POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Studio del ciclo di vita di strade di servizio ad alto contenuto di materiali di riciclo

Life cycle assessment of rural roads with high contents of recycled materials

Relatore

Prof.ssa Lucia Tsantilis

Correlatori

Prof. Ezio Santagata

Prof. Pier Paolo Riviera

Ing. Leonardo Urbano

Candidata

Federica Zuccalà

Anno accademico 2019 - 2020

Indice

INTRODUZIONE 1
1. DESCRIZIONE DEL PROGETTO 3
2. ANALISI DELL'APPLICATIVO PaLATE 5
2.1 Struttura principale e presentazione del caso di studio replicato 5
2.2 Fattori di Emissione 8
2.2.1 EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment) 8
2.2.2 EPA (U. S. Environmental Protection Agency) 15
2.2.3 HTP (Human Toxicity Potentials) 23
2.3 Fogli di Lavoro 26
2.3.1 Design 27
2.3.2 Initial Construction 28
2.3.3 Equipment 31
2.3.4 Environmental Results 32
2.4 Aggiornamento unità di misura, riferimenti di cella ed etichette 54
2.5 Conclusioni sullo studio dell'applicativo 57
3. STATO DELL'ARTE 59
3.1 Fresato bituminoso: descrizione e impieghi 59
3.2 Sludge : descrizione e impieghi 61
3.3 Miscele innovative : descrizione e applicazioni 62
3.4 Life Cycle Assessment 65
3.5 Inquadramento del lavoro di tesi all'interno della letteratura analizzata 69
4. CASI STUDIO 71
4.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione 71
4.2 Analisi d'inventario 72
4.3 Scelta della Strada di Progetto 82
4.4 Caso Studio 1: Mix 4 - S 84
4.4.1 Valutazione d'impatto 86
4.4.2 Risultati 110
4.5 Caso Studio 2 : 100%RAP 112
4.5.1 Valutazione d'impatto 113
4.5.2 Risultati 116
4.6 Caso Studio 3 : 100% Aggregati Vergini 117
4.6.1 Valutazione d'impatto 117

4.6.2 Risultati 121
5. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI 123
5.1 I Confronto : Cradle to Gate 123
5.2 II Confronto : Cradle to the End 127
5.2.1 Parte I : Maintenance 127
5.2.2 Parte II : Initial Construction & Maintenance 130
CONCLUSIONI 133
Bibliografia 137
Indice delle Figure 141
Indice delle Tabelle 143

INTRODUZIONE

La conservazione dell'ecosistema e delle risorse naturali sono aspetti fondamentali da tenere in considerazione nella progettazione e costruzione delle moderne infrastrutture viarie. Infatti, oggigiorno, nei differenti strati costituenti la sovrastruttura stradale si prevede l'introduzione di materiali di riciclo provenienti sia dal settore edile sia civile.

Primo fra tutti, il fresato bituminoso, ottenuto dalla rimozione di pavimentazioni stradali ammalorate e che non sono più in grado di svolgere la funzione strutturale e funzionale per le quali sono state progettate. Il conferimento in discariche autorizzate è aumentato esponenzialmente negli anni, comportando notevoli impatti negativi sull'ecosistema. Al tempo stesso, il fresato bituminoso è una risorsa valida, e altamente attrattiva da un punto di vista tecnico, economico e ambientale, se attentamente riciclato in nuove miscele bituminose. Infatti, studi di settore dimostrano come le caratteristiche delle miscele contenenti tale materia prima secondaria, anche in elevati dosaggi, prodotte sia con "tecnologia a caldo" sia con "tecnologia a freddo", hanno caratteristiche meccaniche comparabili con miscele formate totalmente da materie prime vergini. Altri studi, invece, evidenziano i benefici ambientali generati dal riciclaggio del fresato bituminoso poiché non è necessario aprire nuove cave di estrazione degli aggregati e non è richiesta ulteriore produzione di legante bituminoso di origine idrocarburica. È, altresì, da tenere in considerazione la riduzione del conferimento in discarica e la riduzione delle emissioni legate al trasporto quando il riciclaggio avviene in situ.

Un altro materiale che desta particolari problemi connessi al conferimento in discarica, gestione e corretto riutilizzo, è lo sludge, ossia fanghi derivanti dal lavaggio di inerti provenienti da cava o fanghi da attività estrattiva. Lo sludge è un materiale che presenta una granulometria costituita da pezzature molto fini (in alcuni casi simile al tradizionale filler impiegato nei conglomerati bituminosi), altamente plastico e contenente elevate quantità di acqua. Diverse ricerche, condotte anche da studiosi del Politecnico di Torino, hanno dimostrato come tale materiale risulti essere idoneo per conglomerati bituminosi, in sostituzione del filler tradizionale, e per conglomerati cementizi "fluidi" e "auto-compattanti". Le varie alternative, ovviamente valide da un punto di vista meccanico, permettono un corretto riutilizzo dello sludge con considerevoli benefici di carattere ambientale ed economico.

Da un punto di vista operativo, le alternative alla tecnica di produzione a caldo delle miscele bituminose sono la tecnologia "tiepida" e "fredda". In particolare, da un punto di vista ambientale, quest'ultima è quella più attrattiva proprio perché non è necessario portare i materiali ad elevate temperature, quindi si hanno ridotte emissioni e consumi di energia. Lo stesso si può dire anche per le attività di cantiere: infatti, un conglomerato bituminoso caldo richiede maggiori lavorazioni rispetto a una miscela fredda, con risultati negativi da un punto di vista sia energetico che ambientale.

Attraverso un precedente lavoro di tesi magistrale condotto presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, sono state studiate delle miscele innovative, da impiegare per pavimentare strade secondarie a basso volume di traffico. Nello studio in questione, le strade secondarie considerate sono quelle che corrono lungo infrastrutture autostradali e che permettono l'accesso ai punti strategici dell'infrastruttura stessa. Le miscele innovative trattate sono composte da fresato bituminoso e sludge, in quantità superiori all'80, con una piccola porzione di sabbia. L'emulsione bituminosa fornisce la fase legante allo scheletro litico di progetto. Il carattere innovativo che si è voluto conferire riguarda diversi aspetti: innanzitutto, sotto il profilo tecnico, il mix design è stato condotto attraverso alcuni

strumenti e metodi non convenzionali per le miscele bituminose fredde. Sotto il profilo ambientale ed economico, il carattere di innovazione è legato all'impiego di elevate quantità di materie prime secondarie e acqua, con la quale ottenere miscele altamente lavorabili, in modo da minimizzare le attività di cantiere, dalla produzione delle miscele alle fasi di stesa e compattazione. I risultati ottenuti dalla sperimentazione di laboratorio hanno confermato la validità tecnica delle miscele studiate.

Con il presente lavoro di tesi, si vuole studiare, ed eventualmente confermare, l'aspetto di sostenibilità ambientale delle suddette miscele, preventivamente sostenuto e posto come aspetto di innovazione. A tal fine, la metodologia adottata rientra nel più moderno approccio di Life Cycle Assessment (LCA).

Secondo una definizione della SETAC (Society of Environmental Chemistry And Toxicology), ossia la prima organizzazione ad aver sviluppato scientificamente gli aspetti metodologici della LCA, LCA è "*un procedimento oggettivo di valutazione dell'impatto energetico ed ambientale relativi a prodotti, processi o attività, per mezzo della definizione quantitativa dell'energia, dei materiali impiegati e delle emissioni rilasciate nell'ambiente per valutarne l'impatto, identificare e valutare le opportunità di miglioramento. Si prende, quindi, in considerazione l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, dalla fase di estrazione e trasformazione delle materie prime, fabbricazione del prodotto, trasporto, uso, e dismissione finale*."

Da un punto di vista operativo, secondo le normative UNI EN ISO 14044, l'LCA si compone di una serie di fasi: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, analisi dell'inventario, valutazione degli impatti e interpretazione.

Nel presente studio, quindi, è stato eseguito uno studio di LCA di una delle miscele innovative, indicata come "Mix4-S", poiché è risultata essere quella più performante da un punto di vista meccanico. Le analisi sono state eseguite con PaLATE, un applicativo sviluppato dal *Consortium on Green Design and Manufacturing* della *University of California-Berkeley*. PaLATE è uno strumento totalmente dedicato a studi di LCA e Life Cycle Cost (LCC) delle pavimentazioni stradali, che permette di analizzare i principali processi operativi legati alla costruzione e manutenzione delle strade.

Per contestualizzare i risultati ottenuti, sono state introdotte due miscele di riferimento, supposte e ipotizzate rappresentative dello stato corrente con cui sono pavimentate le strade secondarie a basso volume di traffico. La prima miscele è formata da 100 % RAP mentre la seconda da 100 % di aggregati vergini.

I tre materiali, Mix4-S, 100 % RAP e 100% aggregati vergini, sono stati analizzati secondo un approccio "cradle-to-gate", ossia dalla produzione dei materiali base fino alla fase di costruzione della pavimentazione. Solo per Mix4-S e 100 % RAP, invece, è stato eseguito un'analisi del tipo "cradle-to-the-end", ossia dalla produzione dei materiali base fino alla fine della vita utile, escludendo dai confini di sistema le operazioni di rimozione e smaltimento in discarica. È stato introdotto anche un piano di manutenzione in cui si suppone di realizzare degli interventi di riparazione dei dissesti localizzati e dei cicli di rifacimento di una parte dello strato di usura.

La fase di valutazione degli impatti è stata condotta considerando diversi impatti (Consumo di energia, Consumo di acqua, Global Warming Potential, …) e, dai risultati ottenuti, si possono formulare ulteriori considerazioni circa l'ottimizzazione delle fasi di trasporto, produzione delle miscele e manutenzione.

CAPITOLO 1

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'aumento dell'impatto ambientale, associato alla produzione dei materiali, alla costruzione e infine allo smaltimento delle opere civili, si concretizza in emissioni nocive e consumi di materie prime. Negli ultimi anni è aumentato l'interesse internazionale per lo sviluppo di metodi volti ad una migliore comprensione dell'influenza che la realizzazione di tali opere ha sull'ecosistema. Una delle tecniche sviluppate a tal proposito è il Life Cycle Assessment (LCA).

La normativa internazionale di riferimento, che sancisce le linee guida per gli studi LCA, è rappresentata dalla ISO 14044, la quale definisce gli aspetti ambientali e i potenziali impatti affrontati dal LCA (ad esempio l'uso delle risorse e come queste si traducono in emissioni nocive) durante l'intero ciclo di vita di un prodotto, dall'acquisizione delle materie prime , alla produzione, all'uso, fino al trattamento di fine vita, riciclaggio o smaltimento.

Lo scopo dello studio di LCA proposto nel presente lavoro di tesi è quello di valutare il livello di sostenibilità ambientale raggiunto da una pavimentazione caratterizzata da uno strato di usura, avente materiale riciclabile per quasi il 90 % della sua composizione. Le miscele utilizzate sono caratterizzate da materie prime secondarie, quali il *fresato bituminoso*, proveniente dai processi di manutenzione e rifacimento delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, e lo *sludge*, ossia fanghi derivanti dal lavaggio di inerti provenienti da cava o fanghi da attività estrattiva. Tali miscele sono state definite all'interno del lavoro di tesi magistrale effettuato da Stirparo et al. [1] il cui obiettivo è stato definire un set di miscele innovative da utilizzare per la costruzione della pavimentazione di strade di servizio a basso volume di traffico. L'idea di realizzare queste miscele è nata dalla necessità dell' impresa incaricata della gestione e manutenzione dell'autostrada A32 Torino – Bardonecchia di procedere alla pavimentazione delle strade di servizio che corrono lungo l'infrastruttura autostradale permettendo l'accesso ai punti strategici della stessa (come le pile dei viadotti). Inoltre, i materiali necessari alla realizzazione delle miscele (fresato bituminoso e sludge) sono in grado di abbattere l'imponente accumulo di fresato proveniente dalle operazioni di fresatura effettuate sull'infrastruttura analizzata e buona parte del materiale di scarto "sludge", proveniente dalle operazioni di taglio e lavaggio dei materiali lapidei. Ai fini dello studio LCA, tra il set di miscele presentate, è stata scelta la più performante che ha riportato elevata lavorabilità, buoni valori di modulo elastico, buona risposta alle prove di ormaiamento.

La valutazione della sostenibilità ambientale è stata effettuata mediante l'utilizzo di PaLATE, un applicativo dedicato alla valutazione delle emissioni prodotte durante le varie fasi di costruzione stradale, il quale è stato adeguatamente studiato per permetterne un utilizzo al massimo dell'efficacia.

Il campo di applicazione prevede l'analisi delle conseguenze ambientali provenienti dalla realizzazione di un chilometro di strada secondaria, mediante l'utilizzo di tre differenti miscele:

- **Mix 4-S**, all'interno del quale è stata analizzata la miscela innovativa ad elevato contenuto di materiale riciclato, miscelata a freddo e successivamente stesa e compattata mediante l'utilizzo di una vibrofinitrice e di un rullo gommato;

- **100%RAP**, in cui è stata analizzata una miscela caratterizzata unicamente da fresato bituminoso frantumato, il quale è stato successivamente steso e compattato senza ulteriori processi intermedi;
- **100%Aggregati Vergini**, il quale prevede l'utilizzo di una miscela caratterizzata unicamente da aggregati vergini miscelati con acqua, per aumentarne la lavorabilità. Anche in questo caso, le uniche attività di cantiere previste sono la stesa e la compattazione .

Sono stati sviluppati due distinti confronti, applicando due differenti metodologie per l'analisi del ciclo di vita delle differenti miscele:

- I Confronto, in cui si è lavorato secondo un approccio *cradle to gate* per le tre miscele a disposizione, considerando tutti i processi dalla produzione dei materiali alla costruzione della strada;
- II Confronto, in cui si è lavorato secondo un approccio *cradle to end* per le miscele Mix 4-S e 100%RAP, considerando tutti i processi a partire dalla produzione dei materiali fino al raggiungimento del termine di vita utile, posto pari a 10 anni, includendo anche dei possibili scenari di manutenzione.

Le unità funzionali scelte sono le seguenti: per il primo confronto, la lunghezza della pavimentazione presa in esame (pari ad 1 km) mentre per il secondo confronto la lunghezza di riferimento (1 km) e la durata della vita utile della strada, posta pari a dieci anni (decimo anno escluso). Le limitazioni imposte a questo studio di LCA sono quelle definite dai confini di sistema, relativi quindi alle lavorazioni che si è scelto di trascurare come, ad esempio, i processi di smaltimento o riutilizzo della pavimentazione una volta che questa ha raggiunto il termine ultimo della sua vita di servizio.

I risultati di questo studio LCA saranno forniti sottoforma degli indicatori già disponibili nell'applicativo PaLATE e, nello specifico, sono : il Gross Energy Requirement (GER), il consumo di acqua, il Global Warming Potentials (GWP), NO_x, SO_x, CO, Hg, Pb, RCRA Hazardous Waste Generated, e Human Toxicity Potentials (HTP) cancerogeni e non cancerogeni.

Sebbene il database fornito all'interno di PaLATE sia abbastanza esaustivo in termini di emissioni e dati necessari per la definizione quantitativa degli indicatori elencati, è stata effettuata un'analisi d'inventario sulla base dei dati forniti in letteratura per la maggior parte dei materiali utilizzati nei processi di realizzazione stradale, come: bitume, aggregati vergini, emulsione e cemento. In aggiunta, è stato effettuato un Life Cycle Inventory (LCI) anche per tutte le fasi di fornitura dell'acqua e quelle dovute a tutti i processi di produzione del diesel, necessario al funzionamento dei macchinari di cantiere.

CAPITOLO 2
ANALISI DELL'APPLICATIVO PaLATE

Attraverso un precedente lavoro di tesi magistrale, condotto nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, sono state studiate delle miscele innovative da impiegare per lo strato di usura di strade secondarie a basso volume di traffico. Le miscele sono composte da un elevato tenore di materie prime secondarie (fresato bituminoso e sludge, quest'ultimo proveniente dalle lavorazioni degli inerti di cava) e miscelate con "tecnologia a freddo". Le varie componenti dello scheletro solido sono legate dal bitume residuo dall'emulsione bituminosa e si introducono elevati dosaggi di acqua in modo da massimizzare la lavorabilità delle miscele. Quest'ultima caratteristica è una di quelle che conferisce l'aspetto di innovazione alle miscele: infatti, massimizzare la lavorabilità significa ridurre le lavorazioni in cantiere connesse alla stesa e compattazione. In questo modo, si ottiene un duplice beneficio: ambientale, poiché ci sono ridotte emissioni ambientali nocive connesse ai mezzi di cantiere, ed economico, in quanto tempi di lavorazione e macchinari per la posa in opera sono ridotti al minimo. La caratteristica di sostenibilità ambientale ed economica, e quindi di innovazione, è accentuata osservando anche la composizione e produzione delle miscele. Nell'aspetto di innovazione rientra anche lo studio di mix design poiché sono utilizzati strumenti (prova di spandimento per la definizione della fase fluida ottimale e modello di Dinger & Funk per la composizione granulometrica di progetto) non convenzionali rispetto alla pratica corrente.

Associare uno studio di Life Cycle Assessment (LCA) al suddetto studio di mix design permetterà di confermare o meno se l'innovazione che si vuole apportare, in termini di sostenibilità ambientale, è confermata o meno. L'analisi di LCA è stata portata avanti attraverso l'applicativo PaLATE. Il presente capitolo, quindi, espone in maniera approfondita tutte le peculiarità dell'applicativo, guardando alla composizione dei fogli di lavoro e alle modalità con cui sono stati definiti i fattori di emissione per ciascun inquinante associato ai vari processi di costruzione delle strade. È stato replicato un caso studio disponibile in letteratura in modo da esplicitare "letteralmente" tutte le formulazioni, considerando i materiali base costituenti le miscele fino alla definizione degli impatti ambientali.

2.1 Struttura principale e presentazione del caso di studio replicato

PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) è un applicativo di Excel che permette la valutazione degli impatti ambientali ed economici connessi alla costruzione delle strade. È stato realizzato dal *Consortium on Green Design and Manufacturing* dell'Università della California (Berkeley) ed è in grado di eseguire sia un Life Cycle Assessment (LCA) che un Life Cycle Costs Analysis (LCCA) [2]. È suddiviso in tre sezioni principali:

- Input, all'interno del quale è possibile inserire tutte le caratteristiche della strada.
  È caratterizzato da quattro fogli di lavoro:
  - Design, dove è possibile inserire le caratteristiche geometriche della strada e i materiali utilizzati;
  - Initial Construction, il quale prevede l'inserimento dei volumi dei materiali da costruzione e le loro distanze di trasporto;
  - Maintenance, il quale prende in considerazione l'ammontare di materiali da aggiungere ai calcoli per garantire la vita di servizio della strada;
  - Equipment, permette di scegliere i macchinari necessari allo specifico processo di costruzione.

- Output, dove i risultati vengono riportati in due fogli di lavoro:
    - Environmental Results, i cui impatti ambientali sono espressi in termini di Gross Energy Requirement "GER", Consumo di Acqua, Global Warming Potential "GWP", NOx, PM10, CO, Hg, PB, RCRA Hazardous Waste Generated, Human Toxicity Potential (HTP) cancerogeno e non cancerogeno;
    - Costs Results, in termini di VAN (Valore Attuale Netto) della costruzione e della manutenzione iniziale, nonché il costo annualizzato nel periodo di analisi.

- Dati, i quali posso essere suddivisi in tre categorie relativi:
    - alle emissioni;
    - ai processi di costruzione stradale;
    - al potenziale di tossicità umana.

Naturalmente, l'utilizzo di questi dati dipende dal tipo di materiale, dalla fase del ciclo di vita del materiale e dal risultato ambientale voluto [3].

L'applicativo PaLATE è stato impiegato nello studio di Del Ponte et al. [4], dove è stato utilizzato per determinare gli impatti ambientali e i vantaggi derivanti dall'utilizzo di materiali riciclati nella costruzione di un'autostrada. In questo caso, le emissioni e i benefici di carattere ambientale sono stati analizzati mettendo a confronto miscele costituite da materiali riciclati in percentuale variabile, con una miscela caratterizzata al 100% da materiali vergini. Inoltre, le emissioni di anidride carbonica, il consumo energetico e il consumo di acqua sono stati ritenuti sufficienti a fornire una trattazione esauriente del caso.

Un'interessante panoramica sul funzionamento dell'applicativo è stata proposta da Nathman et al. [3] mediante l'analisi di tutti e dodici gli impatti ambientali esibiti dal programma. I ricercatori hanno analizzato due differenti casi studio: il primo riguarda il confronto tra due strategie con le quali estendere la vita della pavimentazione stradale mentre il secondo mette a confronto miscele contenenti fresato bituminoso, polverino di gomma da pneumatici fuori e miscele riciclate a freddo in situ. I ricercatori concludono l'analisi sostenendo che PaLATE è un applicativo efficiente in grado di supportare studi di LCA legati al settore delle pavimentazioni stradali.

In una fase iniziale del presente lavoro, al fine di comprendere il funzionamento di PaLATE, è stato replicato il caso studio di Farina et al. [5]

In tale studio è stato effettuato, utilizzando il software SimaPro, un Life Cycle Assessment (del tipo cradle to the end) di miscele bituminose contenenti polverino di gomma proveniente da pneumatici fuori uso, prodotte con tecnologia "wet" e "dry", costituenti soltanto lo strato di usura. Sono state considerate varie configurazioni della sovrastruttura stradale, con differenti piani di manutenzione e vita di servizio. È inoltre inclusa una miscela bituminosa tradizionale posta come miscela di riferimento. I risultati ottenuti fanno riferimento alla costruzione di 1 m di strada, rappresentativo dell'unità funzionale.

Utilizzando l'inventario di default disponibile in PaLATE, è stata considerata la sola fase di "Initial Construction" dello strato di usura in conglomerato bituminoso tradizionale. L'impatto del ciclo di vita è stato riferito all'ammontare complessivo di energia consumata (Gross Energy Requirement, "GER") e alla CO_2 equivalente (Global Warming Potential, "GWP"). Il confronto tra i risultati ottenuti con PaLATE e quelli riportati in Farina et al. [4] sono stati riportati in Tabella 2.1

Tabella 2.1 - Confronto tra gli impatti forniti da PaLATE e SimaPRO

			PaLATE 2.0	**SimaPRO7.3**
GER [MJ/m]	**Initial Construction**	**Usura**	4.024	8.501
GWP [kg/m]	**Initial Construction**	**Usura**	207	152

L'evidente discrepanza tra i dati forniti dai due software ha posto le basi per questo approfondimento e il caso studio di Farina et al. [5] è stato preso come esempio numerico durante tutta l'analisi.

2.2 Fattori di Emissione

Tutti i fattori di emissione utilizzati in PaLATE sono disponibili online o sono definiti sulla base di rapporti ambientali forniti da governi e comunità scientifiche internazionali. Il metodo Economic Input Output – LCA è stato utilizzato come fattore di emissione predefinito in quanto la tabella nazionale EIO composta dai vettori ambientali, una volta combinati con il costo di un certo settore economico producono una conversione simile ad un fattore di emissione. PaLATE utilizza il metodo EIO-LCA fornito dal Carneige Mellon University che lo esegue sulla base dei dati risalenti al 1997 [3]. Sebbene le innovazioni e le caratteristiche dei materiali da costruzione, così come l'universo economico che l'accompagnano, siano in continuo mutamento, uno dei punti di forza è che i dati pur essendo validi possono essere aggiornati di pari passo con l'evoluzione scientifica.

Tutti i fattori di emissione presenti in PaLATE sono stati riportati nei fogli:

- 'EMF transport', dove sono riportati, attraverso la Sector Table, i fattori di emissione legati alla produzione, per unità di massa, dei differenti materiali;
- 'Eqpmt Details' , dove sono riportati le emissioni e consumi relativi ai macchinari messi a disposizione da PaLATE per le varie fasi di costruzione.

Di seguito viene riportata un'analisi delle fonti utilizzate per la definizione di un numero rilevante di fattori di emissione.

2.2.1 EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment)

La maggior parte dei valori relativi alla produzione dei materiali è stata ottenuto mediante il modello EIO-LCA fornito dalla Carneige Mellon University [6].

Il metodo EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment) è in grado di stimare i materiali, le risorse energetiche e le emissioni ambientali derivanti dalle attività economiche. Tale metodo è stato teorizzato e sviluppato dall'economista Wassily Leontief negli anni '70 sulla base di un suo precedente lavoro di input-output degli anni '30 per il quale ha ricevuto il Premio Nobel per l'economia [7]. A metà degli anni '90, i ricercatori della Carneige Mellon University, grazie alla disponibilità fornita dalle nuove potenze di calcolo le quali erano in grado di eseguire manipolazioni di matrici su larga scala in tempo reale, hanno trasformato il complesso metodo EIO-LCA in un uno strumento di facile utilizzo, disponibile in rete e in grado di fornire risultati gratuitamente.

Lo strumento o "tool" messo a disposizione in rete, è in grado di fornire una guida sugli impatti generati da diversi tipi di prodotti, materiali, servizi o industrie, nel rispetto delle risorse di provenienza e delle emissioni prodotte durante tutta la catena di approvvigionamento. [7]

Lo studio di LCA portato avanti da questo metodo è di tipo "cradle to gate" [8] il quale consiste in una valutazione parziale del ciclo di vita di un prodotto. Considerando ad esempio la produzione di un automobile, l'analisi degli impatti parte dai processi di estrazione e lavorazione delle materie prime (estrazione di minerali metallici, produzione di parti elettroniche ecc.) fino all'immissione sul mercato del prodotto finale (compresi quindi gli impatti prodotti dall'impianto di assemblaggio finale ma esclusi quelli dovuti al trasporto del prodotto al consumatore a meno che non si consideri un modello del tipo 'Purchaser Price Model', come verrà spiegato più avanti nel testo).

L'Applicativo

È possibile utilizzare l'applicativo direttamente dal sito della Carneige Mellon University, cliccando sulla finestra ' Use the Tool' [9]. La pagina iniziale è riportata in Fig. 2.1 ed è caratterizzata da quattro passaggi principali all'interno del quale è possibile inserire i dati di input necessari per far lavorare il modello.

