCRA, Pb e Hg relativi al processo di trasporto dei materiali sono espresse in grammi sia per la costruzione iniziale che per la fase manutenzione, ma all'interno di esse vi sono delle incongruenze dimensionali. L'espressione iniziale riportata inizialmente da PaLATE è la seguente:

$$RCRA = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot 1000000} \tag{80}$$

Come si evince dalla relazione precedente il risultato finale non è in grammi, per ottenere la formulazione corretta è stato inserito un fattore di conversione come riportato di seguito:

$$RCRA[g] = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot 1000000} \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \tag{81}$$

La procedura è stata seguita anche per Pb e Hg:

$$Pb[g] = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot 1000000} \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \tag{82}$$

$$Hg[g] = \frac{Vol\left[yd^3\right] \cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right] \cdot Di[mi] \cdot C\left[\frac{km}{mi}\right] \cdot Fuel\left[\frac{l}{km}\right] \cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right] \cdot C\left[\frac{g}{l}\right]}{Cap[Mg] \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \cdot 1000000} \cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right] \tag{83}$$

Per quanto riguarda il particolato (PM_{10}) la formulazione iniziale riportata in PaLATE è la seguente:

$$PM_{10}[g]=\frac{Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot Di[mi]\cdot C\left[\frac{km}{mi}\right]\cdot EMF\left[\frac{g}{Mg\cdot km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}+$$

$$+Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot C\left[\frac{g}{kg}\right]\cdot EMF\left[\frac{kg}{Mg}\right] \tag{84}$$

Il secondo termine della somma non risulta essere in grammi pertanto è stato applicato un ulteriore fattore di correzione alle celle grigie (vedi figure sopra) per ottenere un risultato finale espresso in grammi:

$$PM_{10}[g]=\frac{Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot Di[mi]\cdot C\left[\frac{km}{mi}\right]\cdot EMF\left[\frac{g}{Mg\cdot km}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]}+$$

$$+\frac{Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot C\left[\frac{g}{kg}\right]\cdot EMF\left[\frac{kg}{Mg}\right]}{C\left[\frac{shton}{Mg}\right]} \tag{85}$$

Foglio "ENV Results" - Correzioni riferimenti di cella

Nella fase "Processes" presente nel foglio "ENV Results" sono stati riscontrati degli errori di riferimento di cella. In particolare, facendo riferimento ai processi di stesa e compattazione degli strati in conglomerato bituminoso, il termine che definisce i fattori di emissione relativo alla vibrofinitrice assume i valori dai macchinari utilizzati per le pavimentazione rigide, l'errore è stato corretto per le voci CO, PM_{10}, NO_x, SO_2.

Le colonne relative al Consumo d'acqua, Pb, Hg ed RCRA è sono corrette introducendo un fattore di conversione per ottenere il risultato finale nelle rispettive unità di misura. Inoltre è stato corretto un riferimento di cella sbagliato nella colonna relativa al PM_{10} per lo strato di usura, in quanto il fattore di emissione era collegato con la voce NO_x.

Si riporta a titolo di esempio le formulazione errata e successivamente quella corretta relativa al piombo (Pb):

$$P=\left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot Fuel\left[\frac{l}{h}\right]\cdot C\left[\frac{g}{l}\right]\cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]}\right)_{mezzo} \tag{86}$$

$$P=\left(\frac{\frac{Vol\left[yd^3\right]\cdot Den\left[\frac{shton}{yd^3}\right]\cdot Fuel\left[\frac{l}{h}\right]\cdot C\left[\frac{g}{l}\right]\cdot C\left[\frac{shton}{Mg}\right]\cdot EMF\left[\frac{g}{shton}\right]}{Prod.\left[\frac{shton}{h}\right]}}{1000000\left[\frac{g}{Mg}\right]}\right)_{mezzo} \tag{87}$$

Riferimenti bibliografici

[1] "Dossier tunnel Frejus seconda canna", SITAF 2012.