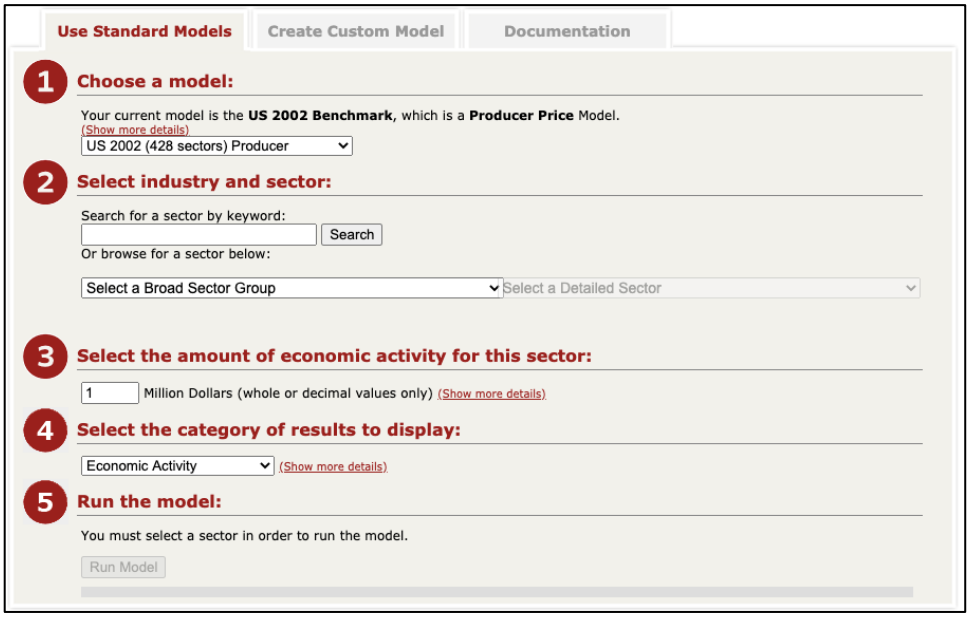


Figura 2.1 – Interfaccia utente (applicativo EIO-LCA)

Passo 1: Scelta del Modello

I modelli si suddividono in:

- 'Producers Price Models', il quale definisce un confine specifico a cui deve far capo lo studio in quanto include gli impatti associati ai principali processi di produzione (dall'estrazione delle risorse all'assemblaggio del prodotto) ma non considera tutti i processi che interessano il prodotto una volta che questo ha abbandonato il sito di produzione;
- 'Purchaser Price Model', il quale rappresenta un miglioramento del precedente in quanto tiene conto anche della distribuzione al consumatore finale;
- 'International Producer/Purchaser Price Models', dove l'unica differenza rispetto ai precedenti è la possibilità di considerare settori relativi a nazioni diverse dagli Stati Uniti, come ad esempio Germania, Perù, Canada, ecc.

La lista dei modelli disponibili è riportata in Fig. 2.2.

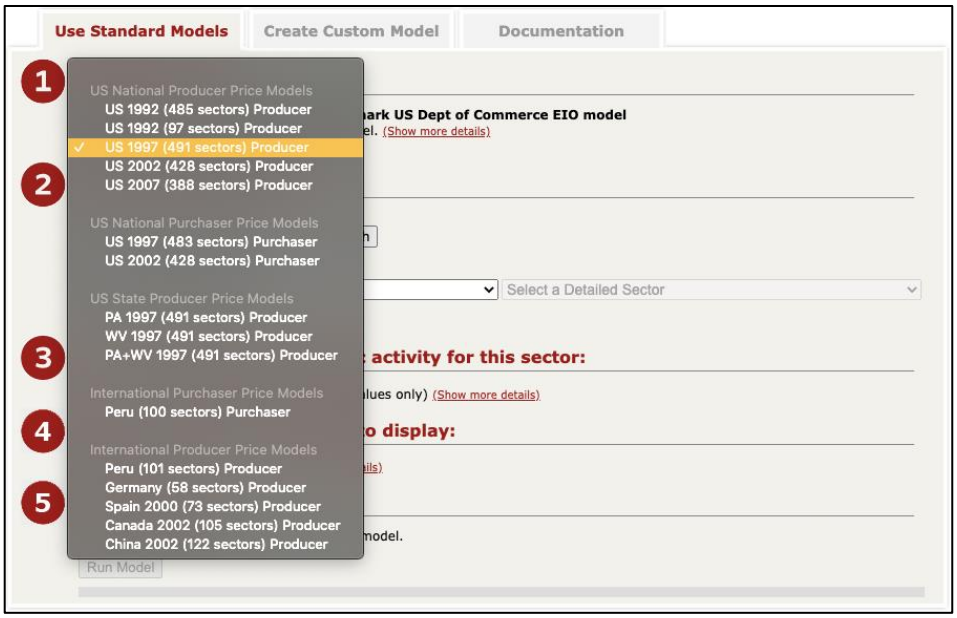


*Figura 2.2- Scelta dei modelli (*applicativo *EIO-LCA)*

Passo 2: Selezione del settore industriale

La scelta del settore industriale viene effettuata selezionando un macrosettore cliccando sul menu a tendina 'Select a Broad Sector Group' come riportato in Fig. 2.3

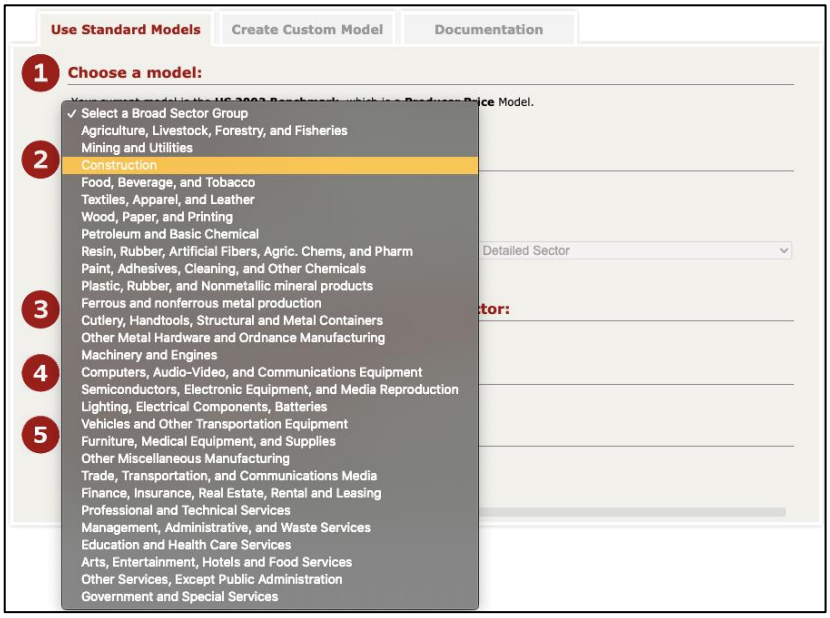


*Figura 2.3- Lista dei settori industriali (*applicativo *EIO-LCA)*

Mentre l'ambito più appropriato viene scelto cliccando su 'Select a Detailed Sector' come riportato in Fig. 2.4, per raggiungere un maggiore livello di precisione.

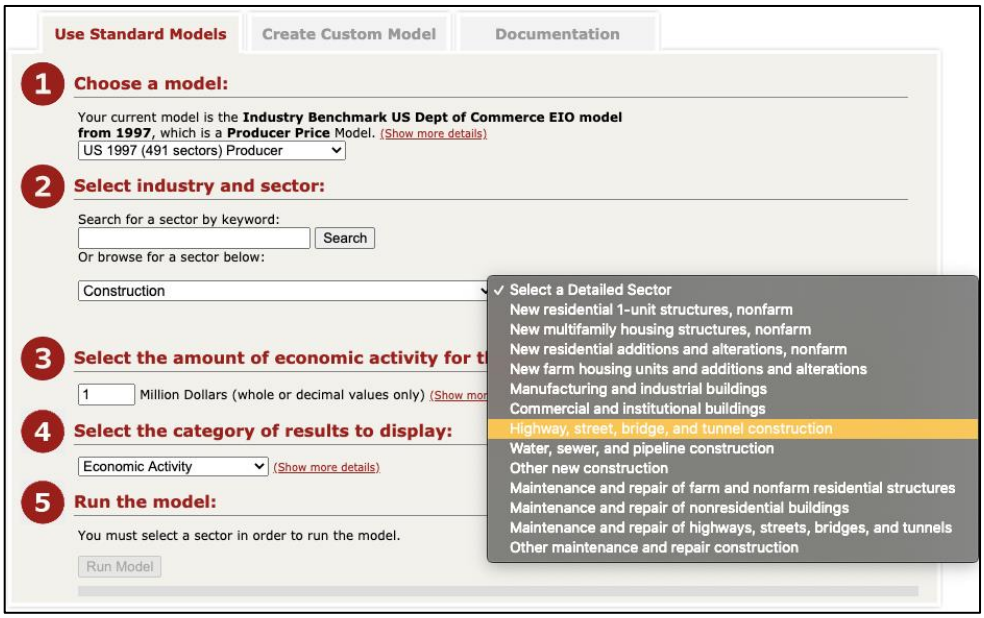


*Figura 2.4- Lista dei rami d'interesse (*applicativo *EIO-LCA)*

Ogni settore industriale può essere costituito da più NAICS sectors dove, NAICS è l'acronimo di North American Industry Classification System definito come "il criterio utilizzato dalle agenzie di statistica federali per classificare gli stabilimenti aziendali allo scopo di raccogliere, analizzare e pubblicare dati statistici relativi all'economia aziendale degli Stati Uniti" [10] e permette di ottenere informazioni dettagliate su ogni settore associandovi un codice identificativo anche detto 'NAICS code'. Ad ogni modello, sono stati associati un numero di 'NAICS sectors' indicato tra parentesi nel menu a tendina come riportato in Fig. 2.5

*Figura 2.5 – NAICS sectors (*applicativo *EIO-LCA)*

Ulteriori informazioni sugli NAICS code si possono ottenere nel dettaglio mediante il manuale pubblicato dal governo degli Stati Uniti [11] dove tutti i codici riportano una descrizione precisa su quali siano i campi di validità dei settori associati ad ogni codice, oppure, informazioni sommarie possono essere definite direttamente sulla schermata dell'applicativo.

Una volta scelto il macrosettore industriale, infatti, in basso comparirà una finestra con sfondo grigio (come da Fig. 2.6) in cui verranno elencati tutti gli NAICS sectors associati a quel settore industriale e la relativa spiegazione circa il loro campo di validità.

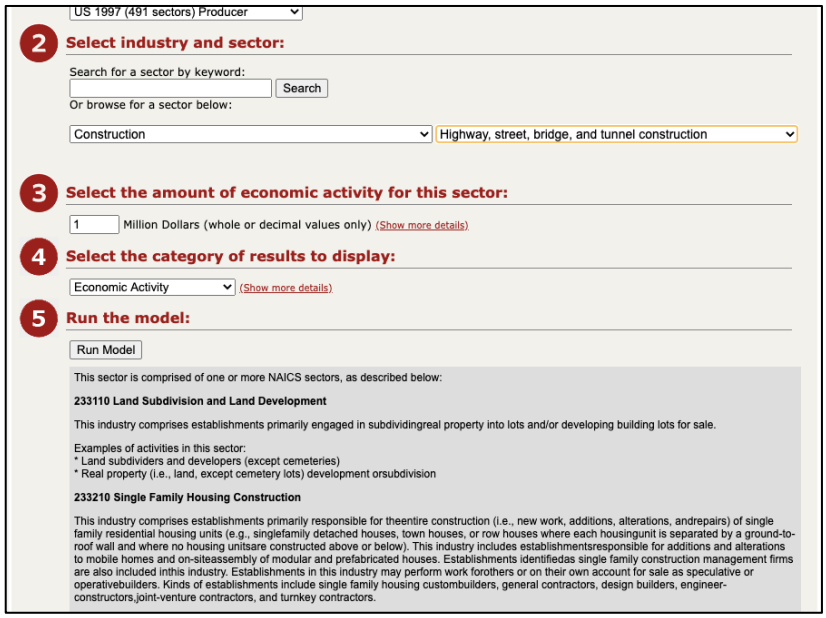


Figura 2.6- Informazioni sugli NAICS sectors (applicativo *EIO-LCA)*

Infine, è stata prevista una barra di ricerca tramite parole chiave nel caso in cui l'utente non sia in grado di definire autonomamente a quale settore industriale faccia capo il prodotto che intende analizzare.

Passo 3: Selezionare l'ammontare di attività economica del settore

I vettori ambientali presenti nella tabella nazionale EIO necessitano di una stima dell'ammontare dell'attività economica (in termini di milioni di dollari) del determinato settore considerato, per poter produrre i fattori di emissione. Con il termine *attività economica*, si indica il "risultato di una combinazione di differenti risorse, quali attrezzature, lavoro, tecniche di lavorazione, prodotti che danno luogo alla produzione di specifici beni o servizi. Pertanto, un'attività è caratterizzata da un input di risorse, da un processo produttivo e da un output di prodotti" (ISTAT, 2001).

Passo 4: Selezionare la categoria di risultati da mostrare

L'ultimo passo permette di scegliere la categoria di risultati che si vuole ottenere mediante il metodo EIO-LCA, come riportato in Fig. 2.7, e si suddividono in:

- Economic Activity, il quale rappresenta l'effettiva attività economica per il settore industriale scelto ed è espresso in termini di value added (come costi della mano d'opera, degli affitti, delle royalties, dei dividendi e degli utili) e direct economic effects (ovvero, gli acquisti effettuati);
- Conventional Air Pollutants, il quale fornisce gli impatti ambientali in termini di SO_2, CO, NO_x, VOC (Volatile Organic Compounds), Pb e PM_{10};
- Greenhouse Gases, il quale esprime gli inquinanti atmosferici in termini di GWP (Global Warming Potential), CO_2, CH_4, N_2O, e CFC (Cholorfluorocarbons) .

- Energy, dove per ogni settore si riportano i consumi di elettricità, carbone, gas naturale, LPG (Liqued Petroleum Gas), benzina per motori, cherosene e combustibile residuo.
- Toxic Releases, il quale quantifica il rilascio di sostanze tossiche in acqua, nel territorio e nel sottosuolo.
- Employment, il quale quantifica l'ammontare della forza lavoro necessaria lungo tutta la catena di produzione del settore industriale scelto.

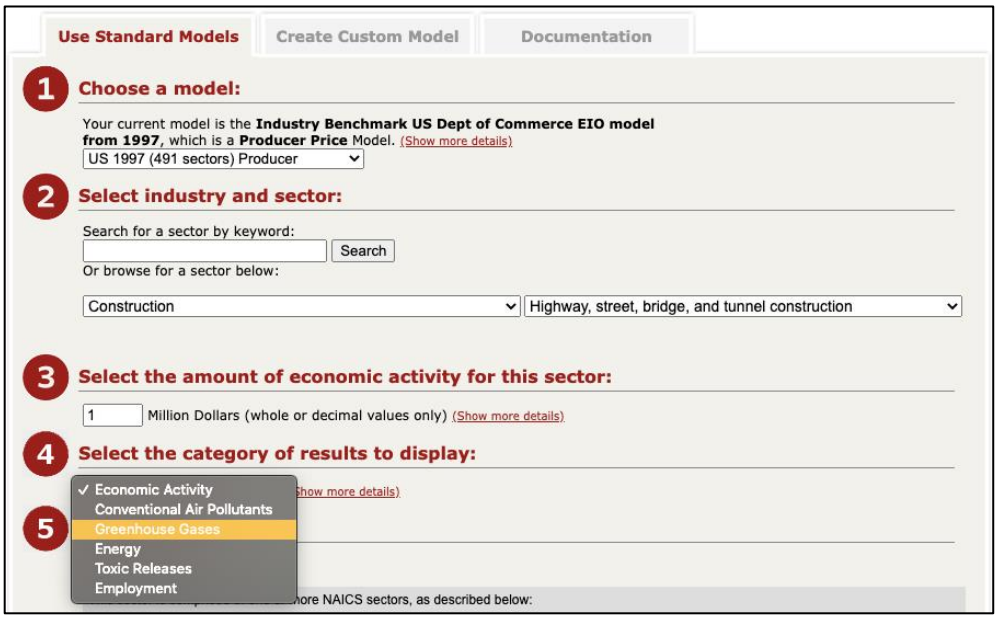


*Figura 2.7 – Lista delle Categorie (*applicativo *EIO-LCA)*

I Risultati

Dopo aver inserito tutti i dati di input e aver avviato il modello, la pagina dei risultati si presenta come riportato in Fig. 2.8. In alto a sinistra è presente un sommario dei dati di input inseriti, in alto a destra è possibile accedere alla documentazione relativa al modello utilizzato mentre, nella parte centrale è stata riportata la tabella degli impatti, la quale presenta sulle righe gli NAICS sectors e sulle colonne gli impatti che si è scelto di visualizzare.

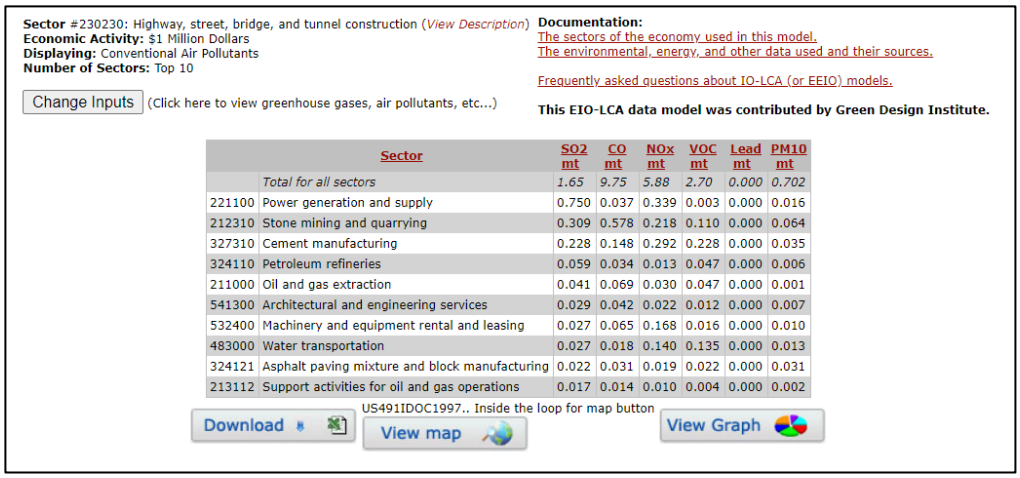


Figura 2.8 – Tabella dei risultati (EIO-LCA)

In Fig. 2.8 sono stati riportati a titolo di esempio tutti i valori che si presuppone siano stati utilizzati da PaLATE per la definizione dei principali inquinanti atmosferici riportando soltanto i primi dieci NAICS sectors .

È stato trovato riscontro con la maggior parte dei settori presenti nella Sector Table (riportati nel foglio EMF Transport) e quelli forniti dall'applicativo, mediante l'utilizzo degli NAICS code. Inoltre, le unità di misure fornite dall'applicativo sono le stesse presenti all'interno del foglio EMF transport, ossia tonnellata metrica/milione di dollari, successivamente convertiti per semplificazione da PaLATE in g/$m, come riportato in Eq. (2.1). La Sector Table, riassuntiva dei diversi impatti ambientali, è riportata in Fig. 2.9.

$$\frac{Metric\ tons}{Million\ \$} = \frac{10^6\ g}{10^6\ \$} = \frac{g}{\$} \tag{2.1}$$

	mt/10^6$	mt/10^6$	mt/10^6$	mt/10^6$	mt/10^6$	TJ/10^6$	MkWh/10^6$				
	g/$	g/$	g/$	g/$	g/$	MJ/$	kWh/$	g/$	g/$	g/$	gal/$
Sector	CO_2	CO	NO_2	SO_2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
Asphalt paving mixt	7.203,00	1,64	1,74	1,07	1,90	77,47	0,69	3,88E-05	0,0020	140,13	3,79
Ready-mixed conc	1.318,80	11,97	19,59	17,19	6,12	19,06	0,67	3,88E-05	0,0021	33,13	6,03
Blast furnaces and	1.999,93	6,71	3,56	2,81	1,24	31,55	1,26	4,E-02	0,0157	49,49	66,26
Sand and Gravel	1.094,22	1,44	2,20	1,07	3,27	15,45	1,02	4,05E-08	0,0003	17,96	2,15
Bitumen	1.236,42	5,22	6,88	6,23	1,17	21,77	0,86	3,88E-05	0,0018	386,74	9,14
cement	3.153,87	13,47	37,93	37,60	7,10	44,94	1,96	3,88E-05	0,0037	19,48	22,27
concrete additives	1.200,34	6,15	4,89	3,61	1,76	20,05	0,84	3,88E-05	0,0027	299,11	18,71
asphalt emulsion	1.236,42	5,22	6,88	6,23	1,17	21,77	0,86	3,88E-05	0,0018	386,74	9,14
water	609,87	2,43	3,22	3,30	1,14	7,96	0,23	4,67E-07	0,0012	36,00	2,01
Electric services (u	12.439,74	3,66	35,60	69,69	2,42	129,02	0,15	4,67E-07	0,0019	15,23	0,81

Figura 2.9 – Sector Table (g/$)

Non è stato possibile trovare un riscontro numerico tra i valori presenti all'interno della Sector Table e quelli forniti dall'applicativo in quanto tra loro differiscono per anno di emissione. La Sector Table è stata definita mediante l'utilizzo dell'applicativo nell'anno 2002 ma dato che quest'ultimo ha subito un aggiornamento nell'anno 2005 [12], tutti i valori che sono stati forniti in anni successivi al 2005, differiranno da quelli riportati all'interno di PaLATE.

Infine, per ottenere i valori finali in g/ton (grammo di inquinante emesso su tonnellata di materiale prodotto), PaLATE moltiplica i valori della Sector Table di Fig. 2.9 per un prezzario [13] che riporta, per ciascun materiale, il costo espresso in $/ton Sector Table(Fig. 2.10). I risultati della conversione, riportata in Eq. (2.2), sono inseriti all'interno della versione finale della Sector Table, illustrata in Fig. 2.10.

$$\frac{g}{\$} \cdot \frac{\$}{ton} = {}^{g}/_{ton} \tag{2.2}$$

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 mixt	183.016	42	44	27	48	1.968	18	1,E-03	5,E-02	3.560	96
Ready-mixed concr	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	157	154	10	4,E-07	3,E-03	179	79.490
Bitumen	1.121.978	4.736	6.239	5.653	1.057	19.757	784	4,E-02	2,E+00	350.942	31.388.630
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	27.118.690
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 (uti	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 2.10 – Sector Table (g/ton)

In definitiva, la Sector Table di Fig. 2.10 riporta i fattori di emissione legati alla produzione dei principali materiali costituenti le miscele bituminose.

2.2.2 EPA (U. S. Environmental Protection Agency)

All'inizio del 1970, in seguito alle crescenti preoccupazioni dell'opinione pubblica sul deterioramento della qualità atmosferica nelle città, sulle aree naturali disseminate di detriti e sulle riserve idriche urbane contaminate, il presidente degli Stati Uniti Richard Nixon, ha presentato alla Camera e al Senato un messaggio innovativo in 37 punti volto alla salvaguardia dell'ambiente e della salute umana [14]. A tal proposito, nello stesso anno, il Congresso ha deciso di raggruppare sotto un'unica agenzia, la Environmental Protection Agency (EPA), la capacità governativa di controllo dell'inquinamento e di definizione delle responsabilità ambientali. Alcune delle competenze che fanno capo all'EPA sono:

- Effettuare ricerche su importanti inquinanti e sull'impatto che questi hanno sull'ambiente complessivo;
- Fissare e pretendere l'osservanza degli standard per i singoli inquinanti e per la qualità di acqua e aria;
- Porsi come riferimento unico per tutti gli stati che procedono con i programmi di controllo dell'inquinamento, fornendo assistenza finanziaria, tecnica e di formazione.

Attraverso gli studi condotti da EPA, PaLATE completa l'inventario per i seguenti inquinanti:

- Particolato, le cui emissioni coprono l'intero spettro dei processi di lavorazione degli aggregati, dall'estrazione in cava al carico/scarico del materiale sull'autocarro;
- CO_2, CO, NO_X, SO_2, PM10, Aldeidi e Composti Organici, provenienti dall'utilizzo di motori industriali a diesel e benzina;
- CO_2, CO, NO_X, SO_2, PM10, provenienti dall'utilizzo di impianti di miscelazione del conglomerato bituminoso.

Particolato (PM10)

I valori di particolato relativi ai processi di lavorazione in cantiere (come carico e scarico degli autocarri e operazioni in cava), riportati nel foglio EMF Transport, sono stati definiti mediante l'utilizzo degli SCC (Source Classification Code) riportati in colonna D accanto al valore dell'inquinante (colonna E) come riportato in Fig. 2.11.

	A	B	C	D	E	F	G
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	dary crushing/screening - stone quarrying processing			3-05-020-02	6,18E-03	1,50E-02	uncontrolled
68	dary 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	screen/convey/handling - stone quarrying processing			3-05-020-06	5,77E-04	1,40E-03	uncontrolled
72	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	ransfer 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	

Figura 2.11 - Valori di PM10 in PaLATE

L'EPA utilizza i Source Classification Codes (SCC) per classificare un certo numero di attività in grado di generare emissioni. Vengono utilizzati come codici identificativi e permettono una ricerca semplificata dei processi presenti all'interno dell'Inventario Nazionale delle Emissioni (NEI) statunitense o in altre banche dati fornite dall'EPA [15] .

In PaLATE, i processi sono stati definiti mediante l'utilizzo di WebFIRE , uno strumento online il cui database contiene i fattori di emissione sviluppati dall'EPA per gli inquinanti atmosferici pericolosi (noti nella letteratura internazionale anche come Hazardous Air Pollutants o HAP) e per i processi industriali e non industriali. Inoltre, WebFIRE contiene informazioni descrittive relative al tipo di industrie e di sorgente di produzione e informazioni sugli inquinanti emessi con correlata documentazione di supporto [16].

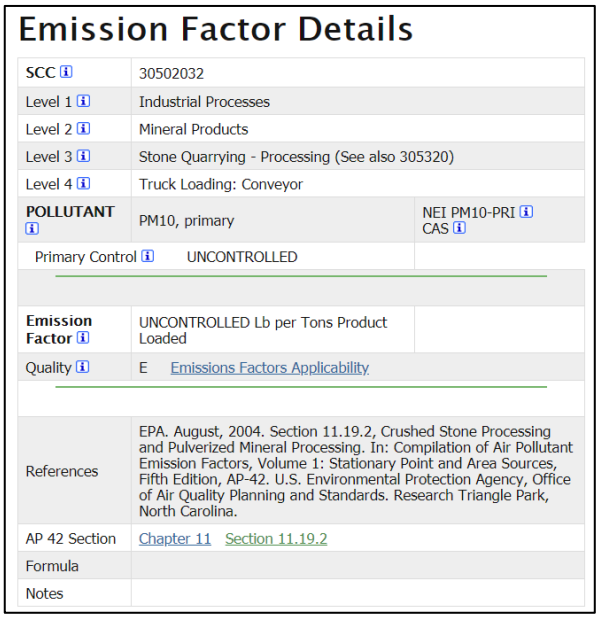
A titolo di esempio è stata riportata la ricerca del SCC 30502032 relativo al 'truck loading' (cella D64 all'interno del foglio Excel) mediante l'utilizzo di WebFIRE disponibile gratuitamente sul sito dedicato [17] .

Il risultato fornito da WebFIRE è riportato in Fig. 2.12 e presenta:

- una suddivisione in livelli di dettaglio crescenti, partendo da un primo livello che fornisce le informazioni più generali sul processo di emissione (i.e. processo industriale), fino ad un quarto livello ancora più dettagliato in quanto presenta le specifiche del processo (i.e. estrazione e lavorazione della pietra);
- informazioni sul tipo di inquinante associato al processo;

- indicazioni circa l'utilizzo o meno di dispositivi di controllo volti alla riduzione delle emissioni inquinanti (in questo caso, poiché contrassegnato con 'Uncontrolloed' non è stato previsto l'utilizzo di alcun dispositivo di controllo.

La caratteristica più importante è quella di poter risalire al capitolo e alla sezione dell'AP-42 (noto come la raccolta dei fattori di emissione redatti dall'EPA) all'interno del quale è possibile trovare il valore del fattore di emissione cercato; quest'ultimo viene riportato sia in libre su tonnellata che in chilogrammo su megagrammo.



Emission Factor Details

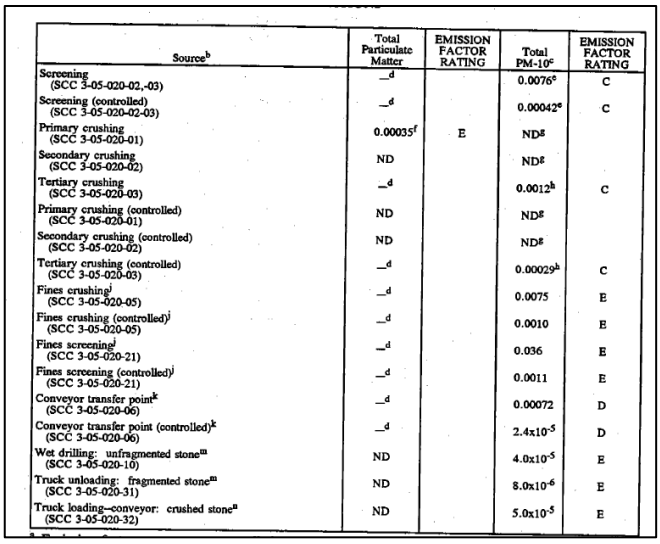
SCC	30502032	
Level 1	Industrial Processes	
Level 2	Mineral Products	
Level 3	Stone Quarrying - Processing (See also 305320)	
Level 4	Truck Loading: Conveyor	
POLLUTANT	PM10, primary	NEI PM10-PRI CAS
Primary Control	UNCONTROLLED	
Emission Factor	UNCONTROLLED Lb per Tons Product Loaded	
Quality	E Emissions Factors Applicability	
References	EPA. August, 2004. Section 11.19.2, Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.	
AP 42 Section	Chapter 11 Section 11.19.2	
Formula		
Notes		

Figura 2.12 - Dettagli sui fattori di Emissione (applicativo *WebFIRE)*

Dato che la Section 11.19.2 fornita da WebFIRE fa capo alla versione aggiornata presente all'interno del AP 42 , in un primo momento, non è stato possibile trovare riscontro tra i dati forniti e quelli riportati in PaLATE che presenta l'anno 2001 come ultimo aggiornamento.

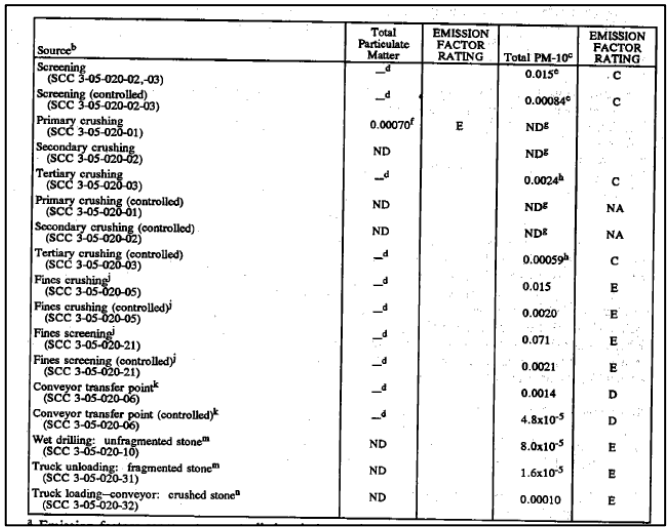
Facendo invece riferimento all' edizione dell' AP 42 'Compilation of Air Pollutant Emission Factor' del 1995 [18] è stato possibile trovare esatta corrispondenza tra la maggior parte dei valori di emissioni riportati in EMF Transport (colonna F della Fig. 2.11) e quelli forniti dall'EPA per il particolato con dimensione inferiore o uguale a 10 micrometri.

Le emissioni sono state riportate sia in chilogrammo su megagrammo (come descritto in Fig 2.13) sia in libbre su tonnellata corta (come riportato in Fig. 2.14) e da quest'ultima, PaLATE ricava i risultati per poi convertirli in chilogrammo su megagrammo all'interno del foglio Excel EMF Transport.



Source[b]	Total Particulate Matter	EMISSION FACTOR RATING	Total PM-10[c]	EMISSION FACTOR RATING
Screening (SCC 3-05-020-02,-03)	—[d]		0.0076[e]	C
Screening (controlled) (SCC 3-05-020-02-03)	—[d]		0.00042[e]	C
Primary crushing (SCC 3-05-020-01)	0.00035[f]	E	ND[g]	
Secondary crushing (SCC 3-05-020-02)	ND		ND[g]	
Tertiary crushing (SCC 3-05-020-03)	—[d]		0.0012[h]	C
Primary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-01)	ND		ND[g]	
Secondary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-02)	ND		ND[g]	
Tertiary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-03)	—[d]		0.00029[h]	C
Fines crushing[i] (SCC 3-05-020-05)	—[d]		0.0075	E
Fines crushing (controlled)[i] (SCC 3-05-020-05)	—[d]		0.0010	E
Fines screening[i] (SCC 3-05-020-21)	—[d]		0.036	E
Fines screening (controlled)[i] (SCC 3-05-020-21)	—[d]		0.0011	E
Conveyor transfer point[k] (SCC 3-05-020-06)	—[d]		0.00072	D
Conveyor transfer point (controlled)[k] (SCC 3-05-020-06)	—[d]		2.4×10^{-5}	D
Wet drilling: unfragmented stone[m] (SCC 3-05-020-10)	ND		4.0×10^{-5}	E
Truck unloading: fragmented stone[m] (SCC 3-05-020-31)	ND		8.0×10^{-6}	E
Truck loading—conveyor: crushed stone[n] (SCC 3-05-020-32)	ND		5.0×10^{-5}	E

Figura 2.13 – Valori di PM10 in kg/Mg



Source[b]	Total Particulate Matter	EMISSION FACTOR RATING	Total PM-10[c]	EMISSION FACTOR RATING
Screening (SCC 3-05-020-02,-03)	—[d]		0.015[e]	C
Screening (controlled) (SCC 3-05-020-02-03)	—[d]		0.00084[e]	C
Primary crushing (SCC 3-05-020-01)	0.00070[f]	E	ND[g]	
Secondary crushing (SCC 3-05-020-02)	ND		ND[g]	
Tertiary crushing (SCC 3-05-020-03)	—[d]		0.0024[h]	C
Primary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-01)	ND		ND[g]	NA
Secondary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-02)	ND		ND[g]	NA
Tertiary crushing (controlled) (SCC 3-05-020-03)	—[d]		0.00059[h]	C
Fines crushing[i] (SCC 3-05-020-05)	—[d]		0.015	E
Fines crushing (controlled)[i] (SCC 3-05-020-05)	—[d]		0.0020	E
Fines screening[i] (SCC 3-05-020-21)	—[d]		0.071	E
Fines screening (controlled)[i] (SCC 3-05-020-21)	—[d]		0.0021	E
Conveyor transfer point[k] (SCC 3-05-020-06)	—[d]		0.0014	D
Conveyor transfer point (controlled)[k] (SCC 3-05-020-06)	—[d]		4.8×10^{-5}	D
Wet drilling: unfragmented stone[m] (SCC 3-05-020-10)	ND		8.0×10^{-5}	E
Truck unloading: fragmented stone[m] (SCC 3-05-020-31)	ND		1.6×10^{-5}	E
Truck loading—conveyor: crushed stone[n] (SCC 3-05-020-32)	ND		0.00010	E

Figura 2.14 – Valori di PM10 in lb/short ton

Congiuntamente al riscontro dei valori, sono stati trovati anche degli errori non solo nel riportare i valori in PaLATE, ma anche nelle procedure di conversione:

- I valori di 'truck loading' e 'truck unloading' (aventi rispettivamente un SCC pari a 30502032 e 30502031) sono gli unici valori ad essere stati ricavati dalla tabella in unità metrica ma non solo sono stati riportati invertiti, uno di essi presenta anche un errore relativo all'ordine di grandezza. Di seguito (Tabella 2.2) vengono riportati i valori esatti

Tabella 2.2 -Valori corretti di PM10

	EPA - SCC	PM10 (kg/Mg)
truck loading	3-05-020-32	5,00E-05
truck unloading	3-05-020-31	8,00E-06

- La conversione effettuata da PaLATE per portare i valori di PM10 da libbre su tonnellata corta a chilogrammo su megagrammo, prendendo come esempio numerico il valore associato al 'fines mill-stone quarrying processing' (SCC 30502005) pari a 0,015 lb/shot ton, risulta avere l'aspetto riportato nell'Eq. (2.3)

$$PM_{10} = \frac{Emissione_{PM_{10}}\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot Conversione\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = \frac{0{,}015\ \left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\ \left[{}^{g}/_{lb}\right]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot 1000\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = 6{,}18 \cdot 10^{-3}\ \frac{g}{ton} \cdot \frac{Mg}{short\ ton} \cdot \frac{Mg}{kg} \tag{2.3}$$

Il quale non può corrispondere al risultato finale riportato in PaLATE pari a kg/Mg. La formula corretta è riportata nell'Eq. (2.4).

$$PM_{10} = \frac{Emissione_{PM_{10}}\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] \cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot}{Conversione\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = \frac{0{,}015\ \left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\ \left[{}^{g}/_{lb}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 7{,}5 \cdot 10^{-3}\ \frac{kg}{Mg} \tag{2.4}$$

È possibile verificare l'esattezza del valore ottenuto confrontandolo con il valore relativo a SCC 30502005 riportato nella tabella delle unità metriche (come da Fig. 2.13). In Fig. 2.15 sono cerchiati in rosso i fattori di emissione corretti e aggiornati alla versione dell'AP 42 più recente [19]. Nello specifico, è stato possibile modificare soltanto i valori relativi alle operazioni in cava poiché sono state aggiornate dall'EPA nel 2004. I dati relativi alla sabbia e alla ghiaia da costruzione sono stati lasciati invariati in quanto l'ultimo aggiornamento è datato 1995.

	A	B	C	D	E	F	G
62	**FIRE-EPA:**						
63				**EPA - SCC**	PM10 (kg/Mg)		
64			truck loading	3-05-020-32	5,00E-05		
65			truck unloading	3-05-020-31	8,00E-06		
66							
67	condary crushing/screening - stone quarrying processing			3-05-020-02	6,18E-03	1,50E-02	uncontrolled
68	condary crushing/screening - stone quarrying processing			3-05-020-03	2,22E-04	5,40E-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	4,94E-04	1,20E-03	wet suppression
71	ons: screen/convey/handling - stone quarrying processing			3-05-020-06	4,53E-04	1,10E-03	uncontrolled
72	ons: screen/convey/handling - stone quarrying processing			3-05-020-06	1,90E-05	4,60E-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	2,97E-02	7,20E-02	uncontrolled
75	fines screening - stone quarrying processing			3-05-020-21	9,06E-04	2,20E-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	rial 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	

Figura 2.15 – Valori aggiornati di PM10

Motori industriali a diesel e benzina

I fattori di emissione prodotti dai motori industriali utilizzati in cantiere sono stati riportati all'interno del foglio EMF Transport nella tabella riportata in Fig. 2.16.

	A	B	C	D	E	F	G	H
56	CO_2	CO	NO_x	SO_2	PM-10	Aldehydes	TOC	
57	1,15	6,68E-03	0,031	2,05E-03	2,20E-03	4,63E-04	2,51E-03	lb/hp-hr
58	522,10	3,03	14,07	0,93	1,00	0,21	1,14	g/hp-hr
59	5,22E-04	3,03E-06	1,41E-05	9,31E-07	9,99E-07	2,10E-07	1,14E-06	Mg/hp-hr

Figura 2.16 - Fattori di emissione motori diesel

La categoria di motori affrontata da questa sezione copre un'ampia varietà di applicazioni industriali sia di motori a benzina che di motori diesel a combustione interna, come generatori, pompe, spazzatrici industriali, attrezzature per il trasporto di materiali e attrezzature portatili per la perforazione di pozzi. La potenza nominale di questi motori copre una gamma piuttosto consistente, fino a 186 kilowatt (kW) (250 CV) per i motori a benzina e fino a 447 kW (600 CV) per i motori diesel [18].

I fattori di emissione riportati in PaLATE (si guardi la riga 57 della Fig. 2.16) sono relativi unicamente ai motori a diesel che , come visto precedentemente anche per il particolato, vengono forniti dall' AP 42 'Compilation of Air Pollutant Emission Factor' del 1995 [18]e sono riportati in Fig. 2.17 (terza colonna).

Pollutant	Gasoline Fuel (SCC 2-02-003-01, 2-03-003-01)		Diesel Fuel (SCC 2-02-001-02, 2-03-001-01)		EMISSION FACTOR RATING
	lb/hp-hr (power output)	lb/MMBtu (fuel input)	lb/hp-hr (power output)	lb/MMBtu (fuel input)	
NO_x	0.011	1.63	0.031	4.41	D
CO	0.439	62.7	6.68 E-03	0.95	D
SO_x	5.91 E-04	0.084	2.05 E-03	0.29	D
PM-10[b]	7.21 E-04	0.10	2.20 E-03	0.31	D
CO_2[c]	1.09	155	1.16	165	B
Aldehydes	4.85 E-04	0.07	4.63 E-04	0.07	D
TOC					
Exhaust	0.015	2.10	2.47 E-03	0.35	D
Evaporative	6.61 E-04	0.09	0.00	0.00	E
Crankcase	4.85 E-03	0.69	4.41 E-05	0.01	E
Refueling	1.08 E-03	0.15	0.00	0.00	E

Figura 2.17 - Fattori di emissione dei motori a diesel e benzina (AP 42)

Si noti che i Total Organic Compounds (TOC) sono caratterizzati da una grande varietà di composti organici; essi vengono scaricati in atmosfera quando parte del combustibile rimane incombusto o viene bruciato solo parzialmente durante il processo di combustione [20]. Possono essere definiti quindi come la somma dei composti organici riportati in Fig. 2.17 sotto il nome di 'Exhaust', 'Evaporative', 'Crankcase' e 'Refueling' la cui formulazione è riportata in Eq. (2.5):

$$TOC = Emissione_{Exhaust} + Emissione_{Evaporative} + Emissione_{Crankcase} + Emissione_{Refueling} = 2{,}47 \cdot 10^{-3} + 0 + 4{,}4 \cdot 10^{-5} + 0 = 2{,}51 \cdot 10^{-3}\ {}^{lb}/_{hp \cdot hr} \quad (2.5)$$

Dato che i valori utilizzati per i risultati finali devono essere forniti in grammi e non in libre, tutti i fattori di emissione sono stati moltiplicati da PaLATE per un fattore di conversione. Infine, non è stato possibile eseguire un aggiornamento dei dati in quanto l'EPA non ha più aggiornato la sezione relativa alle emissioni dovute ai motori industriali dal 1996.

Impianti di miscelazione del conglomerato bituminoso

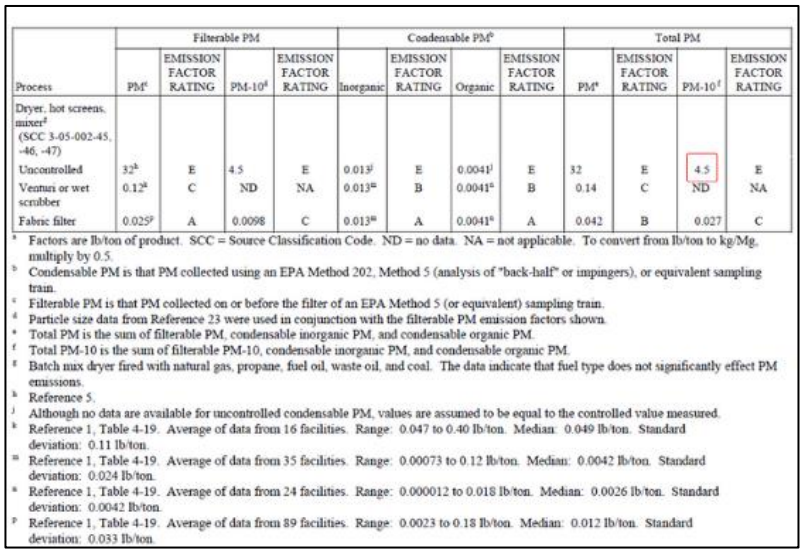
Le emissioni dovute ai macchinari forniti da PaLATE nel foglio di lavoro 'Eqpmt Details', si basano sulla capacità del motore, sulle informazioni relative al tipo e al consumo di carburante e sulla produttività/efficienza forniti dai vari siti web dei produttori. PaLATE include una grande quantità di dati di default per vari tipi di mezzi di cantiere e impianti di produzione delle miscele, modelli e motori tra cui l'utente ha la possibilità di scegliere sulla base dello studio che intende portare avanti [3].

Nel caso degli impianti di produzione del conglomerato bituminoso (come descritto in Fig. 2.18), dato che i dati sulle prestazioni dei macchinari non sono stati forniti da nessun produttore, PaLATE ha utilizzato i rapporti forniti dall'EPA.

				PM10	CO	CO_2	NOx	SO_2
171	HMA Production	Uncontrolled Batch-mix	natural gas	2,043 kg/ton	0,18 kg/ton	16,798 kg/ton	0,011 kg/ton	0,002 kg/ton
172		Fabric Filter-Controlled Batch-mix	oil	0,004 kg/ton	0,18 kg/ton	16,798 kg/ton	0,054 kg/ton	0,040 kg/ton
173		Uncontrolled Drum-mix	natural gas	2,951 kg/ton	0,06 kg/ton	14,982 kg/ton	0,012 kg/ton	0,015 kg/ton
174		Fabric Filter-controlled Drum-mix	oil	0,010 kg/ton	0,06 kg/ton	14,982 kg/ton	0,025 kg/ton	0,026 kg/ton
175		none		0	0	0		
176		other		0	0	0		

Figura 2.18- Fattori di emissione per gli impianti di produzione dell'HMA (PaLATE)

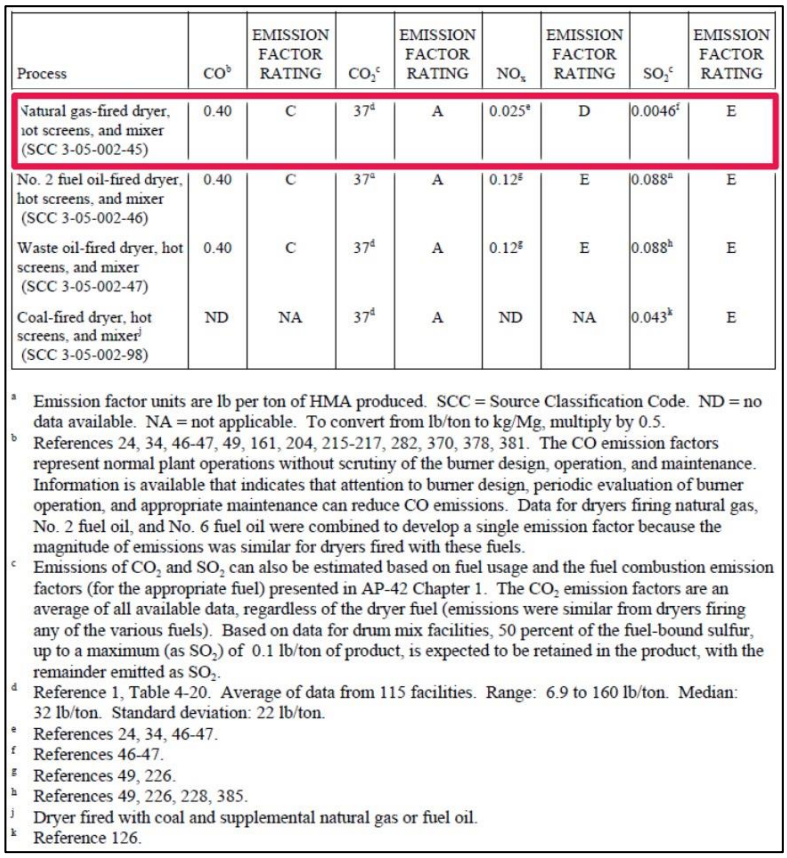
Nello specifico, i dati riportati in Fig. 2.18 sono stati anch'essi reperiti dall'AP 42 dove si riporta a titolo di esempio come sono stati ottenuti i fattori di emissione per l'Uncontrolled Batch-mix. Consultando la sezione relativa alla produzione dell'HMA presente nel Capitolo 11 dell'AP 42 [21] , sono stati ricavati i dati di emissione del PM10 (riportati in Fig. 2.19) e di CO, CO2, NOX e SO2 (riportati in Fig. 2.20), rispettivamente. Tutti i valori d'interesse per lo studio sono stati cerchiati in rosso.



Process	Filterable PM				Condensable PM[b]				Total PM			
	PM[c]	EMISSION FACTOR RATING	PM-10[d]	EMISSION FACTOR RATING	Inorganic	EMISSION FACTOR RATING	Organic	EMISSION FACTOR RATING	PM[e]	EMISSION FACTOR RATING	PM-10[f]	EMISSION FACTOR RATING
Dryer, hot screens, mixer[g] (SCC 3-05-002-45, -46, -47)												
Uncontrolled	32[h]	E	4.5	E	0.013[j]	E	0.0041[j]	E	32	E	4.5	E
Venturi or wet scrubber	0.12[k]	C	ND	NA	0.013[m]	B	0.0041[n]	B	0.14	C	ND	NA
Fabric filter	0.025[p]	A	0.0098	C	0.013[m]	A	0.0041[n]	A	0.042	B	0.027	C

[a] Factors are lb/ton of product. SCC = Source Classification Code. ND = no data. NA = not applicable. To convert from lb/ton to kg/Mg, multiply by 0.5.
[b] Condensable PM is that PM collected using an EPA Method 202, Method 5 (analysis of "back-half" or impingers), or equivalent sampling train.
[c] Filterable PM is that PM collected on or before the filter of an EPA Method 5 (or equivalent) sampling train.
[d] Particle size data from Reference 23 were used in conjunction with the filterable PM emission factors shown.
[e] Total PM is the sum of filterable PM, condensable inorganic PM, and condensable organic PM.
[f] Total PM-10 is the sum of filterable PM-10, condensable inorganic PM, and condensable organic PM.
[g] Batch mix dryer fired with natural gas, propane, fuel oil, waste oil, and coal. The data indicate that fuel type does not significantly effect PM emissions.
[h] Reference 5.
[j] Although no data are available for uncontrolled condensable PM, values are assumed to be equal to the controlled value measured.
[k] Reference 1, Table 4-19. Average of data from 16 facilities. Range: 0.047 to 0.40 lb/ton. Median: 0.049 lb/ton. Standard deviation: 0.11 lb/ton.
[m] Reference 1, Table 4-19. Average of data from 35 facilities. Range: 0.00073 to 0.12 lb/ton. Median: 0.0042 lb/ton. Standard deviation: 0.024 lb/ton.
[n] Reference 1, Table 4-19. Average of data from 24 facilities. Range: 0.000012 to 0.018 lb/ton. Median: 0.0026 lb/ton. Standard deviation: 0.0042 lb/ton.
[p] Reference 1, Table 4-19. Average of data from 89 facilities. Range: 0.0023 to 0.18 lb/ton. Median: 0.012 lb/ton. Standard deviation: 0.033 lb/ton.

Figura 2.19- Emissioni di PM10 per un Uncontrolled Batch-mix



Process	CO[b]	EMISSION FACTOR RATING	CO_2[c]	EMISSION FACTOR RATING	NO_x	EMISSION FACTOR RATING	SO_2[c]	EMISSION FACTOR RATING
Natural gas-fired dryer, hot screens, and mixer (SCC 3-05-002-45)	0.40	C	37[d]	A	0.025[e]	D	0.0046[f]	E
No. 2 fuel oil-fired dryer, hot screens, and mixer (SCC 3-05-002-46)	0.40	C	37[a]	A	0.12[g]	E	0.088[a]	E
Waste oil-fired dryer, hot screens, and mixer (SCC 3-05-002-47)	0.40	C	37[d]	A	0.12[g]	E	0.088[h]	E
Coal-fired dryer, hot screens, and mixer[j] (SCC 3-05-002-98)	ND	NA	37[d]	A	ND	NA	0.043[k]	E

[a] Emission factor units are lb per ton of HMA produced. SCC = Source Classification Code. ND = no data available. NA = not applicable. To convert from lb/ton to kg/Mg, multiply by 0.5.
[b] References 24, 34, 46-47, 49, 161, 204, 215-217, 282, 370, 378, 381. The CO emission factors represent normal plant operations without scrutiny of the burner design, operation, and maintenance. Information is available that indicates that attention to burner design, periodic evaluation of burner operation, and appropriate maintenance can reduce CO emissions. Data for dryers firing natural gas, No. 2 fuel oil, and No. 6 fuel oil were combined to develop a single emission factor because the magnitude of emissions was similar for dryers fired with these fuels.
[c] Emissions of CO_2 and SO_2 can also be estimated based on fuel usage and the fuel combustion emission factors (for the appropriate fuel) presented in AP-42 Chapter 1. The CO_2 emission factors are an average of all available data, regardless of the dryer fuel (emissions were similar from dryers firing any of the various fuels). Based on data for drum mix facilities, 50 percent of the fuel-bound sulfur, up to a maximum (as SO_2) of 0.1 lb/ton of product, is expected to be retained in the product, with the remainder emitted as SO_2.
[d] Reference 1, Table 4-20. Average of data from 115 facilities. Range: 6.9 to 160 lb/ton. Median: 32 lb/ton. Standard deviation: 22 lb/ton.
[e] References 24, 34, 46-47.
[f] References 46-47.
[g] References 49, 226.
[h] References 49, 226, 228, 385.
[j] Dryer fired with coal and supplemental natural gas or fuel oil.
[k] Reference 126.