[2] Traforo autostradale del Frejus, Galleria di sicurezza - "Progetto definitivo 2006 - Parte II, S.F.T.R.F S.A - S.I.T.A.F S.p.a".

[3] http://www.sitaftunnelfrejus.it/progetto/caratteristiche-opera/

[4] https://www.stradeeautostrade.it/gallerie-e-tunnelling/la-galleria-di-sicurezza-del-frejus/

[5] Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente - "ANAS, Seconda edizione 2009".

[6] I Quaderni Tecnici per la salvaguardia della infrastrutture - "Volume V - ANAS 2009".

[7] Lorenzo Domenichini, Francesca La Torre, Flavio J. Caputo - "Le pavimentazioni nelle gallerie stradali", Strade & Autostrade 2-2007.

[8] Statene Vegvesen, Norwegian Public Roads Administration - Manual 021 "Road Tunnels, April 2004".

[9] Eldho Choorackal Avirachan, "Mix design and performance assessment of self-compacting cement-bound mixtures for pavement foundations of road tunnels", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, 2019.

[10] Ezio Santagata, Eldho Choorackal Avirachan, Pier Paolo Riviera, "Mix design and mechanical characterization of self-compacting cement-bound mixtures for paving applications", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, 2019.

[11] Pier Paolo Riviera, Grazia Bertagnoli, Eldho Choorackal Avirachan, Ezio Santagata, "Controlled low-strength materials for pavement foundations in road tunnels: feasibility study and recommendations", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, 2019.

[12] Eldho Choorackal Avirachan, Pier Paolo Riviera, Davide Dalmazzo, Ezio Santagata, Lorena Zichella, Paola Marini, "Performance-Related Characterization of Fluidized Thermal Backfills Containing Recycled Components", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, 2019.

[13] Gabriele Zisa, "L'utilizzo delle malte cementizie fluide nelle sedi stradali in galleria: mix design e prove di campo in vera grandezza", Politecnico di Torino, 2017.

[14] Luigi Dolce, "Caratterizzazione prestazionale di malte cementizie fluide da adottare nelle costruzioni stradali", Politecnico di Torino, 2019.

[15] Zavanella, Leti, Veggetti, "Progettazione, costruzioni e impianti", Bologna, 2012.

[16] Mario Collepardi, "I calcestruzzi autocompattanti: proprietà e problematiche", 2017.

[17] Luigi Coppola, Servizio Tecnologico di Betonrossi S.p.A, "I calcestruzzi autocompattanti (Self-Compacting Concrete)".

[18] https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/

[19] "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento - UNI EN ISO 14040:2006"

[20] "Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida UNI EN ISO - 14044:2018"

[21] Nicholas J. Santero, Eric Masanet, Arpad Horvath, "Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review", 2011.

[22] Tarja Hakkinen, Kari Makela, "Environmental adaption of concrete - Environmental impact of oncrete and asphalt pavements", Technical Research Centre of Finland - ESPOO, 1996.

[23] Hakan Stripple, "Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis - Second Revised Edition", Gothenburg, Sweden, March 2001.

[24] Arpad Horvath, "A Life-Cycle Analysis Model and Decision-Support Tool for Selecting Recycled Versus Virgin Materials for Highway Applications - Final Report for RMRC Research Project No. 23", University of California at Berkeley, March 2004.

[25] A. Horvath , C. Hendrickson, "Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements", Transport Res Rec 1998.

[26] WH. Roudebush, "Environmental value engineering assessment of concrete and asphalt pavement. Portland Cement Association", 1999.

[27] R. Berthiaume, C. Bouchard, "Exergy analysis of the environmental impact of paving material manufacture", Trans Can Soc Mech Eng 1999.