Figura 2.20 – Emissioni di CO, CO_2, Nox e SO_2 per un Uncontrolled Batch-mix

I valori sono stati riportati in PaLATE con la loro unità di misura di partenza (lb/ short ton) e solo successivamente convertiti in kg/short ton come riportato nelle Eq. (2.6), (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10).

$$PM10 = \frac{Emissione[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot Conversione[{}^{g}/_{lb}]}{Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = \frac{4{,}5[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot 454[{}^{g}/_{lb}]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 2{,}043\ {}^{kg}/_{short\ ton} \quad (2.6)$$

$$CO = \frac{Emissione\ [{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot Conversione\ [{}^{g}/_{lb}]}{Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}4[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot 454[{}^{g}/_{lb}]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 0{,}18\ {}^{kg}/_{short\ ton} \quad (2.7)$$

$$CO_2 = \frac{Emissione\ [{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot Conversione\ [{}^{g}/_{lb}]}{Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = \frac{37[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot 454[{}^{g}/_{lb}]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 16{,}798\ {}^{kg}/_{short\ ton} \quad (2.8)$$

$$NO_x = \frac{Emissione\ [{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot Conversione\ [{}^{g}/_{lb}]}{Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}025[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot 454[{}^{g}/_{lb}]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 0{,}011\ {}^{kg}/_{short\ ton} \quad (2.9)$$

$$SO_2 = \frac{Emissione\ [{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot Conversione\ [{}^{g}/_{lb}]}{Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}0046[{}^{lb}/_{short\ ton}] \cdot 454[{}^{g}/_{lb}]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 0{,}002\ {}^{kg}/_{short\ ton} \quad (2.10)$$

Infine, per quanto concerne l'ammodernamento dei dati, per la tabella riportata in Fig. 2.18, gli sviluppatori di PaLATE hanno lasciato un commento in cui specificano il 2000 come anno di aggiornamento. I valori, infatti, non concordano con l'AP-42 del 1995, ma sono in linea con la versione più aggiornata del 2004.

2.2.3 HTP (Human Toxicity Potentials)

Il potenziale di tossicità umana (HTP) è un valore in grado di esprimere il danno potenziale generato da un'unità di prodotto chimico rilasciato nell'ambiente, tenendo in considerazione sia la tossicità propria di un composto che la sua dose potenziale [22].

In fase di costruzione, gli HTP emessi sono stati suddivisi in:

- **Cancerogeni,** il cui danno potenziale viene calcolato considerando la concentrazione di *arsenico* per chilogrammo di benzene equivalente emesso per unità di materiale prodotto;
- **Non cancerogeno**, espresso in termini di *piombo* per chilogrammo di toluene equivalente emesso per unità di materiale prodotto.

Le concentrazioni di arsenico e piombo utilizzate da PaLATE sono state ricavate dalla ricerca presentata da Morse et al. [23] e riportati in Fig. 2.21 e 2.22.

Arsenic

Table B-3. The mean and standard deviation for materials analyzed for arsenic

Material	No. Samples	Set 1 Mean	Set 1 SD	No. Samples	Set 2 Mean	Set 2 SD	No. Samples	Set 3 Mean	Set 3 SD	No. Samples	Set 4 Mean	Set 4 SD	Total Mean	Total SD	Range	
Limestone	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	25.00	0.00		
Siliceous Gravel	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00	4	25.00	0.00	25.00	0.00		
Sandstone	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00							25.00	0.00		
Siliceous Sand	3	25.00	0.00										25.00	0.00		
Caliche	4	25.00	0.00	3	25.00	0.00							25.00	0.00		
LRA	4	25.00	0.00										25.00	0.00		
Waste Foundry Sand	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00							25.00	0.00		
Fly Ash, Class F	4	26.45	2.90	3	25.00	0.00	3	41.23	10.28				30.89	8.98	25.00	39.88
Fly Ash, Class C	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00	25.00	0.00		
Cement Type I/II	3	25.00	0.00										25.00	0.00		
Cement Type I	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00							25.00	0.00		
Cement Type II	4	25.00	0.00										25.00	0.00		
Lime, Type A	4	25.00	0.00	3	25.00	0.00	3	25.00	0.00				25.00	0.00		
Lime, Type B	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00							25.00	0.00		
Lime, Type C	1	25.00	0.00	3	25.00	0.00	4	25.00	0.00				25.00	0.00		
Bottom Ash	3	25.00	0.00										25.00	0.00		
Silica Fume	4	31.20	3.33										31.20	3.33	27.87	34.53
RCP	4	25.00	0.00	3	25.00	0.00							25.00	0.00		
RAP	4	25.00	0.00	3	25.00	0.00							25.00	0.00		
Concrete	4	25.00	0.00										25.00	0.00		
Concrete-RCP	4	25.00	0.00										25.00	0.00		
Concrete-Fly Ash	4	25.00	0.00										25.00	0.00		

Note: Minimum Detection Limit = 25 µg/L

Note: For samples having values above and below the detection limit, the detection limit L was used for calculating the averages and standard deviations.

Note: The range is the mean +/- the standard deviation, unless the lower limit was less than the detection limit, which the detection limit was used.

Figura 2.21- Concentrazione media di arsenico espressa in parti per miliardo

Lead

Table B-10. The mean and standard deviation for materials analyzed for lead

Material	No. Samples	Set 1 Mean	Set 1 SD	No. Samples	Set 2 Mean	Set 2 SD	No. Samples	Set 3 Mean	Set 3 SD	No. Samples	Set 4 Mean	Set 4 SD	Total Mean	Total SD	Range	
Limestone	4	19.09	6.87	3	19.09	11.50	3	5.00	0.00	3	20.30	3.20	15.87	7.27	8.60	23.14
Siliceous Gravel	3	22.39	13.11	3	9.43	3.03	4	13.19	9.95	4	10.75	6.69	13.94	5.85	8.09	19.78
Sandstone	3	15.97	6.59	2	9.09	1.78							12.53	4.86	7.67	17.39
Siliceous Sand	3	8.72	2.97										8.72	2.97	5.75	11.69
Caliche	4	14.89	4.56	3	5.00	0.00							9.95	6.99	5.00	16.94
LRA	4	12.87	4.11										12.87	4.11	8.75	16.98
Waste Foundry Sand	2	21.40	2.36	4	9.06	5.19							15.23	8.72	23.95	23.95
Fly Ash, Class F	4	11.44	6.59	3	13.45	11.94	3	21.95	3.55				15.61	5.58	10.03	21.19
Fly Ash, Class C	3	19.18	1.76	3	36.19	15.85	3	5.72	1.25	4	8.38	3.90	17.37	13.83	5.00	31.20
Cement Type I/II	3	24.93	8.36										24.93	8.36	16.57	33.30
Cement Type I	3	19.01	13.19	4	12.64	3.94							15.82	4.50	11.32	20.33
Cement Type II	4	31.45	16.59										31.45	16.59	14.86	48.03
Lime, Type A	4	68.55	39.23	3	70.64	13.50	3	46.15	13.71				61.78	13.58	48.20	75.36
Lime, Type B	3	31.11	8.37	4	49.09	20.02							40.10	12.72	27.38	52.81
Lime, Type C	3	44.63	27.77	3	51.37	27.77	4	22.39	11.17				39.46	15.17	24.29	54.63
Bottom Ash	4	5.88	1.18										5.88	1.18	5.00	7.06
Silica fume	4	13.66	8.89										13.66	8.89	5.00	22.55
RCP	4	14.31	8.26	3	11.49	5.63							12.90	1.99	10.91	14.89
RAP	4	20.43	11.63	3	20.40	11.10							20.42	0.02	20.00	20.44
Concrete	4	72.07	92.58										72.07	92.58	5.00	164.65
Concrete-RCP	4	16.60	7.03										16.60	7.03	9.57	23.63
Concrete-Fly Ash	4	34.07	9.71										34.07	9.71	24.36	43.78

Note: Minimum Detection Limit = 5 µg/L

Note: For samples having values above and below the detection limit, the detection limit L was used for calculating the averages and standard deviations.

Note: The range is the mean +/- the standard deviation, unless the lower limit was less than the detection limit, which the detection limit was used.

Figura 2.22 - Concentrazione media di piombo espressa in parti per miliardo

In fase di trasporto, PaLATE classifica le emissioni in:

- **Aldeidi**, ossia idrocarburi gassosi provenienti dal diesel esausto e particolarmente rilevanti dal punto di vista tossicologico (ad esempio, formaldeide, acetaldeide e acroleina) [24];
- **Benzo[a]pirene**, il quale rappresenta uno dei numerosi tipi di idrocarburi prodotti dalla combustione incompleta di materia organica, in grado di disperdersi ampiamente quando rilasciato in atmosfera [25];

- **CDD/CDF**, definito come il rapporto tra due diossine, il policlorodibenzo-p-diossine (CDD) e il policlorodibenzofurani (CDF), generate dai processi di combustione dei motori a diesel. Questa quantità è espressa in grammi di tossicità equivalente (o TEQ) [24].

PaLATE converte successivamente tali emissioni in HTP cancerogeni e non cancerogeni medianti i valori presenti all'interno del foglio EMF Transport riportati in Fig. 2.23.

Chemical Name	CAS #	Cancer HTP		Non-cancer HTP	
		air	water	air	water
2,3,7,8 - TCDD	1746-01-6	1,80E+09	1,00E+09	2,30E+12	1,30E+12
Acetaldehyde	75-07-0	3,50E-03	6,30E-03	3,90E+00	1,10E+01
Aldehydes	N/A	3,13E-03	1,80E-03	4,58E+00	3,14E+00
Benzo[a]pyrene	50-32-8	1,60E+03	1,10E+01	0,00E+00	0,00E+00
Formaldehyde	50-00-0	3,00E-03	3,00E-04	4,80E+00	5,20E-01

Figura 2.23 – Potenziali di tossicità umana legati alle operazioni di trasporto

I valori riportati in Fig. 2.23 sono stati ricavati dall'appendice 2 presente all'interno dell'articolo di Hertwich et al. [22].

2.3 Fogli di Lavoro

Di pari importanza alla conoscenza dell'origine dei fattori di emissione è necessario comprendere quali sono i processi di funzionamento che caratterizzano l'applicativo. In Fig. 2.24, sono illustrati i passaggi necessari per la definizione degli impatti ambientali riportati nel foglio 'Environmental Results'. Ad ogni passaggio elencato, corrisponde un omonimo foglio di lavoro che verrà analizzato più nel dettaglio nelle pagine successive.

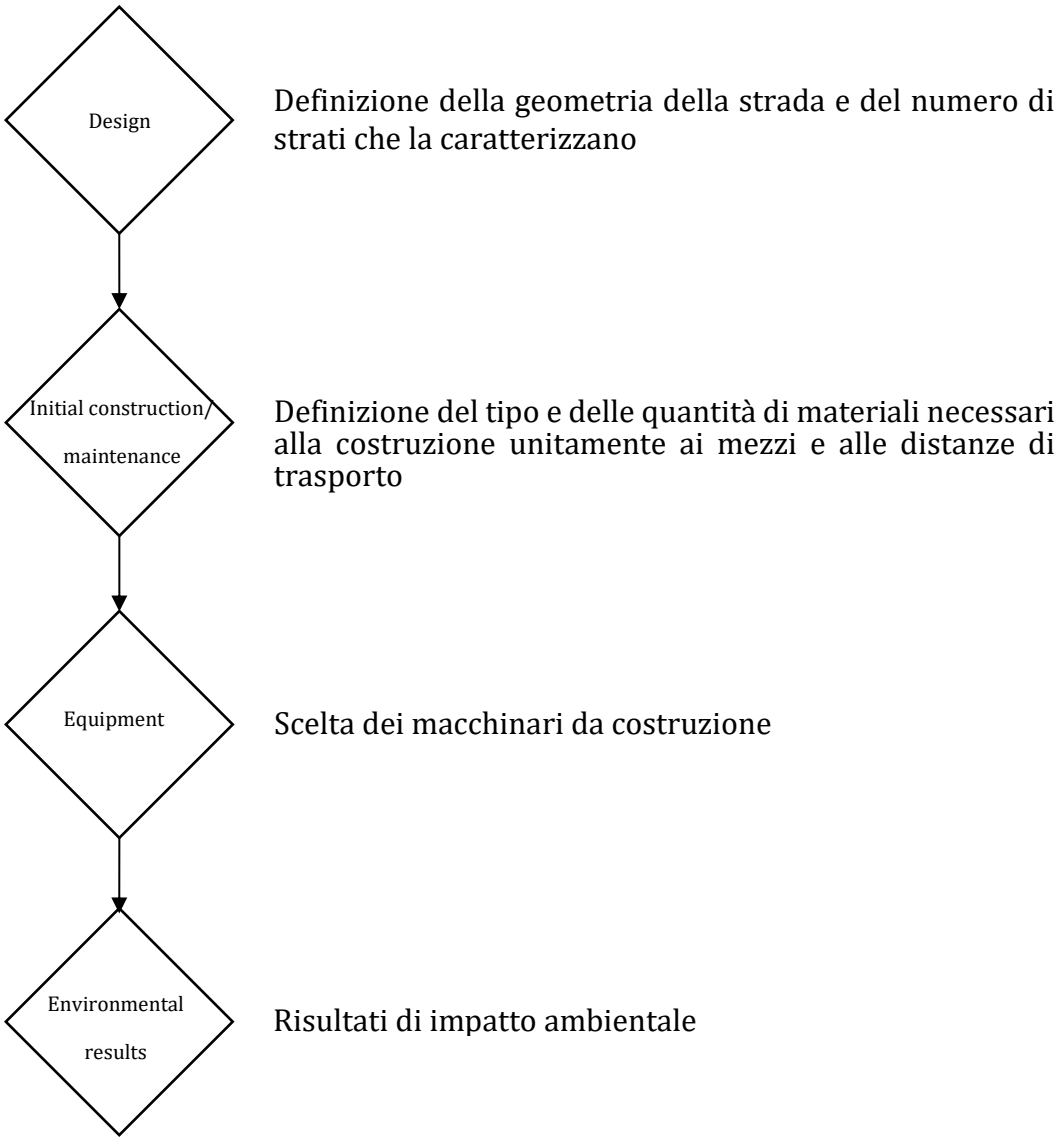


Figura 2.24 –Passaggi necessari alla definizione degli impatti in PaLATE

I processi che permettono la definizione degli impatti ambientali sono:

- Material Production;
- Material Transportation;
- Process (Equipment).

I risultati, quindi gli impatti ambientali, sono espressi in termini di: Gross Energy Requirement (GER), Consumo di Acqua, Global Warming Potential (GWP), NO_x, PM10, CO, Hg,

PB, RCRA Hazardous Waste Generated, Human Toxicity Potential (HTP) cancerogeno e non cancerogeno.

Come esposto nel paragrafo precedente, replicando il caso studio di Farina et al. [5], si riportano di seguito le elaborazioni effettuate da PaLATE per ciascun foglio di lavoro.

2.3.1 Design

In questo foglio si inseriscono le caratteristiche geometriche della strada in termini di larghezza e lunghezza, e spessori degli strati costituenti la sovrastruttura. La lunghezza pari a 1 km è stata posta come unità funzionale, a cui è ascritto l'ecoprofilo finale. Tali caratteristiche sono riportate in Tabella 2.3.

La strada analizzata è una extraurbana avente due corsie per direzione di marcia, larghezza della carreggiata pari 21,9 m e una lunghezza di riferimento di 1 metro.

A titolo di esempio sono stati esplicitati i calcoli relativi alla definizione del solo strato di usura che presenta uno spessore di 5 cm.

Perché i valori potessero essere inseriti nella tabella relativa alle caratteristiche della strada 'Layer Specification' (Tabella 2.3), è stato necessario effettuare le conversioni esplicitate all'interno delle Eq. (2.11), (2.12) e (2.13) mediante l'utilizzo dei fattori di conversione forniti dal foglio 'Conversions'

$$Larghezza = \frac{Larghezza\ [m]}{Conversione\ \left[{}^{m}/_{ft}\right]} = \frac{21.9\ [m]}{0.305\ \left[{}^{m}/_{ft}\right]} = 71.8\ ft \tag{2.11}$$

$$Lunghezza = \frac{Lunghezza\ [km]}{Conversione\ \left[{}^{km}/_{mi}\right]} = \frac{0{,}001\ [km]}{1{,}609\ \left[{}^{km}/_{mi}\right]} = 0{,}00062\ mi \tag{2.12}$$

$$Profondità = \frac{Profondità\ [m]}{Conversione\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = \frac{0{,}05\ [m]}{0{,}025\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = 1{,}97\ inches \tag{2.13}$$

Tabella 2.3 - Caratteristiche geometriche della strada

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Usura	71,80	0,00062	1,97	1,43
Binder	71,80	0,00062	2,36	1,72
Base	71,80	0,00062	3,94	2,86
Fondazione	71,80	0,00062	7,87	5,73
Subbase 2				
Subbase 3				
Subbase 4				
Total			**16,14**	12

Tutti questi valori sono stati convertiti prima in piedi (ft) e poi in iarde al cubo (yd3) come riportato nell' Eq 2.14

$$\boldsymbol{Volume} = \left\{\text{Larghezza } [ft] \cdot \left(\text{Lunghezza } [mi] \cdot \text{Conversione}\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(\text{Profondità } [in] \cdot Conversione\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot Conversione\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \left\{71{,}8[ft] \cdot \left(0{,}00062[mi] \cdot 5.280\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(1{,}97[in] \cdot \tfrac{1}{12}\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot \tfrac{1}{27}\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \mathbf{1{,}43}\boldsymbol{yd^3} \quad (2.14)$$

Come mostrato in Tabella 2.3, gli stessi calcoli sono stati effettuati anche per lo strato di binder, base e fondazione che si è scelto di trascurare in quanto si riportano a titolo di esempio soltanto i calcoli relativi allo strato di usura

2.3.2 Initial Construction

All'interno del foglio 'Initial Construction' sono stati inseriti sia i materiali da utilizzare in fase di costruzione che i dati relativi alle distanze e ai mezzi di trasporto, come riportato in Tabella 2.4 e in Tabella 2.5, rispettivamente [4].

Tabella 2.4 - Composizione delle miscele e quantità di materiali impiegati

	Composizione		**Quantità**	
	B	**v**	**Q_B**	**Q_A**
Strato	[%]	[%]	[kg/m3]	[kg/m3]
Usura	5,3	4,5	119,9	2.262
Binder	5	5	113,2	2.266
Base	4,5	5,5	102,7	2.282
Fondazione	/	5,2	/	2.201

Tabella 2.5 - Quantità e distanze di trasporto dei materiali utilizzati

Strato	**Materiale**	[kg]	[km]
Usura	Bitume	131	100
	Aggregati	2.477	30
Binder	Bitume	149	100
	Aggregati	2.977	30
Base	Bitume	225	100
	Aggregati	4.998	30
Fondazione	Aggregati	9.641	30

Per definire le densità e i volumi dei materiali che costituiscono la miscela, necessari all'interno del foglio di calcolo, sono stati effettuati i seguenti procedimenti.

Prendendo come riferimento la Normativa EN 15326, la densità di bitume a temperatura ambiente, può avere valori compresi tra 1000 e 1100 kg/m^3; ai fini di questa trattazione è stato supposto un bitume avente densità pari a 1050 kg/m^3 (0,88 short ton/yd^3).

La percentuale di bitume sul peso di conglomerato è stata ottenuta come riportato nell'Eq. (2.15)dal rapporto tra la quantità di bitume (Q_B) e la somma tra questa e la quantità di aggregati (Q_A) impiegati.

$$P_b = \frac{Q_B\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{Q_B\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]+Q_A\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]} \cdot 100 = \frac{119{,}9\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{119{,}9\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]+2.262\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]} \cdot 100 = 5{,}0\% \qquad (2.15)$$

La massa volumica totale della miscela è stata ottenuta come riportato nell'Eq 2.16.

$$MV = Q_B\left[{}^{kg}/_{m^3}\right] + Q_A\left[{}^{kg}/_{m^3}\right] = 119{,}9\left[{}^{kg}/_{m^3}\right] + 2.262\left[{}^{kg}/_{m^3}\right] = 2.381{,}9\,{}^{kg}/_{m^3} \qquad (2.16)$$

Il volume totale del conglomerato bituminoso (100%) può essere rappresentato, in termini volumetrici, da una percentuale di bitume (V_B), una percentuale di aggregati (V_G) e una percentuale di vuoti (v).

Nota la percentuale di bitume (Pb) sul peso di conglomerato bituminoso e la massa volumica della miscela, è possibile ricavare la percentuale di bitume (V_B) nel volume di conglomerato come da Eq. (2.17). Di conseguenza, si ricava la percentuale di aggregati nel volume di conglomerato bituminoso e la massa volumica attraverso le Eq. (2.18) e (2.19), rispettivamente.

$$V_B[\%] = \frac{P_b}{\gamma_B} \cdot \mathrm{MV} = \frac{5{,}0}{1.050} \cdot 2.381{,}9 = 11{,}4\% \qquad (2.17)$$

$$V_G[\%] = 100 - V_B - v = 100 - 11{,}4 - 4{,}5 = 84{,}1\,\% \qquad (2.18)$$

$$\gamma_G = \frac{100-P_b}{V_G} \cdot \mathrm{MV} = \frac{100-5{,}0}{84{,}1} \cdot 2.381{,}9 = 2.690{,}3\ {}^{kg}/_{m^3} = 2{,}27\ {}^{short\ ton}/_{yd^3} \qquad (2.19)$$

Infine, i volumi di bitume e aggregati necessari per la costruzione dello strato di usura sono stati ricavati come nell'Eq. (2.20) e (2.21)

$$V_B = \frac{Q_B[kg]}{\gamma_B\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]} = \frac{131}{1.050} = 0{,}12\ m^3 = 0{,}163\ yd^3 \qquad (2.20)$$

$$V_G = \frac{Q_G[kg]}{\gamma_G\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]} = \frac{2.477}{2.690,3} = 0,92\ m^3 = 1,204\ yd^3 \quad (2.21)$$

La densità e il volume della miscela sono stati calcolati rispettivamente come nell'Eq 2.22 e 2.23

$$\gamma_{CB} = \left(\frac{V_G[\%]}{V_G[\%]+V_B[\%]} \cdot \gamma_G\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]\right) + \left(\frac{V_B[\%]}{V_G[\%]+V_B[\%]} \cdot \gamma_B\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]\right) = \left(\frac{84,1[\%]}{84,1[\%]+11,4[\%]} \cdot 2.690,3\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]\right) + \left(\frac{11,4[\%]}{84,1[\%]+11,4[\%]} \cdot 1.050\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]\right) = 2.494,13\ {}^{kg}/_{m^3} = 2,10\ {}^{short\ ton}/_{yd^3} \quad (2.22)$$

$$V_{CB} = V_B + V_G = 0,12 + 0,92 = 1,04\ m^3 = 1,367\ yd^3 \quad (2.23)$$

In Tabella 2.6 è riportata la massa volumica e il volume degli aggregati, del bitume e del conglomerato bituminoso costituenti i differenti strati della pavimentazione.

Tabella 2.6 – Masse volumiche e volumi dei materiali costituenti gli strati della sovrastruttura stradale

Strato	**Material**	**γ**	**V**
		[short ton/yd3]	[yd3]
Usura	Bitume	**0,88**	**0,163**
	Aggregati	**2,27**	**1,204**
	CB	**2,10**	**1,367**
Binder	Bitume	0,88	0,186
	Aggregati	2,27	1,45
	CB	2,11	1,63
Base	Bitume	0,88	0,28
	Aggregati	2,27	2,43
	CB	2,13	2,71
Fondazione	Aggregati	2,27	4,67

Le distanze di trasporto, per poter essere inserite nel foglio di lavoro, sono state convertite da chilometri in miglia (Tabella 2.7).

Tabella 2.7 - Distanze di trasporto dei materiali

		D	
Strato	**Materiale**	[km]	[mi]
Usura	Bitume	100	62,15
	Aggregati	30	18,65
Binder	Bitume	100	62,15
	Aggregati	30	18,65
Base	Bitume	100	62,15
	Aggregati	30	18,65
Fondazione	Aggregati	80	49,72

Si noti che nel caso dello strato di fondazione è stato considerata una distanza pari ad 80 km in modo tale da tenere in considerazione sia la distanza tra la cava e l'impianto (pari a 30 km) sia quella dall'impianto al cantiere (pari a 50 km). Tutti i valori sono stati successivamente inseriti in PaLATE (Fig. 2.25) all'interno del foglio di lavoro 'Initial Construction'.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
13			Material	Density [tons/(yd^3)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
14					Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	transport distance [mi]	Transportation mode
15	Usura	Materials	Virgin Aggregate	2,27	1,20	0		18,65	dump truck
16			Bitumen	0,88	0,16			62,5	tanker truck
31			**Total: Asphalt mix to site**	2,1	**1,37**			31,08	dump truck
36	Binder	Materials	Virgin Aggregate	2,27	1,45	0		18,65	dump truck
37			Bitumen	0,88	0,19			62,15	tanker truck
52			**Total: Asphalt mix to site**	2,11	**1,64**			31,08	dump truck
57	Base	Materials	Virgin Aggregate	2,27	2,43	0		18,65	dump truck
58			Bitumen	0,88	0,28			62,15	tanker truck
73			**Total: Asphalt mix to site**	2,13	**2,71**			31,08	dump truck
91	Fonda:	Materi:	Rock	2,27			4,67	49,72	dump truck
95			**Total: Subbase 1 materials to site**	**2,27**			**5**		dump truck

Figura 2.25- Foglio di lavoro 'Initial Construction'

2.3.3 Equipment

Nel foglio 'Equipment' è possibile scegliere i macchinari tra quelli messi a disposizione da PaLATE, il quale fornisce per ognuno diversi dettagli (come consumo di carburante, potenza del motore, produttività e in alcuni casi, emissioni). Ai fini del caso studio analizzato [5], sono stati scelti i macchinari che presentano le stesse caratteristiche (o una buona approssimazione) rispetto a quelle forniti all'interno dell'articolo (Tabella 2.8).

Tabella 2.8 – Consumo di carburante e macchinari impiegati per la costruzione

Strato	Macchinario	Consumo di Carburante [l/h]
Usura	2 vibrofinitrici	30
	4 rulli gommati	17
Binder	2 vibrofinitrici	30
	4 rulli gommati	17
Base	2 vibrofinitrici	30
	4 rulli gommati	17
Fondazione	1 grader	20
	2 rulli gommati	17

Alla luce dei dati forniti sono stati scelti i macchinari riportati in Tabella 2.9

Tabella 2.9 - Macchinari selezionati in PaLATE

Macchinario		Consumo di Carburante
Tipo	**Modello di motore**	**[l/h]**
vibrofinitrice	Dynapac F25C	31,6
rullo gommato	Cummis B39C	17

Per quanto riguarda l'impianto di miscelazione è stato scelto un 'Uncontrolled Batch-mix' avente una produttività di 400 t/h mentre, dato che non è stato possibile trovare corrispondenza tra la motolivellatrice fornita dall'articolo e quelle proposte dal software, sono stati lasciati i valori di default forniti da PaLATE.

2.3.4 Environmental Results

Come riportato in Fig. 2.24, PaLATE suddivide i processi che concorrono alla definizione degli impatti ambientali in tre fasi principali:

1. Material Production, dove vengono raggruppati tutti i processi relativi alla produzione dei materiali da costruzione;
2. Material Transportation, dove vengono presi in considerazioni le operazioni di trasporto dei materiali;
3. Processes (Equipment), attraverso il quale vengono computati le emissioni dovute ai processi di realizzazione dello strato.

Di seguito verranno esplicitati le formulazioni dei tre processi principali che hanno portato alla definizione degli impatti presentati all'interno del foglio 'Environmental Results' per il solo strato di usura.

Accanto ad ogni formulazione è stato riportato tra parentesi quadre il valore relativo alla cella Excel corrispondente per permettere un più semplice orientamento all'interno del foglio di calcolo.

I risultati ottenuti fanno riferimento all'unità funzionale illustrata al paragrafo 2.1.

Gross Energy Requirement (GER) [MJ]

L'acronimo GER (Gross Energy Requirement) indica il quantitativo di energia estratto dalla crosta terrestre durante tutto il ciclo di vita di un prodotto [5] ed è meglio conosciuto come 'Consumo Energetico'.

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\ [\boldsymbol{yd^3}]\ \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\ \left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\ \left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \tag{2.24}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Aggregati} = 1{,}204\ [\mathrm{yd^3}] \cdot 2{,}27\ \left[\mathrm{ston}/_{\mathrm{yd^3}}\right] \cdot 154{,}22\ \left[\mathrm{MJ}/_{\mathrm{ston}}\right] = \mathbf{421{,}61}\ \boldsymbol{MJ}\ \ [S65] \tag{2.25}$$

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Bitume} = 0{,}163\ [\mathrm{yd^3}] \cdot 0{,}88 \left[\mathrm{ston}/_{\mathrm{yd^3}}\right] \cdot 19.757{,}38\ \left[\mathrm{MJ}/_{\mathrm{ston}}\right] = \mathbf{2.834}\ \boldsymbol{MJ}\ \ [S66] \tag{2.26}$$

$$\Rightarrow\ \mathbf{CB} = 1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[ston/_{yd^3}\right] \cdot 226{,}8\ \left[MJ/_{ston}\right] = \mathbf{651{,}21\ MJ}\ \ [S82] \tag{2.27}$$

$$Material\ Production_{Tot} = 421{,}61 + 2.384 + 651{,}21 = 3.906{,}82\ MJ\ \ [S84]\ e\ [S8] \tag{2.28}$$

$$\mathbf{Material\ Transportation} = \frac{\boldsymbol{Vol}\ [\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\ \left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Capacit}\grave{\boldsymbol{a}}\ [\boldsymbol{Mg}]} \cdot \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Conversione}\ \left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{Mg}}\right]} \cdot \boldsymbol{Distanza}\ [\boldsymbol{mi}]\ \cdot \boldsymbol{Conversione}\ \left[\boldsymbol{km}/_{\boldsymbol{mi}}\right] \cdot \boldsymbol{Efficienza\ Carburante}\ \left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{km}}\right] \cdot \boldsymbol{Potere\ calorifico}\ \left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{l}}\right] \tag{2.29}$$

È importante notare che il valore dovuto alla:

- Efficienza del carburante, è definito come riportato nell'Eq. (2.30)

$$Efficienza\ Carburante = \frac{23\left[{}^{Btu}/_{veh\cdot mile}\right]}{128.700\left[{}^{Btu}/_{gal}\right]} \cdot \frac{3{,}785\left[{}^{l}/_{gal}\right]}{1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right]} \cdot 1.000 = 0{,}42\left[{}^{l}/_{km}\right] \tag{2.30}$$

In cui:

- 23 Btu/veh·mile è l'energia consumata dall'autocarro scelto per il trasporto;
- 128.700 Btu/gal è il potere calorifico del diesel;
- I restanti valori sono semplici fattori di conversione.

- Il potere calorifico del diesel, espresso in MJ/l, è definito sulla base del potere calorifico espresso come 128700 Btu/gal [26] e successivamente convertita in MJ/l come riportato nell'Eq. (2.31).

$$Energia = \frac{128.700\left[{}^{Btu}/_{gal}\right]}{3{,}785\left[{}^{l}/_{gal}\right]\cdot 9{,}49\cdot 10^{-4}\left[{}^{Btu}/_{J}\right]} = 3{,}58\cdot 10^{-7}\left[{}^{J}/_{l}\right] = 35{,}83\left[{}^{MJ}/_{l}\right] \tag{2.31}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{20\ [\mathrm{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\ [\mathrm{mi}] \cdot 1{,}609\left[{}^{\mathrm{km}}/_{\mathrm{mi}}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{km}}\right] \cdot 35{,}833\left[{}^{\mathrm{MJ}}/_{\mathrm{l}}\right] = \mathbf{56,07}\ \boldsymbol{MJ}\ [S390] \tag{2.32}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{20\ [\mathrm{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]} \cdot 62{,}15\ [\mathrm{mi}] \cdot 1{,}609\left[{}^{\mathrm{km}}/_{\mathrm{mi}}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{km}}\right] \cdot 35{,}833\left[{}^{\mathrm{MJ}}/_{\mathrm{l}}\right] = \mathbf{9,68}\ \boldsymbol{MJ}\ \ [391] \tag{2.33}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\left[yd^3\right]\cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{20\ [Mg]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 31{,}08\ [mi] \cdot 1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{l}/_{km}\right] \cdot 35{,}833\left[{}^{MJ}/_{l}\right] = \mathbf{98,14}\ \boldsymbol{MJ}\ \ [S405] \tag{2.34}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 56{,}07 + 9{,}86 + 98{,}14 = 164{,}07\ MJ\ \ [S410]\ e\ [S17] \tag{2.35}$$

$$\textbf{Process} = \frac{\boldsymbol{Vol\,[yd^3]\cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}}{\boldsymbol{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]}}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{l}/_{h}\right]\cdot \boldsymbol{Potere\ calorifico}\left[{}^{MJ}/_{l}\right] \tag{2.36}$$

Ne consegue che l'energia consumata per la stesa della miscela è pari al valore riportato nell'Eq. (2.37)

$$\textbf{Stesa CB} = \frac{\left\{\frac{1{,}367[\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{3.400\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]}\cdot 63{,}1\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right]\cdot(3{,}58\cdot 10^7)\left[{}^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{l}}\right]\right\}_{Vibrofinitrice} + \left\{\frac{1{,}367[\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{1.580\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]}\cdot 68\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right]\cdot(3{,}58\cdot 10^7)\left[{}^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{l}}\right]\right\}_{\textbf{Rullo Gommato}}}{1.000.000} = \mathbf{6{,}34\ MJ}$$ [$S763$] e [$S26$]

(2.37)

Il consumo totale di energia spesa durante la fase di 'Initial Construction' per la costruzione del solo strato di usura è riportato nell'Eq. (2.38)

$$\textbf{Initial Construction}_{GER} = \mathbf{3.906{,}82 + 164{,}07 + 6{,}34 = 4.077{,}23\ MJ} \tag{2.38}$$

Global Warming Potential (GWP) [kg]

L'acronimo GWP (Global Warming Potential) permette di quantificare il cambiamento climatico in termini di chilogrammi di CO_2 equivalente rilasciata [5] e sarà riportata nelle formulazioni successive semplicemente come CO_{2eq}.

Material Production

$$= \frac{\textbf{Vol}\,[\mathbf{yd^3}]\ \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]\cdot \textbf{Fattore di Emissione}\left[{}^{\mathbf{g}}/_{\textbf{short ton}}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\mathbf{g}}/_{\mathbf{kg}}\right]}$$

(2.39)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\,[\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]\cdot 27.802{,}34\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right]}{1.000\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{kg}}\right]} = \mathbf{76\ kg}\ [U65] \tag{2.40}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\,[\mathrm{yd^3}]\cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]\cdot 31.415{,}39\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right]}{1.000\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{kg}}\right]} = \mathbf{4{,}51\ kg}\ \ [U66] \tag{2.41}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = 1{,}367\,[yd^3]\cdot 2{,}1\left[{}^{ston}/_{yd^3}\right]\cdot 16{,}789\left[{}^{kg}/_{ston}\right] = \mathbf{48{,}23\ kg}\ \ [U82] \tag{2.42}$$

Nell'Eq.(2.42) non è necessaria alcuna conversione dato che il fattore di emissione è stato già fornito in kg.

$$Material\ Production_{Tot} = 76 + 4{,}51 + 48{,}23 = 128{,}74\ kg \quad [U84]\ e\ [U8] \tag{2.43}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Capacità}\ [\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{short ton}/\textbf{Mg}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{km}/\textbf{mi}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\left[\textbf{l}/\textbf{km}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[\textbf{g}/\textbf{l}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{g}/\textbf{kg}\right]} \tag{2.44}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\left[short\ ton/yd^3\right]}{20\ [Mg]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 18{,}61\ [mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 0{,}42\left[l/km\right] \cdot 2.678{,}899\left[g/l\right] \cdot \frac{1}{1000\left[g/kg\right]} = \mathbf{4{,}19\ kg} \quad [U390] \tag{2.45}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\ [\text{yd}^3] \cdot 0{,}88\left[\text{short ton}/\text{yd}^3\right]}{20\ [\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[\text{short ton}/\text{Mg}\right]} \cdot 62{,}15\ [\text{mi}] \cdot 1{,}609\left[\text{km}/\text{mi}\right] \cdot 0{,}42\left[\text{l}/\text{km}\right] \cdot 2678{,}899\left[\text{g}/\text{l}\right] \cdot \frac{1}{1.000\left[\text{g}/\text{kg}\right]} = \mathbf{0.74\ kg} \quad [U391] \tag{2.46}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\left[short\ ton/yd^3\right]}{20\ [Mg]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 31{,}08\ [mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 0{,}42\left[l/km\right] \cdot 2.678{,}899\left[g/l\right] \cdot \frac{1}{1.000\left[g/kg\right]} = \mathbf{7{,}34\ kg} \quad [U405] \tag{2.47}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 4{,}19 + 0{,}74 + 7{,}34 = 12{,}27\ kg \quad [U410]\ e\ [U17] \tag{2.48}$$

$$\textbf{Process} = \frac{\boldsymbol{Vol}\ [\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{ston}/\boldsymbol{yd^3}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{ston}/\boldsymbol{h}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/\boldsymbol{h}\right] \cdot \boldsymbol{Densità\ Carburante}\left[\boldsymbol{g}/\boldsymbol{l}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\left[\boldsymbol{g}/\boldsymbol{g}\right] \cdot \frac{1}{\boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{g}/\boldsymbol{kg}\right]} \tag{2.49}$$

$$\textbf{Stesa CB} = \left\{ \frac{\frac{1{,}367\left[yd^3\right]\cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{3.400\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]}\cdot 63{,}1\left[{}^{l}/_{h}\right]\cdot 852\left[{}^{g}/_{l}\right]\cdot(3{,}16)\left[{}^{g}/_{g}\right]}{1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} \right\}_{Vibrofinitrice} +$$

$$\left\{ \frac{\frac{1{,}367\left[yd^3\right]\cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1.580\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]}\cdot 68\left[{}^{l}/_{h}\right]\cdot 852\left[{}^{g}/_{l}\right]\cdot(3{,}16)\left[{}^{g}/_{g}\right]}{1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} \right\}_{Rullo\ Gommato} = \mathbf{0{,}48\ kg}\ \ [U26]\ e\ [U763]$$

(2.50)

I chilogrammi di $CO_{2eq.}$ durante la fase di 'Initial Construction' è riportata nell'Eq. (2.51)

$$\textbf{Initial Construction}_{GWP} = \mathbf{128{,}74 + 12{,}27 + 0{,}48\ \approx 141{,}49\ Kg} \quad (2.51)$$

<u>Consumo di Acqua [kg]</u>

Sotto questa voce vengono raggruppati i chilogrammi d'acqua impiegati nei processi di costruzione stradale. Per quanto concerne le attività di trasporto, il consumo di acqua fa riferimento alle fasi di produzione del combustibile poiché il trasporto di materiali, di per sé, non richiede il consumo di acqua.

$$\textbf{Material Production} = \textbf{Vol}\ [\mathbf{yd^3}]\ \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\mathbf{ston}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]\cdot \textbf{Consumo Acqua}\left[{}^{g}/_{ston}\right]$$

(2.52)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$\Rightarrow$ **Aggregati** = 1,2043 [yd³] · 2,27 $\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]$ · 81.305,37 $\left[{}^{\text{g}}/_{\text{short ton}}\right]$ = **222.269,46 g** [T65]

(2.53)

$\Rightarrow$ **Bitume** = 0,163 [yd³] · 0,88 $\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]$ · 31.385.961,89 $\left[{}^{g}/_{short\ ton}\right]$ = **4.502.002,37 *g*** [$T66$]

(2.54)

$\Rightarrow$ **CB = 0 g** [$S82$] (2.55)

$$Material\ Production_{Tot} = 222.269{,}46 + 4.502.002{,}37 + 0 = 4.724.271{,}83\ g\ \ [T84]\ e\ [T8]$$

(2.56)

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\text{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Consumo Acqua}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{ston}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \tag{2.57}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\,[\text{yd}^3] \cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\,[\text{mi}] \cdot 1{,}609\left[{}^{\text{km}}/_{\text{mi}}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{\text{l}}/_{\text{km}}\right] \cdot 852\left[{}^{\text{g}}/_{\text{l}}\right] \cdot 27.115.480{,}94\left[{}^{\text{g}}/_{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right] \cdot (10^{-6})\left[{}^{\text{Mg}}/_{\text{g}}\right] = \textbf{39.818,99}\ \boldsymbol{g}\ \ [T390] \tag{2.58}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\,[\text{yd}^3] \cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[Mg]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 62{,}15\,[mi] \cdot 1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{l}/_{km}\right] \cdot 852\left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot 27.115.480{,}94\left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] \cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot (10^{-6})\left[{}^{Mg}/_{g}\right] = \textbf{7.001,66}\ \boldsymbol{g}\ \ [T391] \tag{2.59}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\,[\text{yd}^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 31{,}08\,[\text{mi}] \cdot 1{,}609\left[{}^{\text{km}}/_{\text{mi}}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{\text{l}}/_{\text{km}}\right] \cdot 852\left[{}^{\text{g}}/_{\text{l}}\right] \cdot 27.115.480{,}94\left[{}^{\text{g}}/_{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right] \cdot (10^{-6})\left[{}^{\text{Mg}}/_{\text{g}}\right] = \textbf{69.697,13}\ \boldsymbol{g}\ \ [T405] \tag{2.60}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 39.818{,}99 + 7.001{,}66 + 69.697{,}13 = 116.517{,}78\ g\ \ [T410]\ e\ [T17] \tag{2.61}$$

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ston}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Consumo\ Acqua}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \right\} \cdot \frac{\textbf{1}}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \tag{2.62}$$

$$\textbf{Stesa CB} = \left\{\left\{\frac{1{,}367\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}1\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{3.400\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]}\cdot 63{,}1\ \left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right]\cdot 852\ \left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{l}}\right]\cdot 27.115.480{,}94\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right]\cdot 1{,}102\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]\right\}_{\text{Vibrofinitrice}} + \left\{\frac{1{,}367\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}1\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{1.580\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]}\cdot 17\ \left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right]\cdot 852\ \left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{l}}\right]\cdot 27.115.480{,}94\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right]\cdot 1{,}102\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]\right\}_{\text{Rullo Gommato}}\right\}\cdot (10^{-6})\ \left[{}^{\mathrm{Mg}}/_{\mathrm{g}}\right] = \mathbf{4.257}\ \boldsymbol{g}\ [T763]\ e\ [T26]$$

(2.63)

I chilogrammi di acqua consumata durante la fase di 'Initial Construction' sono riportati nell'Eq. (2.64).

$$\textbf{Initial Construction}_{\boldsymbol{Water\ Consumption}} = \frac{\mathbf{4.7242.71{,}83\ [g]+116.517{,}78\ [g]+1.231{,}33\ [g]}}{\mathbf{1000}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{kg}}\right]} = \mathbf{4.842{,}02\ kg}$$

(2.64)

NOx [g]

Il termine No_x viene utilizzato per indicare la combinazione dell'ossido nitrico (NO) e del biossido di azoto (NO_2) i quali rappresentano una famiglia di gas velenosi e altamente reattivi prodotti dalla combustione del carburante ad elevate temperature.

L'inquinamento da NO_x è emesso da automobili, camion e altri mezzi (ad esempio, macchine da costruzione, barche, ecc.) così come da fonti industriali come centrali elettriche, caldaie industriali, forni per cemento e turbine [27].

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\ [\boldsymbol{yd^3}]\ \cdot \boldsymbol{Densit}\text{à}\ \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \textbf{Fattore di}\ \boldsymbol{Emissione}\ \left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]$$

(2.65)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Aggregati} = 1{,}204\ \left[\mathrm{yd^3}\right]\cdot 2{,}27\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]\cdot 22{,}01\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{60{,}17}\ \boldsymbol{g}\ [V65]$$

(2.66)

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Bitume} = 0{,}163\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 0{,}88\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]\cdot 6.239{,}04\left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{894{,}93}\boldsymbol{g}\ [V66]$$

(2.67)

$$\Rightarrow\ \textbf{CB} = 1{,}36\ [\mathrm{yd^3}]\cdot 2{,}1\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]\cdot 0{,}011\ \left[{}^{kg}/_{short\ ton}\right]\cdot 1.000\ \left[{}^{g}/_{kg}\right] = \mathbf{32{,}59}\ \boldsymbol{g}\ [V82]$$

(2.68)

$$Material\ Production_{Tot} = 60{,}17 + 894{,}93 + 32{,}59 = 987{,}68\ g\ \ [V84]\ e\ [V8]$$

(2.69)

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{short ton}/\textbf{Mg}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{km}/\textbf{mi}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[\textbf{g}/\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}\right] \tag{2.70}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\,[yd^3] \cdot 2{,}27\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 18{,}65\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 3\left[g/Mg \cdot km\right] = \textbf{223,32}\ \boldsymbol{g}\ \ [V390] \tag{2.71}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\,[yd^3] \cdot 0{,}88\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 62{,}15\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 3\left[g/Mg \cdot km\right] = \textbf{39,27}\ \boldsymbol{g}\ \ [V391] \tag{2.72}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 31{,}08\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 3\left[g/Mg \cdot km\right] = \textbf{390,89}\ \boldsymbol{g}\ \ [V405] \tag{2.73}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 223{,}32 + 39{,}27 + 390{,}89 = 653{,}49\ g\ \ [V410]\ e\ [V17] \tag{2.74}$$

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3]\ \cdot\ \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Produttività}\left[\textbf{short ton}/\textbf{h}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\left[\boldsymbol{g}/\boldsymbol{hp \cdot h}\right] \right\} \tag{2.75}$$

$$\textbf{Stesa CB} = \left\{ \left\{ \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[short\ ton/yd^3\right]}{3.400\left[short\ ton/h\right]} \cdot 252\,[hp] \cdot 14{,}07\left[g/hp \cdot h\right] \right\}_{\text{Vibrofinitrice}} + \left\{ \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[short\ ton/yd^3\right]}{1.580\left[short\ ton/h\right]} \cdot 440\,[hp] \cdot 14{,}07\left[g/hp \cdot h\right] \right\}_{\text{Rullo Gommato}} \right\} = \textbf{15}\ \boldsymbol{g}\ [V763]\ e\ [V26] \tag{2.76}$$

L'emissione totale di NOx generata nella fase di 'Initial Construction' è riportata nell'Eq. (2.77).

$$\textbf{Initial Construction}_{NO_X} = \mathbf{987,68 + 653,49 + 14,25 = 1.655,42\ g}$$

(2.77)

PM10 [g]

Il "particulate matter" (PM) semplicemente noto come "particolato" fa riferimento all'insieme delle particelle disperse in atmosfera (ad esclusione dell'acqua) in grado di rimanere disperse per un quantitativo di tempo sufficiente ad essere soggette a fenomeni di diffusione e trasporto. Le sorgenti possono essere di tipo naturale (erosione del suolo, vulcani, etc.) o antropogenico (industrie, riscaldamento, traffico veicolare e processi di combustione in generale) [28]. I maggiori componenti del particolato atmosferico sono il solfato, il nitrato, l'ammoniaca, il cloruro di sodio, il carbonio, le polveri minerali. Il PM10 è definito come la frazione di particelle con diametro uguale o inferiore a 10 μm [28].

$$\boldsymbol{Material\ Production = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Fattore\ di\ emissione\ \left[{g}/{short\ ton}\right]}$$

(2.78)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Aggregati} = 1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 156{,}51\ \left[{g}/{short\ ton}\right] = \mathbf{427,86}\ \boldsymbol{g}\ [W65]$$

(2.79)

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Bitume} = 0{,}163\ [yd^3] \cdot 0{,}88\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 1.057{,}47\ \left[{g}/{short\ ton}\right] = \mathbf{151,68}\ \boldsymbol{g}\ [W66]$$

(2.80)

$$\Rightarrow\ \mathbf{CB} = 1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 2{,}043\ \left[{kg}/{short\ ton}\right] \cdot 1000\ \left[{g}/{kg}\right] = \mathbf{5.866,13}\ \boldsymbol{g}\ [W82]$$

(2.81)

$$Material\ Production_{Tot} = 427{,}86 + 151{,}68 + 5.866{,}13 = 6.445{,}67\ g\ \ [W84]\ e\ [W8]$$

(2.82)

Nella fase di 'Material Transportation' sono state riportate due formulazioni differenti dato che, nel caso degli aggregati, PaLATE considera anche le emissioni di particolato provenienti dai processi di carico del materiale sul mezzo di trasporto come riportato in Eq. (2.83).

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{short ton}/\textbf{Mg}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot$$

$$\textbf{Conversione}\left[\textbf{km}/\textbf{mi}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[\textbf{g}/\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}\right] + \left\{\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{short ton}/\textbf{Mg}\right]} \cdot \right.$$

$$\left.\textbf{Fattore di emissione}\left[\textbf{kg}/\textbf{Mg}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{g}/\textbf{kg}\right]\right\}_{Carico}$$

(2.83)

Da cui ne consegue che per gli aggregati il valore sia pari a quanto riportato in Eq. (2.84).

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\,[yd^3] \cdot 2{,}27\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 18{,}65\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot$$

$$0{,}5847\left[g/Mg \cdot km\right] + \left\{\frac{1{,}204\,[yd^3] \cdot 2{,}27\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot (5 \cdot 10^{-5})\left[kg/Mg\right] \cdot \right.$$

$$\left.1.000\left[g/kg\right]\right\}_{Truck\ Loading} = \mathbf{43{,}66\ g}\quad [W390]$$

(2.84)

Per quanto riguarda il trasporto del bitume e della miscela bituminosa riportati nelle Eq. (2.86) e (2.87) è stata utilizzata la formulazione riporta nell'Eq. (2.85)

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{short ton}/\textbf{yd}^3\right]}{\textbf{Conversione}\left[\textbf{short ton}/\textbf{Mg}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot$$

$$\cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{km}/\textbf{mi}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[\textbf{g}/\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}\right]$$

(2.85)

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\,[yd^3] \cdot 0{,}88\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[short\ ton/Mg\right]} \cdot 62{,}15\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 0{,}17\left[g/Mg \cdot km\right] =$$

$$\mathbf{2{,}23\ g}\quad [W391]$$

(2.86)

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[short\ ton/yd^3\right]}{1{,}102\left[ston/Mg\right]} \cdot 31{,}08\,[mi] \cdot 1{,}609\left[km/mi\right] \cdot 0{,}5847\ \left[g/Mg \cdot km\right] =$$

$$\mathbf{76{,}20\ g}\quad [W405]$$

(2.87)

$$Material\ Transportation_{Tot} = 43{,}66 + 2{,}23 + 76{,}2 = 122{,}08\ g\quad [W410]\ e\ [W17]$$

(2.88)

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Potenza Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp}\cdot\boldsymbol{h}}\right] \right\} + \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[{}^{\textbf{kg}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{kg}}\right] \right\}_{\boldsymbol{Scarico}} \tag{2.89}$$

Nel processo di stesa, PaLATE prende in considerazione anche le emissioni proveniente dallo scarico degli aggregati come riportato in Eq. (2.90)

$$\begin{aligned}\textbf{Stesa CB} = & \left\{ \frac{1{,}363\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{3.400\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 252\,[\text{hp}] \cdot 1{,}0\left[{}^{g}/_{hp\,\cdot\,h}\right] \right\}_{\text{Vibrofinitrice}} \\ & + \left\{ \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1.580\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 440\,[\text{hp}] \cdot 1{,}0\,[g\ /\ (hp \cdot h)] \right\}_{\text{Rullo Gommato}} \\ & + \left\{ \frac{1{,}204\,[yd^3] \cdot 2{,}27\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\left[{}^{ston}/_{Mg}\right]} \cdot (8 \cdot 10^{-6})\left[{}^{kg}/_{Mg}\right] \cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right] \right\}_{\textbf{Scarico}} \\ & = \mathbf{3,9}\ \boldsymbol{g}\ [V763]\ e\ [V26]\end{aligned} \tag{2.90}$$

L'ammontare di particolato emesso nella fase di 'Initial Construction' è riportato nell'Eq. (2.91).

$$\textbf{Initial Construction}_{PM_{10}} = \mathbf{6.445,67 + 122,08 + 3,9 = 6.571,65\ g} \tag{2.91}$$

SO_2 [g]

L'SO_2 è un inquinante normalmente utilizzato come indicatore per un gruppo più ampio di ossidi di zolfo gassosi (SO). Altri SO_x gassosi (come l'SO_3) si trovano nell'atmosfera a concentrazioni molto inferiori rispetto all'SO2. Le maggiori fonti di emissioni provengono dalla combustione di combustibili fossili nelle centrali elettriche e in altri impianti industriali [27] .