[28] https://www.lavoripubblici.net/riciclaggio-caldo-delle-pavimentazioni-stradali/

[29] https://www.wirtgen-group.com/it-it/applicazioni/costruzione-stradale/ripristino-stradale/riciclaggio-a-caldo/

[30] https://www.wirtgen-group.com/it-it/applicazioni/costruzione-stradale/ripristino-stradale/riciclaggio-a-freddo-in-situ/

[31] https://dpw.lacounty.gov/gmed/lacroads/TreatmentMicrosurfacing.aspx

[32] http://asphaltmagazine.com/rubblization-for-airfields-and-highways/

[33] https://dpw.lacounty.gov/gmed/lacroads/TreatmentFullDepth.aspx

[34] https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp

[35] Mattia Biondani, "LCA – Life Cycle Assessment applicato alla realizzazione di opere stradali", Università degli studi di Padova, 2014-2015.

[36] Federica Zuccalà, "Studio del ciclo di vita di strade di servizio ad alto contenuto di materiali di riciclo", Politecnico di Torino, 2019-2020.

[37] M.R. Boopendranath, M. Shahul Hameed, "Gross Energy Requirement in Fishing Operations", Cochin University of Science and Technology, Cochin - India , 2013.

[38] https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials

[39] https://www.salute.gov.it

[40] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, "Norme Tecniche di Tipo Prestazionale per Capitolati Speciali d'Appalto", Articolo 4.

[41] https://www.arpa.umbria.it

[42] https://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalents/

[43] Curt Hull, "GHG Lifetimes and GWPs - For ozone-depleting substances and their replacements", 2009.

[44] Life Cycle Inventory: Bitumen, Eurobitume 2012, ISBN 2-930160-26-8

[45] Life Cycle Inventory: Bitumen, Eurobitume 2020, 3rd Edition, April 2020.

[46] Medgar L., Merceau et al., "Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture", Portland Cement Association, 2006.

[47] UNI EN 197-1:2011, "Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni", Ottobre 2011.

[48] Elena Garbarino, Gian Andrea Blengini, Anna Piacenza, "Pianificazione e gestione dei rifiuti da C&D nella Provincia di Torino - Analisi dei flussi e applicazione della metodologia LCA", Maggio 2019.

[49] Gian Andrea Blengini, Elena Garbarino, "Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix", Turin, Italy, 2019.

[50] Angela Farina, Maria Chiara Zanetti, Ezio Santagata, Gian Andrea Blengini, "Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2016.

[51] Michiel Stork, Wouter Meindertsma, Martijn Overgaag, Maarten Neeils, "A Competitive and Efficient Lime Industry - Cornerstone for a Sustainable Europe", EULA, July 2014.

[52] J. R. Stokes e A. Horvath, "Energy and air emissions effects of water", Enivornmental Science and Technology, vol. 43, n. 8, pp. 2680 - 2687, 2009.

[53] P. Sun, A. Elgowainy, M. Wang, J. Han e R. J. Henderson, «Estimation of U.S. refinery water consumption and allocation to refinery products,» Fuel, vol. 221, pp. 542 - 557, 2018.

[54] Prezzi di riferimento per Opere e Lavori Pubblici nella Regione Piemonte, Allegato B, Elenco Prezzi Unitari, 2020.

[55] Prezzi di riferimento per Opere e Lavori Pubblici nella Regione Piemonte, Allegato B, Elenco Prezzi Unitari, 2018.

[56] UNI EN 934-2:2012, "Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura", Luglio 2012.

[57] Clara Celauro, Ferdinando Corriere, Marco Guerrieri, Barbara Lo Casto, Angela Rizzo, "Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road", October 2016.

[58] Pier Paolo Riviera, Eldho Choorackal, and Ezio Santagata, "Performance Evaluation of Innovative and Sustainable Pavement Solutions for Road Tunnels", Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, Turin, Italy.

[59] https://www.ingenio-web.it/30137-valutazione-del-ciclo-di-vita-di-manufatti-innovativi-ecocompatibili-per-lingegneria-idraulica