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \tag{2.92}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = 1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 10{,}72\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{29{,}31\ g}\ [X65] \tag{2.93}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = 0{,}163\ [yd^3] \cdot 0{,}88\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 5.653{,}1\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{810{,}88\ g}\ [X66] \tag{2.94}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = 1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 0{,}002\ \left[{}^{kg}/_{ston}\right] \cdot 1.000\ \left[{}^{g}/_{kg}\right] = \mathbf{6\ g}\ [X82] \tag{2.95}$$

$$Material\ Production_{Tot} = 29{,}31 + 810{,}88 + 6 = 846{,}19\ \ g\ \ [X84]\ e\ [X8] \tag{2.96}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\ \left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversion}\ \left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\ \left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \tag{2.97}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 18{,}65\ [mi] \cdot 1{,}609\ \left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}18\ \left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \mathbf{13{,}4\ g}\ [X390] \tag{2.98}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitumen} = \frac{0{,}163\ [yd^3] \cdot 0{,}88\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 62{,}15\ [mi] \cdot 1{,}609\ \left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}18\ \left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \mathbf{2{,}36\ g}\ [X391] \tag{2.99}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 31{,}08\ [mi] \cdot 1{,}609\ \left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}18\ \left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \mathbf{23{,}45\ g}\ [X405] \tag{2.100}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 13{,}4 + 2{,}36 + 23{,}45 = 39{,}21\ \ g\ \ [X410]\ e\ [X17] \tag{2.101}$$

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\ \left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\ \left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Potenza Motore}\ [\textbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\ \left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp} \cdot \boldsymbol{h}}\right] \right\} \tag{2.102}$$

$$\textbf{Stesa CB} = \left\{ \frac{1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{3.400\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 252\ [\text{hp}] \cdot 0{,}93\ \left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right\}_{\text{Vibrofinitrice}} + \left\{ \frac{1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1.580\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 440\ [\text{hp}] \cdot 0{,}93\ \left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right\}_{\text{Rullo Gommato}} = \mathbf{0{,}94}\ \boldsymbol{g}\ [X763]\ e\ [X26] \tag{2.103}$$

L'ammontare di SO_2 emesso nella fase di 'Initial Construction' è riportato nell'Eq. (2.104)

$$\textbf{Initial Construction}_{SO_2} = \mathbf{846{,}19 + 39{,}21 + 0{,}94 = 886{,}34\ g} \tag{2.104}$$

<u>CO [g]</u>

Il CO è un gas incolore e inodore che risulta essere nocivo se inalato in grandi quantità. È uno dei risultati provenienti dai processi di combustione, infatti, le maggiori fonti che emettono CO in atmosfera sono le automobili, i camion e altri veicoli o macchinari che utilizzano combustibili fossili [27].

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\ [\boldsymbol{yd^3}]\ \cdot \boldsymbol{Densit}\text{à}\ \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\ \left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \tag{2.105}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Aggregati} = 1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 14{,}38\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{39{,}31}\ \boldsymbol{g}\ [Y65] \tag{2.106}$$

$$\Rightarrow\ \boldsymbol{Bitume} = 0{,}163\ [yd^3] \cdot 0{,}88\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 4.736\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] = \mathbf{679{,}38}\ \boldsymbol{g}\ [Y66] \tag{2.107}$$

$$\Rightarrow\ \textbf{CB} = 1{,}367\ [yd^3] \cdot 2{,}1\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 0{,}182\ \left[{}^{kg}/_{ston}\right] \cdot 1.000\ \left[{}^{g}/_{kg}\right] = \mathbf{521{,}43}\ \boldsymbol{g}\ [Y82] \tag{2.108}$$

$$Material\ Production_{Tot} = 39{,}31 + 679{,}38 + 521{,}43 = 1.240{,}13\ \ g\ \ [Y84]\ e\ [Y8] \tag{2.109}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \tag{2.110}$$

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\,[yd^3] \cdot 2{,}27\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 18{,}65\,[mi] \cdot 1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}25\left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \textbf{18,61}\ \boldsymbol{g}\quad [Y390] \tag{2.111}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\,[yd^3] \cdot 0{,}88\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 62{,}15\,[mi] \cdot 1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}25\left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \textbf{3,27}\ \boldsymbol{g}\quad [Y391] \tag{2.112}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB} = \frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot 31{,}08\,[mi] \cdot 1{,}609\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot 0{,}25\left[{}^{g}/_{Mg \cdot km}\right] = \textbf{32,57}\ \boldsymbol{g}\quad [Y405] \tag{2.113}$$

$$Material\ Transportation_{Tot} = 18{,}61 + 3{,}27 + 32{,}57 = 54{,}46\ g\quad [Y410]\ e\ [Y17] \tag{2.114}$$

$$\textbf{Process} = \left\{\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp} \cdot \boldsymbol{h}}\right]\right\} \tag{2.115}$$

$$\textbf{Stesa CB} = \left\{\frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{3.400\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 252\,[\text{hp}] \cdot 3{,}03\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right]\right\}_{\text{Vibrofinitrice}} + \left\{\frac{1{,}367\,[yd^3] \cdot 2{,}1\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{1.580\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{h}}\right]} \cdot 440\,[\text{hp}] \cdot 3{,}03\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right]\right\}_{\text{Rullo Gommato}} = \textbf{3,07}\ \boldsymbol{g}\ [Y763]\ e\ [Y26] \tag{2.116}$$

L'ammontare di CO rilasciato in atmosfera è stato calcolato nell'Eq. (2.117)

$$\textbf{Initial Construction}_{CO} = \mathbf{1.240,13 + 54,46 + 3,07 = 1.308\ g} \quad (2.117)$$

Hg [g]

Il mercurio diventa un problema per l'ambiente e quindi lo si può definire inquinante quando viene rilasciato in acqua e atmosfera. L'utilizzo del carbone, del petrolio e della legna come combustibile può far sì che il mercurio si disperda nell'aria, così come accade durante la combustione di rifiuti che contengono mercurio. Il mercurio trasportato dall'aria può cadere al suolo in gocce di pioggia, nella polvere, o semplicemente a causa della gravità (nota come "deposizione d'aria [27].

Le emissioni di mercurio (Hg) calcolate da PaLATE sono associate alla produzione di diesel e di seguito sono state riportate soltanto le formulazioni generiche mediante le Eq. (2.118), (2.119) e (2.120) in quanto, i valori di Hg forniti dall'esempio numerico scelto, sono risultati così bassi da poter essere considerati trascurabili

$$\textbf{\textit{Material Production}} = \textbf{\textit{Vol}}\ [\textbf{\textit{yd}}^3] \cdot \textbf{\textit{Densit}}\text{à}\ \left[\textbf{\textit{short ton}}/_{\textbf{\textit{yd}}^3}\right] \cdot \textbf{\textit{Fattore di emissione}}\ \left[\textbf{\textit{g}}/_{\textbf{\textit{short ton}}}\right]$$

[Z84] (2.118)

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densit}\text{à}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacit}\text{à}\ [\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[\textbf{km}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\ \left[\textbf{l}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Densit}\text{à}\ \textbf{Carburante}\ \left[\textbf{g}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{\textit{Fattore di emissione}}\left[\textbf{\textit{g}}/_{\textbf{\textit{short ton}}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\ \left[\textbf{g}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z410] (2.119)

$$\textbf{Process} = \left\{\frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densit}\text{à}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttivit}\text{à}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\ \left[\textbf{l}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Densit}\text{à}\ \textbf{Carburante}\ \left[\textbf{g}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\ \left[\textbf{\textit{g}}/_{\textbf{\textit{short ton}}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[\textbf{short ton}/_{\textbf{Mg}}\right]\right\} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversion}\ \left[\textbf{g}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z763] (2.120)

Pb [g]

Le emissioni di piombo tendono ad avere fonti variabili in base all'area geografica considerata. Le principali fonti sono il trattamento di minerali, metalli e dai processi di combustione, di cui il traffico veicolare ne è uno dei principali produttori [27].

PaLATE analizza la concentrazione di piombo in atmosfera proveniente dalla produzione del diesel e come si è visto per il mercurio, dato che il contributo numerico fornito è molto basso, è stato considerato trascurabile. Di seguito, nelle Eq. (2.121), (2.122) e (2.123), si osservano i calcoli necessari per la definizione delle emissioni di piombo in atmosfera.

$$\boldsymbol{Material\ Production = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot \text{Fattore di emissione}\ \left[{g}/{short\ ton}\right]}$$

[AA84] (2.121)

$$\text{Material Transportation} = \frac{\text{Vol}\ [\text{yd}^3] \cdot \text{Densità}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{yd}^3}\right]}{\text{Capacità}\ [\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{\text{Conversione}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{Mg}}\right]} \cdot \text{Distanza}\ [\text{mi}]\ \cdot \text{Conversione}\ \left[{\text{km}}/{\text{mi}}\right] \cdot \text{Efficienza Carburante}\ \left[{\text{l}}/{\text{km}}\right] \cdot \text{Densità Carburante}\ \left[{\text{g}}/{\text{l}}\right] \cdot \text{Fattore di emissione}\left[{g}/{short\ ton}\right] \cdot \text{Conversione}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\text{Conversione}\ \left[{\text{g}}/{\text{Mg}}\right]}$$

[AA410] (2.122)

$$\text{Process} = \left\{\frac{\text{Vol}\ [\text{yd}^3] \cdot \text{Densità}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{yd}^3}\right]}{\text{Produttività}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{h}}\right]} \cdot \text{Consumo Carburante}\ \left[{\text{l}}/{\text{h}}\right] \cdot \text{Densità Carburante}\ \left[{\text{g}}/{\text{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\ \left[{g}/{short\ ton}\right] \cdot \text{Conversione}\ \left[{\text{short ton}}/{\text{Mg}}\right]\right\} \cdot \frac{1}{\text{Conversion}\ \left[{\text{g}}/{\text{Mg}}\right]}$$

[AA763] (2.123)

RCRA Hazardous Waste Generated [g]

I rifiuti pericolosi o "hazardous waste" sono rifiuti che presentano una o più delle seguenti caratteristiche: infiammabilità, corrosività, reattività o tossicità.

Un rifiuto che possiede una componente pericolosa e una componente radioattiva è chiamato rifiuto misto ed è regolato sia dalla legge sulla conservazione e il recupero delle risorse (Resource Conservation and Recovery Act - RCRA) che dall'Atomic Energy Act [27].

$$\boldsymbol{Material\ Production = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Fattore\ di\ emissione\ \left[{g}/{short\ ton}\right]}$$

(2.124)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = 1{,}204\ [yd^3] \cdot 2{,}27\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 179{,}23\ \left[{g}/{short\ ton}\right] = \mathbf{489{,}97\ g}\ [AB65]$$

(2.125)

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = 0{,}163\ [yd^3] \cdot 0{,}88\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 350.942{,}65\ \left[{g}/{short\ ton}\right] = \mathbf{50.399{,}07\ g}\ [AB66]$$

(2.126)

$$\Rightarrow \mathbf{CB = 0\ g}\quad [AB82] \tag{2.127}$$

$$Material\ Production_{Tot} = 489{,}97 + 50.399{,}07 + 0 = 50.829{,}04\ \ g\ \ [AB84]\ e\ [AB8] \tag{2.128}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\ [\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\ \left[{\textbf{short ton}}/{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\ [\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\ \left[{\textbf{short ton}}/{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[{\textbf{km}}/{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\ \left[{\textbf{l}}/{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Densità Carburante}\ \left[{\textbf{g}}/{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\ \left[{\textbf{g}}/{\textbf{ston}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\ \left[{\textbf{ston}}/{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\ \left[{\textbf{g}}/{\textbf{Mg}}\right]}$$

(2.129)

Quindi, per ogni materiale riportiamo le formulazioni numeriche:

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati} = \frac{1{,}204\ [\text{yd}^3] \cdot 2{,}27\ \left[{\text{short ton}}/{\text{yd}^3}\right]}{20\ [\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\ \left[{\text{short ton}}/{\text{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\ [\text{mi}] \cdot 1{,}609\ \left[{\text{km}}/{\text{mi}}\right] \cdot 0{,}42\ \left[{\text{l}}/{\text{km}}\right] \cdot 852\ \left[{\text{g}}/{\text{l}}\right] \cdot 179\ \left[{\text{g}}/{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{\text{short ton}}/{\text{Mg}}\right] \cdot (10^{-6})\ \left[{\text{Mg}}/{\text{g}}\right] = \mathbf{445{,}24\ g}\ [AB390]$$

(2.130)

$$\Rightarrow \textbf{Bitume} = \frac{0{,}163\ [\text{yd}^3] \cdot 0{,}88\ \left[{\text{short ton}}/{\text{yd}^3}\right]}{20\ [Mg]} \cdot \frac{1}{1{,}102\ \left[{short\ ton}/{Mg}\right]} \cdot 62{,}15\ [mi] \cdot 1{,}609\ \left[{km}/{mi}\right] \cdot 0{,}42\ \left[{l}/{km}\right] \cdot 852\ \left[{g}/{l}\right] \cdot 350.942 \left[{g}/{short\ ton}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{short\ ton}/{Mg}\right] \cdot (10^{-6})\ \left[{Mg}/{g}\right] = \mathbf{78{,}29\ g}\ [AB391]$$

(2.131)

$$\Rightarrow \mathbf{CB} = \frac{1{,}367\ [\mathrm{yd^3}] \cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{20\ [\mathrm{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]} \cdot 31{,}08\ [\mathrm{mi}] \cdot 1{,}609\left[{}^{\mathrm{km}}/_{\mathrm{mi}}\right] \cdot 0{,}42\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{km}}\right] \cdot 852\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{l}}\right] \cdot 303.191\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right] \cdot (10^{-6})\ \left[{}^{\mathrm{Mg}}/_{\mathrm{g}}\right] = \mathbf{779{,}32\ g}\quad [AB405]$$

(2.132)

$$Material\ Transportation_{Tot} = 445{,}24 + 78{,}29 + 779{,}32 = 1.302{,}84\ g\quad [AB410]\ e\ [AB17]$$

(2.133)

$$\mathbf{Process} = \left\{ \frac{\mathbf{Vol}\ [\mathbf{yd^3}]\ \cdot\ \mathbf{Densità}\left[{}^{\mathbf{short\ ston}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]}{\mathbf{Produttività}\left[{}^{\mathbf{ston}}/_{\mathbf{h}}\right]} \cdot \mathbf{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\mathbf{l}}/_{\mathbf{h}}\right] \cdot \mathbf{Densità\ Carburante}\left[{}^{\mathbf{g}}/_{\mathbf{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Fattore\ di\ emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \mathbf{Conversion}\left[{}^{\mathbf{ston}}/_{\mathbf{Mg}}\right] \right\} \cdot \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Conversion}\left[{}^{\mathbf{g}}/_{\mathbf{Mg}}\right]}$$

(2.134)

$$\mathbf{Stesa\ CB} = \left\{ \left\{ \frac{1{,}367\ [\mathrm{yd^3}] \cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{3.400\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]} \cdot 63{,}1\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right] \cdot 852\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{l}}\right] \cdot 303.191\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right] \right\}_{\mathbf{Vibrofinitrice}} + \left\{ \frac{1{,}367\ [\mathrm{yd^3}] \cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd^3}}\right]}{1.580\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{h}}\right]} \cdot 17\left[{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{h}}\right] \cdot 852\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{l}}\right] \cdot 303.191\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\text{short ton}}\right] \cdot 1{,}102\ \left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right] \right\}_{\mathbf{Rullo\ Gommato}} \right\} \cdot (10^{-6})\ \left[{}^{\mathrm{Mg}}/_{\mathrm{g}}\right] = \mathbf{45{,}68\ g}\quad [AB763]\ e\ [AB26]$$

(2.135)

L'ammontare di rifiuti pericolosi prodotti durante la fase di 'Initial Construction' è riportata nell'Eq (2.136)

$$\mathbf{Initial\ Construction}_{\boldsymbol{RCRA}} = \mathbf{50.829{,}04 + 1.302{,}84 + 45{,}68 = 52.177{,}56\ g}$$

(2.136)

Human Toxicity Potential (HTP) [g]

Il potenziale di tossicità umana (HTP) esprime l'ammontare di emissioni nocive generate durante le fasi di realizzazione di una strada.

Le equazioni riportate di seguito, relative alla fase di Material Production, sono rappresentative sia delle emissioni di HTP cancerogeno (HTP_C) che di HTP non cancerogeno (HTP_{NC}).

Per gli **aggregati**, la formulazione è stata descritta dall'Eq(2.137) in cui la dicitura "Composto Standard$_{eq.}$" indica nel primo caso i chilogrammi di benzene volatile equivalente, nel secondo caso i chilogrammi di toluene volatile equivalente. Il pedice "x" indica il materiale preso in considerazione (in questo caso gli aggregati) mentre il pedice "y" indica l'agente chimico inquinante (*arsenico* per le emissioni cancerogene e *piombo* per quelle non cancerogene).

$$\boldsymbol{Material\ Production_{x,y}} = \left\{ \frac{\boldsymbol{Vol_x}\,[yd^3] \cdot \boldsymbol{Densità_x}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{HTP}\left[\frac{g_y}{Gg_x} \cdot \frac{\textbf{kg di Composto Standard}_{\boldsymbol{eq.}}}{\boldsymbol{kg_y}}\right]}{\boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{Gg}}\right]} \right\} \tag{2.137}$$

Le operazioni numeriche sono state riportate di seguito mediante le Eq.(2.138) e (2.139).

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati}_{\boldsymbol{HTP_C}} = \left\{ \frac{1{,}204\left[yd^3\right] \cdot 2{,}27\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 16122\left[\frac{g_{As}}{Gg_{Agg.}} \frac{\text{kg di Benzene}_{eq.}}{kg_{As}}\right]}{1.102\left[{}^{short\ ton}/_{Gg}\right]} \right\} = \boldsymbol{40\ g}\ [AC65] \tag{2.138}$$

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati}_{\boldsymbol{HTP_{NC}}} = \left\{ \frac{1{,}204\left[yd^3\right] \cdot 2{,}27\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] \cdot 203.530.784\left[\frac{g_{Pb}}{Gg_{Agg.}} \frac{\text{kg di Toluene}_{eq.}}{kg_{Pb}}\right]}{1102\left[{}^{short\ ton}/_{Gg}\right]} \right\} = \boldsymbol{504.904\ g}\ [AD65] \tag{2.139}$$

Le emissioni dovute alla produzione del **bitume** sono state riportate in forma letterale dall'Eq.(2.140) e in forma numerica dalle Eq.(2.141) e (2.142).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{ml}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{HTP_{aria}}\left[{}^{\boldsymbol{mg}}/_{\boldsymbol{ml}}\right]}{\boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{mg}}/_{\boldsymbol{g}}\right]} \tag{2.140}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{Bitume_{HTP_C}} = \frac{0{,}163\left[yd^3\right] \cdot\ 764.000\left[{}^{ml}/_{yd^3}\right] \cdot 5{,}98\left[{}^{mg}/_{ml}\right]}{1.000\left[{}^{mg}/_{g}\right]} = \boldsymbol{744\ g}\ [AC66] \tag{2.141}$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{Bitume_{HTP_{NC}}} = \frac{0{,}163\left[yd^3\right] \cdot 764.000\left[{}^{ml}/_{yd^3}\right] \cdot 2{,}47\left[{}^{mg}/_{ml}\right]}{1.000\left[{}^{mg}/_{g}\right]} = \boldsymbol{308\ g}\ [AD66] \tag{2.142}$$

I valori di emissione dovuti alla produzione del **conglomerato bituminoso**, PaLATE li pone uguali a zero.

La formulazione relativa alla fase di Material Transportation è rappresentata dall'Eq(2.143) che è valida per tutti e tre gli inquinati: **aldeidi**, **benzo[a]pirene** e **CDD/CDF**.

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\text{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\text{mi}] \cdot \textbf{Fattore di emissione}\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] \tag{2.143}$$

I valori numerici sono stati esplicitati nelle Eq(2.144), (2.145), (2.146), (2.147), (2.148), (2.149), (2.150), (2.1517) e (2.152).

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati}_{\boldsymbol{Aldeidi}} = \frac{1{,}204[\text{yd}^3]\cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\,[\text{mi}] \cdot 0{,}2\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{0{,}46}\,\boldsymbol{g}\quad [AC390] \tag{2.144}$$

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati}_{\boldsymbol{Benzo[a]pirene}} = \frac{1{,}204\,[\text{yd}^3]\cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\,[\text{mi}] \cdot 0{,}000013\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{3 \cdot 10^{-5}}\,\boldsymbol{g}\quad [AD390] \tag{2.145}$$

$$\Rightarrow \textbf{Aggregati}_{\boldsymbol{CDD/CDF}} = \frac{1{,}204[\text{yd}^3]\cdot 2{,}27\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 18{,}65\,[\text{mi}] \cdot (2{,}77\cdot 10^{-10})\left[{}^{\text{g TEQ}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{6 \cdot 10^{-10}}\,\boldsymbol{g}\quad [AE390] \tag{2.146}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume}_{\boldsymbol{Aldeidi}} = \frac{0{,}163[\text{yd}^3]\cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 62{,}5[\text{mi}] \cdot 0{,}2\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{0{,}08}\,\boldsymbol{g}\quad [AC391] \tag{2.147}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume}_{\boldsymbol{Benzo[a]pirene}} = \frac{0{,}163[\text{yd}^3]\cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 62{,}5[\text{mi}] \cdot 0{,}000013\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{5{,}28 \cdot 10^{-6}}\,\boldsymbol{g}\quad [AD391] \tag{2.148}$$

$$\Rightarrow \textbf{Bitume}_{\boldsymbol{CDD/CDF}} = \frac{0{,}163\,[\text{yd}^3]\cdot 0{,}88\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 62{,}5[\text{mi}] \cdot (2{,}77\cdot 10^{-10})\left[{}^{\text{g TEQ}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{1{,}1 \cdot 10^{-10}}\,\boldsymbol{g}\quad [AE390] \tag{2.149}$$

$$\Rightarrow \textbf{CB}_{\boldsymbol{Aldeidi}} = \frac{1{,}367[\text{yd}^3]\cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{20\,[\text{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\text{Mg}}\right]} \cdot 31{,}08[\text{mi}] \cdot 0{,}2\left[{}^{\text{g}}/_{\text{mi}}\right] = \mathbf{0{,}81}\,\boldsymbol{g}\quad [AC405]$$

(2.150)

$$\Rightarrow \mathbf{CB}_{\boldsymbol{Benzo[a]pirene}} = \frac{1{,}367[\mathrm{yd}^3]\cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd}^3}\right]}{20\ [\mathrm{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]} \cdot\ 31{,}08[\mathrm{mi}] \cdot 0{,}000013\left[{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{mi}}\right] = \mathbf{5{,}26\ \cdot 10^{-5}}\ \boldsymbol{g}\quad [AD405]$$

(2.151)

$$\Rightarrow \mathbf{CB}_{\boldsymbol{CDD}/\boldsymbol{CDF}} = \frac{1{,}367[\mathrm{yd}^3]\cdot 2{,}1\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{yd}^3}\right]}{20\ [\mathrm{Mg}]} \cdot \frac{1}{1{,}102\left[{}^{\text{short ton}}/_{\mathrm{Mg}}\right]} \cdot\ 31{,}08[\mathrm{mi}] \cdot (2{,}77 \cdot 10^{-10})\ \left[{}^{\mathrm{g\ TEQ}}/_{\mathrm{mi}}\right] = \mathbf{1{,}12\ \cdot 10^{-9}}\ \boldsymbol{g}\quad [AE405]$$

(2.152)

Nella fase di Processes (Equipment), l'applicativo pone i valori di emissione pari a zero.

2.4 Aggiornamento unità di misura, riferimenti di cella ed etichette

L'approfondimento eseguito all'interno di PaLATE, analizzando i singoli passaggi che concorrono alla definizione degli impatti ambientali, ha portato alla luce alcuni errori all'interno dell'applicativo. Tali inesattezze sono state rettificate e di seguito riportate/approfondite.

Unità di Misura

Sono stati trovati gli errori di conversione per gli inquinanti di seguito elencati:

1. *Water consumption*, meglio nota come consumo di acqua, è riportata all'interno della Sector Table presente nel foglio EMF Transport avente unità di misura g/short ton come riportato in Fig. 2.26.

	M
123	**Water Consumption**
124	g/ton
125	96
126	169
127	18.037
128	79.490
129	31.388.630
130	1.871
131	35.885
132	27.118.690
133	0
134	g/kWh
135	0,08

Figura 2.26 - Consumo di Acqua all'interno della Sector Table

Il processo utilizzato per ottenere, ad esempio, il valore all'interno della cella M125, è stato riportato in Fig. 2.27 ed è stato meglio esplicitato mediante l'Eq. (2.137).

	M	N	O
109	gal/$		
110	**Water Consumption**	all prices from [Means 1995]	
111	3,79	28 $/Mg	25,4 $/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	

Figura 2.27 - Calcolo del Consumo di Acqua in EMF Transport

$$Consumo\ di\ Acqua = Consumo_{Acqua}\left[{}^{gal}/_{\$}\right] \cdot Prezzo\ \left[{}^{\$}/_{short\ ton}\right] = 3{,}79\left[{}^{gal}/_{\$}\right] \cdot 25{,}4\ \left[{}^{\$}/_{short\ ton}\right] \approx 96\ \left[{}^{gal}/_{short\ ton}\right] \quad (2.137)$$

Dato che l'unità di misura ottenuta gal/short ton non corrisponde a quella presente sull'etichetta fornita da PaLATE, nell'Eq.(2.138) è stata riportata la formulazione rettificata.

$$Consumo\ di\ Acqua = Consumo_{Acqua}\left[{}^{gal}/_{\$}\right] \cdot Conversione\ \left[{}^{l}/_{gal}\right] \cdot Conversione\ \left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot Prezzo\ \left[{}^{\$}/_{short\ ton}\right] = 3{,}79\left[{}^{gal}/_{\$}\right] \cdot 3{,}785\left[{}^{l}/_{gal}\right] \cdot 1.000\left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot 25{,}4\ \left[{}^{\$}/_{short\ ton}\right] \approx 364.583\ \left[{}^{g}/_{short\ ton}\right] \quad (2.138)$$

2. *Particolato*, all'interno del foglio EMF Transport presenta l'errore di conversione già trattato nel paragrafo relativo alle fonti dei fattori di emissione e che è stato qui ripetuto per mantenere una continuità nella trattazione.
L'unità di misura dell'emissione di particolato indicato da PaLATE è kg/Mg sebbene la formulazione eseguita sia del tipo riportato in Eq. (2.139)

$$PM_{10} = \frac{Emissione_{PM_{10}}\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot Conversione\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = \frac{0{,}015\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot 1000\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = 6{,}18 \cdot 10^{-3}\ \frac{g}{ton} \cdot \frac{Mg}{short\ ton} \cdot \frac{Mg}{kg} \quad (2.139)$$

Perché quanto riportato dall'applicativo risultasse concorde con l'etichetta, è stata effettuata una rettifica della formulazione come riportato in Eq. (2.140)

$$PM_{10} = \frac{Emissione_{PM_{10}}\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] \cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right] \cdot}{Conversione\left[{}^{kg}/_{Mg}\right]} = \frac{0{,}015\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] \cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]}{1000\left[{}^{g}/_{kg}\right]} = 7{,}5 \cdot 10^{-3}\ \frac{kg}{Mg} \quad (2.140)$$

3. *Particolato, Pb e RCRA Hazardous Waste Generated*, riportati all'interno del foglio Environmental Results sono stati moltiplicati per un fattore di conversione in modo tale che il valore finale corrispondesse con l'unità di misura riportato da PaLATE. A titolo di esempio, è stato riportato nell'Eq. (2.141) la formulazione errata dell' RCRA Hazardous Waste Generated e nell'Eq. (2.142), quella rettificata con bordato in rosso il fattore di conversione aggiunto.

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\text{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{ston}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

(2.141)

$$\textbf{Material Transportation} = \frac{\textbf{Vol}\,[\text{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\text{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{ston}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

(2.142)

Riferimenti di Cella

All'interno del foglio 'Environmental Results' sono stati riscontrati alcuni errori relativi ad uno scorretto riferimento di celle, da parte degli impatti di seguito riportati. È stato infatti riscontrato che, nella fase di:

1. *Material Transportation*, i valori di emissione relativi al consumo di acqua, Pb e RCRA Hazardous Waste Generated acquisiscono come riferimento dalla Sector Table i valori errati per il computo del trasporto di aggregati e bitume. Nello specifico, utilizzano erroneamente come riferimento le celle dell'emulsione bituminosa;
2. *Processes (Equipment)* , NO_x, SO_2 e CO, nella cella relativa alla stesa del conglomerato bituminoso, utilizzano come riferimento i macchinari necessari alla stesa del PCC. Nella stessa cella, il PM10 invece acquisisce come riferimento l'emissione dovuta all'NO_x e non quella dovuta al particolato.

Trasposizione di Dati ed Etichette

È stato trovato un errore di trasposizione dei dati ambientali all'interno del foglio EMF Transport. Come già accennato nel paragrafo relativo alle fonti dei fattori di emissione, i valori relativi al particolato emesso nella fase di carico e scarico degli aggregati di cava (come ripotato in Tabella 2.2) sono stati inseriti in ordine invertito e il valore di carico presenta anche un errore nell'ordine di grandezza.

In relazione all'inquinante NO_x è stata riscontrata una incongruenza tra i fogli Excel. Sebbene in diverse tabelle, PaLATE presenta l'inquinante sotto il nome di "NO_x", il valore da cui tutte queste celle prendono il riferimento, è presente all'interno della Sector Table ed è riportato come NO_2. Considerando che una volta formatosi, l'ossido di azoto, durante il processo di raffreddamento dei fumi si trasforma parzialmente in biossido di azoto con formazione di un miscuglio dei due ossidi chiamato NO_x, è stato ritenuto più opportuno rettificare l'etichetta della Sector Table sostituendo NO_2 con NO_x, in modo da garantire una certa continuità nella trattazione.

2.5 Conclusioni sullo studio dell'applicativo

Alla luce di quanto appreso nei paragrafi precedenti e sulla base delle correzioni apportate al software, i nuovi valori di energia consumata (Gross Energy Requirement, "GER") e CO_2 equivalente (Global Warming Potential, "GWP") prodotta nella fase di 'Initial Construction' per il solo strato di usura, sono stati riportati in Tab. 2.10.

Tabella 2.10 - Confronto tra i valori corretti di PaLATE e SimaPRO

			PaLATE 2.0	**PaLATE 2.0 (aggiornato)**	**SimaPRO7.3**
GER [MJ/m]	**Initial Construction**	**Usura**	4.024	4.077	8.501
GWP [kg/m]	**Initial Construction**	**Usura**	207	141	152

Osservando la Tab. 2.10 si evince come le correzioni apportate in PaLATE riportano il valore di GWP verso valori prossimi a quelli ottenuti da Farina et. al.: infatti, con la versione dell'applicativo non aggiornata si ottiene un valore di GWP pari a 207 kg/m mentre con la versione aggiornata si passa a 141 kg/m. Quest'ultimo valore è confrontabile con il caso studio di riferimento.

Lo stesso non si può di certo affermare per il GER: sebbene l'aggiornamento, il valore numerico di tale parametro resta pressoché invariato, e pari a circa alla metà di quello ottenuto nel caso studio di riferimento.

Tale discrepanza può essere sostanzialmente legata al diverso approccio con cui l'applicativo e il software SimaPRO 7.3 calcolano i consumi energetici. Nel caso delle operazioni di trasporto, ad esempio, PaLATE definisce il GER attraverso il contributo legato alla combustione del diesel. Probabilmente, in software più evoluti come SimaPRO 7.3, si considera anche tutta l'embodied energy connessa alla produzione del diesel stesso, al trasporto presso i distributori, …

In conclusione, PaLATE ha dei confini nel calcolo degli impatti molto più ristretti rispetto ad altri strumenti impiegati negli studi di LCA.

CAPITOLO 3

STATO DELL'ARTE

Dopo aver analizzato in maniera dettagliata il software che si è scelto di utilizzare nel presente lavoro di tesi, lo studio che è stato condotto intende mettere in risalto il vantaggio ambientale derivante dall'utilizzo di miscele innovative ad elevato contenuto di materie prime secondarie.

Le miscele innovative sono state definite all'interno dell'elaborato di tesi di laurea magistrale redatto da Stirparo et al. "Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali" [1]. Tali miscele presentano materie prime secondarie, quali il fresato bituminoso, lo sludge e la sabbia (unico materiale vergine) legate con acqua ed emulsione bituminosa. È stato previsto l'utilizzo di tali miscele su strade secondarie di servizio a basso volume di traffico.

Dopo un'attenta revisione della letteratura tecnica, col presente capitolo sono state illustrate le caratteristiche dei materiali costituenti le miscele innovative e i benefici ambientali connessi ai processi di riciclaggio. Inoltre, poiché il procedimento che sta alla base di questo lavoro di tesi è il Life Cycle Assessment, è stato effettuato un breve approfondimento circa le sue caratteristiche. Infine, è stato esposto l'inquadramento del presente lavoro nella letteratura esistente e come esso contribuisca a fornire una maggiore consapevolezza dei benefici provenienti dall'utilizzo di materiali riciclati

2.1 Fresato bituminoso: descrizione e impieghi

La maggior parte della rete stradale presente in Europa ha visto la propria crescita negli ultimi 100 anni e il suo valore monetario ammonta a circa 16 trilioni di euro. Nel corso del tempo, la gestione del sistema stradale sta passando dalla realizzazione di nuove opere alla manutenzione di quelle già esistenti, portandosi in un'ottica volta all'ottimizzazione delle risorse e non ad un loro mero utilizzo [29] .

Il materiale da costruzione predominante per le pavimentazioni è il conglomerato bituminoso di cui si contano circa 950 miliardi di tonnellate attualmente incorporate nella rete stradale europea. La sua capacità di rendere la guida confortevole e sicura, il rapporto qualità prezzo, la velocità d'installazione e la sua flessibilità nella costruzione e manutenzione, lo hanno reso il materiale prediletto per le opere civili.

Le operazioni di manutenzione volte alla rimozione delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso per la ricostruzione o il rifacimento dei differenti strati costituenti la sovrastruttura, producono una considerevole quantità di *fresato bituminoso*, noto nella letteratura internazionale come Reclaimed Asphalt Pavement (o RAP). Il RAP è stato qualificato dalla norma europea EN 13108-8 come conglomerato ricavato mediante fresatura, frantumazione di lastre o grumi da lastre di pavimentazioni stradali o come scarto di sovrapproduzione.

Se correttamente frantumato e vagliato, il RAP è caratterizzato da inerti di alta qualità ricoperti di bitume, peculiarità che gli permette di sostituire l'aggregato vergine e il legante bituminoso rendendolo un materiale riciclato particolarmente ricercato. Inoltre, il fresato bituminoso presenta i benefici economici e ambientali [30]riportati in Fig. 3.1.

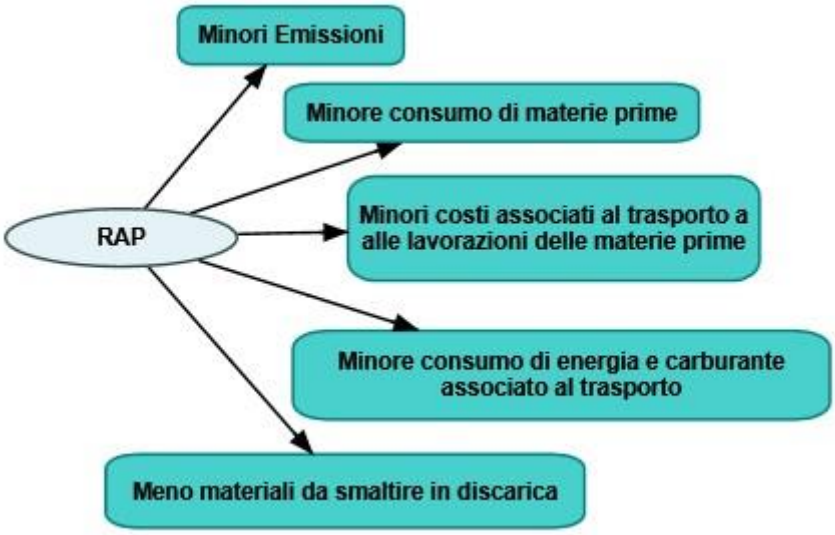


Figura 0.1 - Vantaggi economici e ambientali del fresato bituminoso

Gran parte del fresato bituminoso è riciclato secondo tecnologie di produzione a caldo (Hot Mix Asphalt), a freddo (Cold Mix Asphalt) o a temperatura medio-alte (Warm Mix Asphalt).

Le miscele bituminose da analizzare col presente lavoro di tesi, la cui composizione è stata studiata da Stirparo et al. [1], sono caratterizzate da elevate percentuali di fresato bituminoso (75 % sul peso complessivo dello scheletro solido) e prodotte mediante tecnologia a freddo. La produzione è, quindi, avvenuta a temperatura ambiente eludendo la necessità di portare aggregati e legante ad elevate temperature, come di solito avviene per la realizzazione dei conglomerati bituminosi a caldo tradizionali. Oltre, quindi, al risparmio energetico derivante da una miscelazione a temperatura ambiente, si aggiungono anche i risvolti positivi che ne conseguono per gli operatori da una stesa priva di emissioni nocive [1].

2.2 Sludge : descrizione e impieghi

Con il termine "sludge" si indicano i fanghi di lavaggio degli inerti di cava, impiegati per le miscele bituminose e cementizie, ed è un rifiuto riportato nel Catalogo Europeo dei Rifiuti al codice 010413 [1].

Dato che la nascita di nuove cave comporta un deterioramento del patrimonio ambientale e che le disposizioni definite dai governi competenti circa la loro apertura e il loro sfruttamento sono diventate più severe nel corso degli anni, le imprese di costruzione si sono orientate su un maggiore utilizzo di materiali riciclati. A tal proposito, il riutilizzo dell'ammontare di rifiuto generato durante le fasi di produzione degli aggregati costituisce un vantaggio considerevole.

In letteratura esistono svariati esempi di come lo sludge sia ormai diventato parte integrante dei materiali da costruzione.

All'interno dell'articolo di Moreno et al. [31] è stata analizzata la validità di utilizzo dei fanghi derivanti dal lavaggio del Silestone (una polvere di quarzo a grana fine, utilizzata a fini decorativi) come sostituto del filler convenzionale. Durante la fase di produzione del Silestone, si generano una quantità di sottoprodotti pari a circa 10000 tonnellate al mese, i quali sono etichettati come materiali di scarto destinati alle discariche e ad arricchire quindi, l'impatto negativo sull'ambiente. Testando tre differenti miscele aventi percentuali di Silestone variabili, si è evinto che l'utilizzo di questo materiale all'interno delle miscele bituminose, non solo è una soluzione valida per il recupero e il riciclaggio dei materiali di scarto, ma presenta anche dei vantaggi operativi non indifferenti (quali, ad esempio, un ridotto consumo di bitume, un'eccellente resistenza alla deformazione plastica e una maggiore efficienza dal punto di vista dei costi di produzione).

Un'altra prova circa la validità dell'utilizzo di sludge (anche noti come Stone Sawmilling Sludge o SSS), proveniente dalla lavorazione di pietre ornamentali, all'interno delle miscele bituminose, è stata fornita da Santagata et al. [32]

Impiegando due differenti tipologie di sludge in sostituzione del filler, sono stati preparati due tipologie di mastici e due tipologie di miscele bituminose, successivamente confrontati con mastici e miscele bituminose tradizionali. I due tipi di SSS differiscono tra loro per composizione mineralogica e per il tipo di taglio a cui sono state sottoposte le pietre naturali (taglio con lama diamantata e con lama a sega). Sulla base di questo confronto si è evinto che l'utilizzo di SSS filler in sostituzione del filler tradizionale, ha portato ad un aumento delle prestazioni sia dei mastici sia delle miscele bituminose rispetto a quelle avente composizione standard. D'altra parte, la presenza di SSS non è stata in grado di garantire una sufficiente resistenza al propagarsi della fessurazione.

In definitiva, l'utilizzo di sludge in sostituzione del filler può comportare un aumento delle prestazioni del conglomerato bituminoso.

Oltre al RAP, le miscele trattate nel presente lavoro prevedono la presenza di sludge, in ragione del 21 % sul peso complessivo dello scheletro solido. A differenza di quanto riportato dall'indagine bibliografica già riportata, lo sludge qui considerato non è un vero e proprio filler poiché presenta pezzature maggiori rispetto alla concezione classica di filler.

2.3 Miscele innovative : descrizione e applicazioni

Negli ultimi decenni, il settore delle costruzioni interessato alla produzione di conglomerati bituminosi per opere stradali, ha aumentato la propria consapevolezza nei confronti del risparmio energetico e dei vantaggi ambientali provenienti dal processo di stesa di conglomerati bituminosi miscelati a freddo (Cold Mix Asphalt) o a temperatura medio-alta (Warm Mix Asphalt o Half-Warm Mix Asphalt) rispetto ad una miscelazione a caldo (Hot Mix Asphalt). In aggiunta alla consapevolezza del patrimonio ambientale già deturpato, risiede la necessità di migliorare l'efficienza energetica e a questo proposito le nuove misure sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico, fissate dall'Unione Europea mediante il Protocollo di Kyoto, hanno incentivato gli sforzi per ridurre le emissioni di gas serra [33].

La tecnologia di miscelazione a freddo risulta essere migliore delle altre due (HMA e WMA) in termini di rapporto costo-efficacia, consumi energetici e rispetto dell'ambiente. I CMA necessitano temperature di produzione comprese tra 0 e 40°C e quindi, non dovendo utilizzare elevate temperature si verificano vantaggi economici e ambientali. Altro vantaggio risiede nella facilità di utilizzo in quanto non richiede elevati investimenti in attrezzature e permette di essere realizzato anche in aree remote sia per le costruzioni iniziali (quindi con utilizzo di miscele vergini 100%) che per il riciclaggio delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso (ad esempio il RAP) [34].

Per quanto riguarda i processi di riciclaggio, si suddividono in *riciclaggio a freddo in impianto* e *riciclaggio a freddo in sito*. Gli schemi per entrambi i processi sono stati riportati in Fig. 3.2a e Fig. 3.2b, rispettivamente.

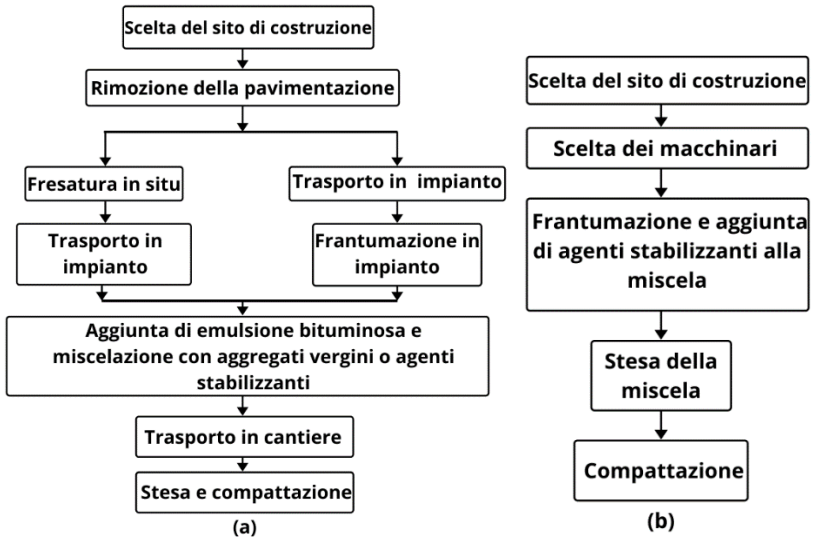


Figura 0.2 - Processi di riciclaggio a freddo in impianto (a) e in sito (b) [7]

All'interno dei casi studio che sono stati analizzati nel capitolo 4, il riciclaggio a freddo è da effettuarsi direttamente in cantiere. I processi riportati in Fig. 3.2 sono da modificarsi come riportato di seguito:

- definizione del sito di costruzione;
- frantumazione e vagliatura del RAP, e miscelazione con sabbia, sludge acqua ed emulsione bituminosa;
- stesa della miscela innovativa;
- compattazione.

Con l'intento di fornire un ordine di grandezza del vantaggio ambientale proveniente dall'utilizzo di miscele bituminose prodotte con tecnologia a freddo, si riportano in Fig. 3.3 il consumo di carburante e le emissioni di CO2, confrontandoli con miscele bituminose prodotte rispettivamente con tecniche HWMA, WHA e HMA. Si noti come il consumo di carburante e le emissioni di CO_2 per le miscele a freddo siano pari approssimativamente a zero.

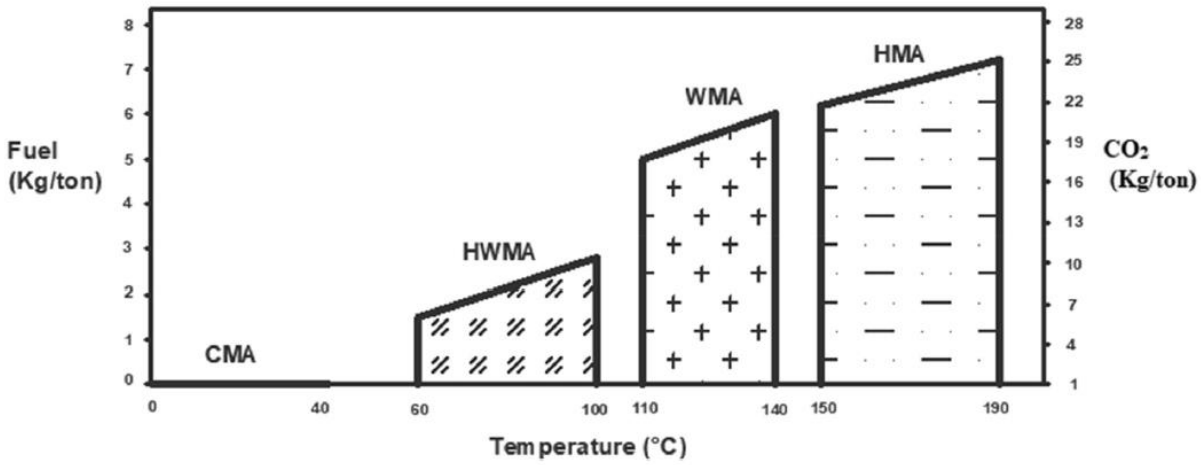
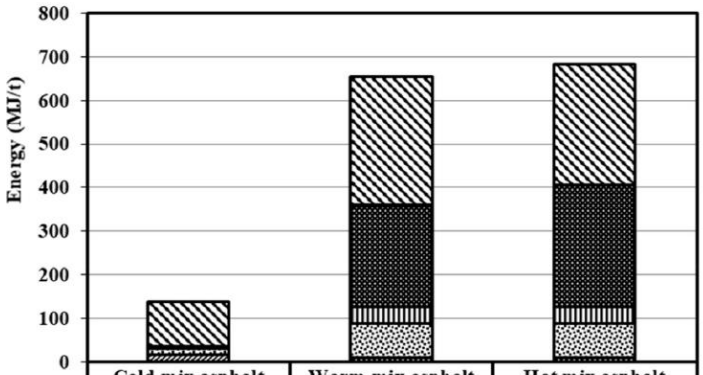


Figura 0.3 -Consumo di carburante ed emissioni di CO_2 associate alle diverse tecnologie di produzione del conglomerato bituminoso [6]

Un ulteriore metodo di valutazione è stato fornito osservando il consumo di energia per tonnellata di conglomerato bituminoso prodotto, come riportato in Fig. 3.4. Il dispendio energetico delle miscele bituminose prodotte con tecnologia a freddo è decisamente minore rispetto a quelle generate con tecnologia a caldo. Tale differenza è dovuta alla minore richiesta di legante da parte della miscela e dal recupero di materie prime seconde che avviene direttamente in sito. Per produrre una tonnellata di conglomerato bituminoso, le miscele prodotte a caldo richiedono 684 MJ di energia contro i 139 MJ utilizzati dalle miscele a freddo.



	Cold mix asphalt	Warm mix asphalt	Hot mix asphalt
Binder	104	294	279
Manufacture	0	234	279
Aggregate	5	38	38
Transportation	15	80	79
Laying	15	9	9

Figura 0.4 - Consumi energetici in funzione delle differenti tecnologie di produzione del conglomerato bituminoso [34]

Per quanto riguarda la stesa di questo tipo di miscele, il vantaggio risiede nella buona lavorabilità a bassa temperatura. Questa caratteristica è dovuta alla ridotta viscosità del legante bituminoso impiegato (cutback asphalt o emulsione bituminosa).

Con il CMA è possibile, quindi, pavimentare a temperatura ambiente e soprattutto nella stagione invernale quando solitamente l'utilizzo di un HMA comporta delle difficoltà tecniche. Inoltre, i tempi di costruzione stradale risultano ridotti e in alcuni casi, come il recupero di un'importante strada urbana o autostrada, il suo utilizzo può risultare particolarmente conveniente [34].

2.4 Life Cycle Assessment

La *valutazione del ciclo di vita*, anche noto come Life Cycle Assessment (LCA) è uno strumento che permette di valutare l'impatto ambientale dovuto ad un prodotto, un processo o a un'attività. Si basa sull'individuazione e la quantificazione dei flussi di materiali utilizzati, sulla stima dei consumi di energia e delle emissioni nocive prodotte, al fine di definire e valutare le ripercussioni che generano sull'ecosistema (Fig. 3.5) [35].

Utilizzare la tecnica del Life Cycle Assessment significa quindi studiare un intero sistema caratterizzato da un insieme di piccole attività dove una singola decisione ambientale spesso si ripercuote con risonanza sull'intero sistema. La capacità di individuare se e quale decisione ha fatto aumentare l'onere ambientale e la possibilità di prevedere delle variazioni a favore dell'ecosistema è una delle peculiarità di questa tecnica.

Figura 0.5 - Scopi del Life Cycle Assessment

L'importanza di portare avanti questo tipo di studio può essere di duplice natura. Uno studio di LCA se effettuato su un singolo prodotto permette di analizzare i flussi nocivi generati in termini di emissioni dannose per l'ambiente e quindi, intervenendo su alcuni parametri, ne permette un maggiore controllo. Dall'altra parte, se utilizzato come metodo comparativo, mettendo a confronto due studi di LCA, permette di indentificare quale possa essere la soluzione più vantaggiosa in termini di sostenibilità ambientale.

Normativa di Riferimento : EN 14040

Il Life Cycle Assessment è stato definito come un processo "*cradle to grave*", ovvero dalla "*culla alla tomba".* Analizza gli impatti ambientali lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto, a partire dall'estrazione e dall'utilizzo delle materie prime, fino al trattamento di fine vita, al riciclaggio e allo smaltimento finale. È considerata una delle molteplici tecniche attualmente

esistenti di gestione ambientale ma è necessario, prima di procedere ad una sua applicazione, verificare che sia la tecnica più adatta da utilizzare nella circostanza considerata.

Come riportato dalla normativa EN 14040, uno studio di LCA prevede quattro fasi:

1. Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione, in cui i limiti del sistema e i livelli di dettaglio da portare avanti, dipendono dal prodotto oggetto di studio;
2. Analisi dell'inventario, noto nella letteratura internazionale come *Life Cycle Inventory* (o LCI), il quale analizza i dati di input raccolti per effettuare lo studio;
3. Valutazione degli impatti, anche nota come *Life Cycle Inventory Analysis* (o LCIA) la quale fornisce informazioni aggiuntive utili a valutare i risultati LCI del sistema considerato;
4. Interpretazione, dove i risultati forniti dal LCI e/o LCIA sono valutati e discussi all'interno dei confini di sistema posti all'inizio dello studio. Naturalmente, è possibile che gli obiettivi preposti siano raggiunti con una sola analisi oppure, che sia necessaria più di una iterazione del processo di valutazione.

In linea di principio, è possibile utilizzare uno studio di LCA per effettuare valutazioni e confronti tra differenti casi studio, con il vincolo che le ipotesi e il contesto degli studi comparati siano tra loro equivalenti.

Una rappresentazione grafica delle fasi appena elencate, è stata fornita nella Fig. 3.6 all'interno del quale, sono state elencate solo alcune delle possibili applicazioni previste da uno studio LCA.

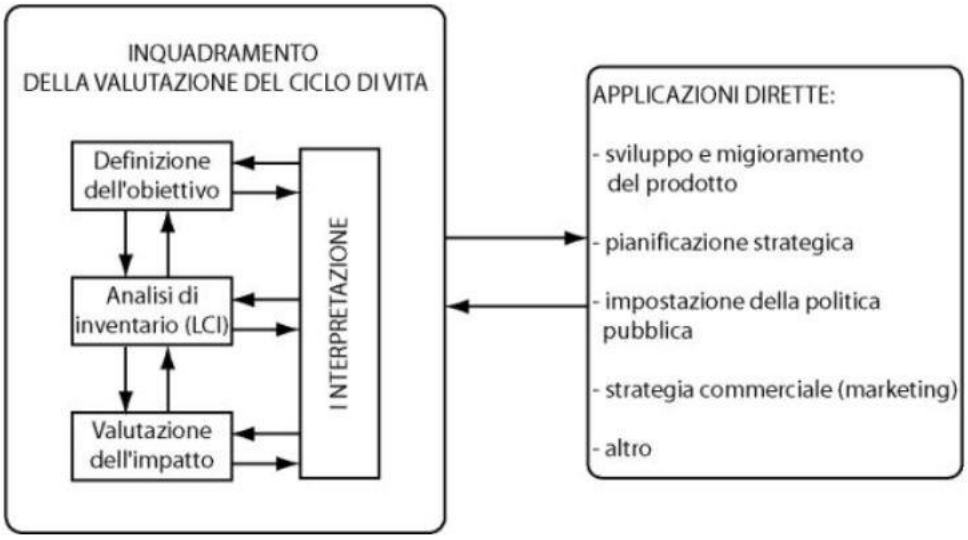


Figura 0.6 - Fasi del Life Cycle Assessment

Il livello di dettaglio che può raggiungere uno studio LCA, varia in base all'obiettivo di studio definito e ai confini del campo di applicazione preposti. A tal proposito risulta semplice comprendere come non esista un metodo univoco per condurre uno studio di LCA, il che fornisce alle organizzazioni competenti un'elevata flessibilità in materia di valutazione ambientale.

È importante notare che sebbene uno studio di LCA permetta di trattare potenziali impatti ambientali, non prevede una loro definizione precisa o assoluta a causa dei seguenti motivi:

- Continuo aggiornamento dei dati ambientali nel tempo;
- Incertezza tipica della modellizzazione dei fattori di emissione;
- Formulazione degli impatti relativa ad un'unità di riferimento variabile a seconda dello studio considerato.

A titolo di esempio è stato riportato in Fig. 3.7 un caso tipo di prodotto soggetto ad uno studio di LCA, dove si potrebbe considerare come:

- Flussi elementari in ingresso ➡ Petrolio greggio dal suolo
- Flussi elementari in uscita ➡ Emissioni in aria
- Flussi di prodotti intermedi ➡ Materiali base
- Flussi di prodotti in ingresso o in uscita ➡ Materiali riciclati

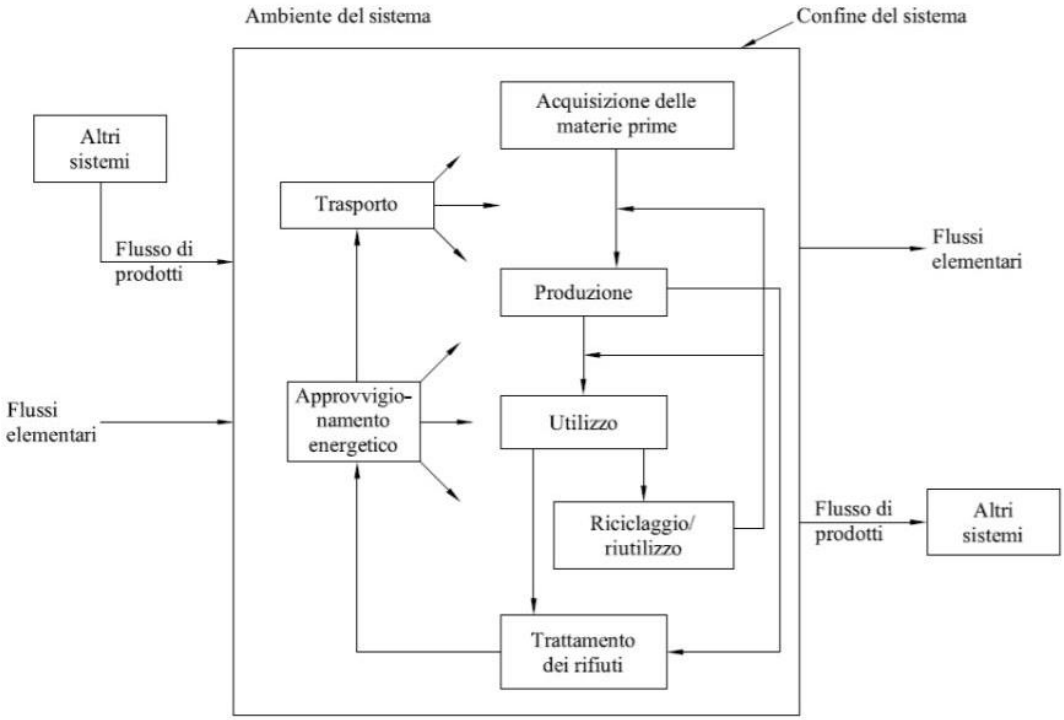


Figura 0.7 - Esempio sistema prodotto LCA

LCA applicato alle Pavimentazioni Stradali

La metodologia utilizzata per organizzare concettualmente il ciclo di vita di una pavimentazione stradale può essere suddivisa in cinque fasi [36]:

1. *Estrazione e produzione dei materiali*, come gli aggregati o la produzione di leganti e miscele bituminose. In questa fase sono stati presi in considerazione anche il trasporto e le attrezzature necessarie al caricamento dei camion;
2. *Costruzione*, all'interno del quale vengono considerati tutti i lavori necessari alla realizzazione della pavimentazione, quali ad esempio i lavori in terra e di applicazione degli strati di pavimentazione;
3. *Utilizzo*, che comprende aspetti solitamente trascurati dalla maggior parte delle metodologie esistenti e tiene conto, in termini di resistenza al rotolamento, dei consumi di energia dovuti al tipo di pavimentazione e alle sue caratteristiche. Permette l'inserimento di un insieme di consumi che possono essere definiti sperimentalmente;
4. *Manutenzione*, in questa fase vengono inserite tutte le operazioni effettuate sulla pavimentazione stradale affinché mantenga le adeguate caratteristiche per tutto il suo ciclo di vita;
5. *Fine vita*, si verifica quando la pavimentazione ha raggiunto il termine della sua vita utile e a seconda delle disposizioni fornite dall'amministrazione stradale locale, si decide se procedere al recupero o alla demolizione della stessa.

Sin dalla metà degli anni '90, periodo in cui sono state presentate le prime pubblicazioni relative a studi di LCA sulle pavimentazioni stradali, tale approccio ha guadagnato gradualmente consensi sul panorama delle metodologie per la quantificazione degli impatti ambientali. Il numero preciso di documenti presenti in letteratura è del tutto elusivo dato che fornire una definizione esatta degli impatti prodotti non è così elementare. Teoricamente, uno studio di LCA sarà in grado di esaminare ciascuna fase del ciclo di vita di una pavimentazione in modo completo ed esaustivo. Tuttavia, date le limitazioni dovute ai dati di cui si è provvisti e alle informazioni che si posseggono in relazione all'effettiva risonanza che un inquinante può avere, tutte le valutazioni ambientali sono costrette a semplificare il loro campo di applicazione e ad esaminare solo quelle fasi e quei processi che risultano effettivamente realizzabili all'interno dei loro vincoli individuali [37] .

Lo sviluppo di studi di LCA in grado di quantificare i vantaggi ambientali proveniente dall'utilizzo di materiali di riciclo va di pari passo con la necessità sempre crescente di orientare l'ingegneria civile verso costruzioni di tipo sostenibile. Il modo in cui si sceglie di costruire, sia edifici che infrastrutture, può influenzare massivamente il carico ambientale. Costruire in maniera sostenibile significa [38]:

- progettare l'infrastruttura minimizzando i danni all'ambiente;
- garantire efficienza sia idrica che energetica durante tutte le fasi del processo edilizio;
- minimizzare l'utilizzo di risorse naturali e preferire l'utilizzo di fonti sostenibili;
- garantire i requisiti di salute e sicurezza a tutti i lavoratori impegnati in cantiere, promuovendo l'eliminazione di materiali nocivi per la salute.

Con lo scopo di orientarsi verso una costruzione di tipo sostenibile, all'interno di questo elaborato di tesi, la valutazione del ciclo di vita di pavimentazioni per strade secondarie a basso volume di traffico, prodotte con elevati contenuti di materie prime secondarie attraverso tecnologia a freddo, è stato effettuato mediante l'utilizzo di PaLATE, un modello LCA semplificato di cui sono state ampiamente approfondite le caratteristiche nel capitolo precedente.

2.5 Inquadramento del lavoro di tesi all'interno della letteratura analizzata

Lo scopo di questo elaborato tesi è quello di sviluppare uno studio di LCA di una miscela bituminosa innovativa, contenente elevate quantità di materie prime secondarie e prodotta con tecnologia a freddo, da impiegarsi per strade secondarie a basso volume di traffico. I risultati ottenuti evidenzieranno quali sono i vantaggi e gli svantaggi, in termini ambientali ed energetici, rispetto ad un ipotizzato "stato attuale", che prevede l'impiego di fresato bituminoso steso a secco.

La miscela bituminosa innovativa è stata studiata, da un punto di vista della composizione e performance meccaniche, all'interno dell'elaborato tesi "Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali" [1]. Essa fa parte di un più ampio set di miscele innovative, le quali sono composte da elevate quantità di materie prime secondarie, quali fresato bituminoso e sludge miscelate a freddo, con acqua in elevata quantità ed emulsione bituminosa, che fornisce la fase legante.

Sono state definite miscele innovative poiché trattate differentemente dai classici conglomerati bituminosi prodotti a freddo. Infatti, si è cercato di minimizzare l'impatto economico ed ambientale (dalla produzione alla posa in opera), ricorrendo a strumenti e prove non convenzionali per questo tipo di materiali, massimizzando, inoltre, le caratteristiche meccaniche.

All'interno del precedente lavoro, la definizione delle miscele innovative è stata suddivisa in due fasi:

- *Pre-sperimentazione*, in cui sono stati collaudati gli strumenti impiegati poiché di uso non convenzionale nella definizione dei conglomerati bituminosi miscelati a freddo (ad esempio il modello Funk and Dinger per la definizione della curva granulometria di progetto e la prova di spandimento per definire la fase fluida ottimale);
- *Sperimentazione,* dove tenendo conto dei risultati ottenuti nella fase precedente, è stata effettuata un'analisi più approfondita con lo scopo di definire un set di miscele avente soddisfacenti caratteristiche meccaniche e adeguati requisiti di sostenibilità ambientale ed economica.

Da quest'ultima fase, sono emerse le tre miscele ottimali, elencate di seguito in ordine crescente rispetto alle prestazioni meccaniche:

- Mix 2-S con 65% di fresato bituminoso, il 25% di sludge e il 10% di sabbia;
- Mix 3-S con 70% di fresato bituminoso, il 21% di sludge e il 9% di sabbia;
- Mix 4-S con 75% di fresato bituminoso, il 18 % di sludge e il 7% di sabbia.

Il contenuto di acqua, sul peso di aggregato secco, è stato posto pari 13,5% per il Mix 4-S e il Mix 2-S, e pari al 16% per il Mix 3-S. L'emulsione bituminosa è stata tenuta sempre fissa al 4% per tutte le miscele analizzate per motivi economici.

In virtù dei risultati ottenuti dalla fase di sperimentazione, lo studio condotto con questo lavoro è relativo alla sola miscela denominata Mix4-S, ritenuta quella più performante da un punto di vista meccanico.

Come discusso nei precedenti paragrafi, il riciclaggio di fresato bituminoso e sludge, genera importanti benefici ambientali ed economici, qualora reimpiegati correttamente nella produzione di nuovi materiali per le costruzioni stradali. Al tempo stesso, studi di LCA evidenziano come la tecnologia a freddo (riguardante sia la produzione che la stesa e compattazione) incrementa le caratteristiche di sostenibilità delle miscele bituminose.

Con questo lavoro di tesi, si vuole fornire un contributo, seppur da approfondire con altri studi e ricerche, rispetto alla letteratura tecnica esistente, concernente i vantaggi ambientali che si ottengono attraverso il riciclaggio di materie prime secondarie prodotte con tecnologia a freddo. L'approccio seguito individua nella metodologia Life Cycle Assessment lo strumento per perseguire il fine dell'intero lavoro.

Dato che le miscele sono caratterizzate da materie prime secondarie per quasi il 90% della loro composizione e che le tecniche di miscelazione rientrano tra le più innovative nell'ottica di protezione ambientale, per valutarne l'effettivo livello di sostenibilità si è deciso di portare avanti una valutazione del ciclo di vita (LCA) mediante l'utilizzo di PaLATE.

La valutazione dell'effettivo vantaggio ambientale è stata effettuata mettendo a confronto l'impatto ambientale della miscela innovativa Mix4-S con una miscela costituita al 100% da fresato bituminoso, senza aggiunta di acqua ed emulsione bituminosa. Si è ipotizzato che quest'ultimo materiale sia rappresentativo dello stato attuale di pavimentare le strade secondarie a basso volume di traffico.

Infine, sempre al fine di valutare l'impatto ambientale, è stato effettuato anche un secondo confronto tra la miscela costituita al 100% da fresato bituminoso ed una terza miscela costituita al 100% da materiali vergini.

CAPITOLO 4

CASI STUDIO

Lo studio approfondito di PaLATE e la revisione della letteratura esistente, effettuati nei precedenti capitoli, sono stati fondamentali per lo sviluppo dei casi studio descritti in questo capitolo.

3.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

L'obiettivo è quello di valutare gli impatti generati nel ciclo di vita di una miscela caratterizzata da elevate quantità di materie prime secondarie da utilizzare per strade secondarie a basso volume di traffico. La motivazione alla base di questo studio è la necessità sempre crescente di diminuire l'impatto ambientale provocato dal settore delle costruzioni mediante l'utilizzo di materiali di riciclo come il fresato bituminoso e lo sludge e l'utilizzo di tecniche innovative a ridotto impatto ambientale come, ad esempio, la scelta di processi di miscelazione a freddo piuttosto che a caldo.

All'interno di questo capitolo, mediante l'utilizzo di PaLATE, è stato analizzato l'onere ambientale dovuto alla realizzazione di 1 km di strada utilizzando una miscela innovativa, denominata Mix 4-S, definita all'interno dello studio di Stirparo et al. [1]. Per tale miscela è stata prevista una fase di miscelazione a freddo in situ, seguito dai processi di stesa e compattazione. Al fine di contestualizzare meglio i risultati ottenuti, sono stati introdotti anche altri due materiali, ipotizzati come rappresentativi dello stato attuale con cui sono trattate le strade secondarie a basso volume di traffico:

- **100%RAP**, per il quale è stata prevista la frantumazione del fresato per mezzo di un mulino e successivamente la stesa e la compattazione senza ulteriori processi intermedi;
- **100%Aggregati Vergini**, il quale prevede la lavorazione del quantitativo di aggregati vergini necessari per la realizzazione della pavimentazione, seguito dai processi di stesa e compattazione .

La valutazione dell'eventuale vantaggio proveniente dall'utilizzo della miscela innovativa rispetto alle altre due è stata effettuata all'interno del capitolo 5 considerando i seguenti approcci LCA:

- *Cradle to Gate*, all'interno del quale sono state confrontate tutte le miscele considerando i processi a partire dalla produzione dei materiali fino alla costruzione della strada. La lunghezza della strada posta pari ad 1 km è stata scelta come unità funzionale per questo confronto.
- *Cradle to the End*, in cui il confronto tra la miscela Mix 4 – S e il 100%RAP è stato effettuato considerando dalla fase di produzione delle materie prime alla fine della vita di servizio della strada. È stata quindi analizzata sia la fase di costruzione che di manutenzione imponendo come unità funzionale, la lunghezza pari ad 1 km e la durata della vita utile della pavimentazione.

Prima di addentrarsi nei singoli casi studio sono stati effettuati degli aggiornamenti ai dati forniti dall'applicativo mediante una dettagliata analisi d'inventario ed è stata fornita una descrizione della strada di progetto scelta per l'analisi dei casi studio.

3.2 Analisi d'inventario

Avendo dedotto nel capitolo 2 che la maggior parte dei fattori di emissione forniti da PaLATE sono ormai obsoleti, si è scelto di apportare delle modifiche alla Sector Table presente all'interno del foglio EMF Transport.

È stato effettuato un Life Cycle Inventory (LCI), comune a tutti i casi studio, dei tre materiali principalmente utilizzati per la composizione di una miscela classica in conglomerato bituminoso: bitume, aggregati ed emulsione bituminosa. Inoltre, è stato effettuato un aggiornamento sui dati relativi alla produzione di cementi, alla fornitura di acqua e alle emissioni generate durante le fasi di produzione del diesel.

Bitume

Per il bitume si è scelto di fare riferimento alla versione più aggiornata dell'Eurobitume [39] all'interno del quale vengono riportati i flussi necessari per la produzione di 1 tonnellata di bitume (Fig. 4.1). Con questi dati si considerano anche i flussi associati alla costruzione dell'infrastruttura necessaria alla produzione, al trasporto e alla raffinazione del petrolio greggio.

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

Figura 3.1- LCI per la produzione di 1 tonnellata di bitume [38]

Il valore di Global Warming Potential (GWP) è stato ottenuto come somma delle emissioni di CO_2 e CH_4.

Considerando che 1 kg di CO_2 equivale a 25 kg di CH_4 , il valore di GWP finale è stato ottenuto come riportato in Eq. (4.1)

$$\boldsymbol{GWP} = CO_2\left[{}^{g}/_{ton}\right] + \left(25 \cdot CH_4\left[{}^{g}/_{ton}\right]\right) = 189.343\left[{}^{g}/_{ton}\right] + \left(25 \cdot 535\left[{}^{g}/_{ton}\right]\right) = \boldsymbol{202.718\ {}^{g}/_{ton}} \quad (4.1)$$

Ricordando che PaLATE non utilizza la tonnellata metrica ma la tonnellata corta, anche nota come 'short ton', per tutti i valori da inserire nell'applicativo è stata effettuata la conversione come riportato in Eq. (4.2)

$$\boldsymbol{GWP} = \frac{Emissione\left[{}^{g}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{202.718\ [g/ton]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \boldsymbol{183.955\ {}^{g}/_{short\ ton}} \quad (4.2)$$

Le emissioni rappresentate da CO, NO_X, SO_2 e PM_{10}, per poter essere inseriti in PaLATE sono stati semplicemente convertiti in grammi su tonnellata corta, come riportato in Eq. (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6).

$$\boldsymbol{CO} = \frac{Emissione\ \left[{}^{g}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = = \frac{494\ [g/ton]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \boldsymbol{448\ {}^{g}/_{short\ ton}} \quad (4.3)$$

$$\boldsymbol{NO_X} = \frac{Emissione\ \left[{}^{g}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = = \frac{1.224\ [g/ton]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \boldsymbol{1.111\ {}^{g}/_{short\ ton}} \quad (4.4)$$

$$\boldsymbol{SO_2} = \frac{Emissione\ \left[{}^{g}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = = \frac{940\ [g/ton]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \boldsymbol{853\ {}^{g}/_{short\ ton}} \quad (4.5)$$

$$\boldsymbol{PM_{10}} = \frac{Emissione\ \left[{}^{g}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = = \frac{271\ [g/ton]}{1{,}102\ \left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \boldsymbol{246\ {}^{g}/_{short\ ton}} \quad (4.6)$$

Il valore di Gross Energy Requirement (GER) è stato ottenuto come somma dei consumi energetici dovuti rispettivamente al 'Natural Gas' e al 'Crude Oil' e successivamente convertiti in megajoule su tonnellata corta, come descritto nell' Eq. (4.9). Si noti che perché potessero essere inseriti in PaLATE sono stati previamente moltiplicati per i rispettivi poteri caloriferi come riportato nelle Eq. (4.7) e (4.8).

$$Natural\ Gas = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 27\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 52{,}3\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 1.412{,}1\ {}^{MJ}/_{ton} \quad (4.7)$$

$$Crude\ Oil = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 22\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 44{,}5\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 979\ {}^{MJ}/_{ton} \tag{4.8}$$

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Natural\ Gas\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + Crude\ Oil\ \left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{1.412{,}1\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + 979\left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{2.170}\ {}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.9}$$

Infine, il Consumo di Acqua è stato convertito come riportato nell'Eq. (4.10) e ricordando che 1 litro di acqua equivale ad 1 chilogrammo dello stesso liquido, il valore riportato in Eurobitume, è stato considerato non come litri su tonnellata ma chilogrammi su tonnellata. Successivamente, per poter rimanere in linea con l'unità di misura riportata in PaLATE è stato convertito in grammi su tonnellata corta.

$$\boldsymbol{Consumo_{Acqua}} = \frac{Consumo\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{1.115\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{1.011.796}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.10}$$

Aggregati Vergini

I valori di emissioni dovuti alla lavorazione degli aggregati vergini sono stati ricavati dallo studio di Garbarino et al. [40] in cui si effettua un'analisi dei flussi mediante Life Cycle Assessment, volta alla pianificazione e alla gestione dei rifiuti da C&D (costruzione e demolizione). L'eco-profilo delineato per gli aggregati naturali (AN) è riportato in Fig. 4.2 e rappresenta un'analisi del ciclo di vita del tipo "cradle to gate" (dalla culla al cancello); considera il processo di produzione dalla fase di estrazione delle materie prime, fino al momento in cui il prodotto risulta essere pronto per il trasferimento al successivo operatore della catena di fornitura [41].

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	-	-

Figura 3.2 - Eco-profilo degli Aggregati Naturali (AN) e degli Aggregati Riciclati (AR) [39]

Naturalmente, i valori di Global Warming Potential (GWP) e Gross Energy Requirement (GER) così definiti, sono stati convertiti come riportato nell' Eq. (4.11) e (4.12) perché potessero essere inseriti in PaLATE.

$$\boldsymbol{GWP} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{ton}\right]\cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{4{,}6\left[{}^{kg}/_{ton}\right]\cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{4.174}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.11}$$

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Emissione\left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{67{,}7\left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{61{,}4}\ {}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.12}$$

Per quanto concerne i consumi, sono stati ricavati dall'articolo Farina et al. [42] che effettua uno studio di LCA sull'utilizzo di miscele bituminose realizzate con materiale riciclato. A sua volta, in questo articolo, i dati relativi agli aggregati si riferiscono al caso studio di Blengini et al. [43] il quale effettua uno studio LCA per valutare l'impatto ambientale proveniente dal riciclaggio dei rifiuti da C&D (costruzione e demolizione).

I valori relativi al Consumo di Elettricità e al Consumo di Acqua sono stati riportati e convertiti nelle Eq. (4.13) e (4.14).

$$\boldsymbol{Consumo_{Elettricità}} = \frac{Consumo\left[{}^{kWh}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{5{,}3\left[{}^{kWh}/_{ton}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{4{,}8}\ {}^{\boldsymbol{kWh}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.13}$$

$$\boldsymbol{Consumo_{Acqua}} = \frac{Consumo\left[{}^{kg}/_{ton}\right]\cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{2{,}3\left[{}^{kg}/_{ton}\right]\cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{2.087}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.14}$$

Emulsione bituminosa

Le emissioni relative alla produzione di emulsione bituminosa sono state reperite da una versione meno recente dell'Eurobitume [44] e riportate in Fig. 4.3. Come per il caso del bitume, sono stati scelti i valori che tengono conto anche dei flussi dovuti alla costruzione dell'infrastruttura necessaria alla produzione, al trasporto e alla raffinazione del petrolio greggio.

Production of bitumen emulsion – 1 tonne of residual bitumen (process without infrastructure)	Unit	Bitumen	Emulsifier (production & transport)	HCl (production & transport)	Hot water (water & heating)	Emulsion milling	Total
Raw material							
Crude oil	kg	1 000	1,1				1 001,1
Consumption of energy resources							
Natural gas	kg	20,1	0,22	0,34	0,08	1,21	21,9
Crude oil	kg	40,9	1,4	0,4	1,8	0,4	44,9
Coal	kg	1,03	0,30	0,67	0,07	3,25	5,32
Uranium	kg	0,00006	0,00002	0,00004	0,00000	0,00023	0,0004
Consumption of non energy resources							
Water [1]	l	143	15	62	608	149	977
Emissions to air							
CO_2	g	174 244	4 602	3 985	5 459	15 455	203 746
SO_2	g	781	7,1	16	19	53	876
NO_x	g	770	20	10	8	27	835
CO	g	613	4,9	4,1	2,9	5,1	629
CH_4	g	595	6,0	7,7	3,7	28	640
Hydrocarbon	g	46,8	14,0	0,3	0,5	1,0	63
NMVOC	g	331	0,9	1,4	2,3	2,1	338
Particulates	g	161,2	3,0	4,2	1,9	15,2	185,5
Emissions to water							
Chemical Oxygen Demand	g	336	93	6	24	6,7	467
Biological Oxygen Demand	g	324	1,4	4,4	24	6,3	360
Suspended solids	g	30	2,1	7,9	1,9	22	64
Hydrocarbon	g	110	0,4	1,1	7,7	1,9	121
Phosphorous compounds	g	14,08	4,40	10,76	0,82	48,92	79,0
Nitrogen compounds	g	6,86	5,03	4,35	0,29	14,85	31,38
Sulphur compounds	g	348	127	320	21,5	1 213	2 029
Emissions to soil							
Hydrocarbon (oils)	g	116	0,2	1,2	8,1	2,0	127

1) Excluding water cooling and turbine use

Figura 3.3 - LCI per la produzione di 1 tonnellata di emulsione bituminosa [43]

Il Global Warming Potential (GWP) è stato ottenuto come la somma tra le emissioni di l'anidride carbonica e di metano. Considerando che 1 kg di CO_2 equivale a 25 kg di CH_4 , il valore finale è stato ottenuto come descritto in Eq. (4.15)

$$\boldsymbol{GWP} = \frac{CO_2[^g/_{ton}]+(25\cdot CH_4[^g/_{ton}])}{Conversione[^{short\ ton}/_{ton}]} = \frac{203.746\ [^g/_{ton}]+(25\cdot 640[^g/_{ton}])}{1{,}102\ [^{short\ ton}/_{ton}]} = \mathbf{199.406}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.15}$$

Le emissioni di CO, NO_X, SO_2 e PM_{10} sono state semplicemente convertite in grammo su tonnellata corta come riportato nelle Eq. (4.16), (4.17), (4.18) e (4.29) per poter essere inserite in PaLATE.

$$\boldsymbol{CO} = \frac{Emissione\ [^g/_{ton}]}{Conversione[^{short\ ton}/_{ton}]} = = \frac{629\ [g/ton]}{1{,}102\ [^{short\ ton}/_{ton}]} \approx \mathbf{571}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.16}$$

$$\boldsymbol{NO_X} = \frac{Emissione\ [^g/_{ton}]}{Conversione[^{short\ ton}/_{ton}]} = = \frac{835\ [g/ton]}{1{,}102\ [^{short\ ton}/_{ton}]} \approx \mathbf{758}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.17}$$

$$\boldsymbol{SO_2} = \frac{Emissione\ [^g/_{ton}]}{Conversione[^{short\ ton}/_{ton}]} = = \frac{876\ [g/ton]}{1{,}102\ [^{short\ ton}/_{ton}]} \approx \mathbf{795}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.18}$$

$$\boldsymbol{PM_{10}} = \frac{Emissione\ [^g/_{ton}]}{Conversione[^{short\ ton}/_{ton}]} = = \frac{185{,}5\ [g/ton]}{1{,}102\ [^{short\ ton}/_{ton}]} \approx \mathbf{168}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.19}$$

Il Gross Energy Requirement (GER) è stato ricavato come somma dei consumi energetici dovuti rispettivamente a 'Natural Gas', 'Crude Oil', 'Coal' ed 'Uranium' e successivamente

convertito in megajoule su tonnellata corta, come descritto nell' Eq. (4.24). Naturalmente, tutti i valori sono stati previamente moltiplicati per i rispettivi poteri caloriferi come riportato nelle Eq. (4.20), (4.21), (4.22) e (4.23).

$$Natural\ Gas = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 21{,}9\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 52{,}3\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 1.145\ {}^{MJ}/_{ton} \tag{4.20}$$

$$Crude\ Oil = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 44{,}9\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 44{,}5\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 1.998{,}05\ {}^{MJ}/_{ton} \tag{4.21}$$

$$Coal = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 5{,}32\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 18\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 95{,}76\ {}^{MJ}/_{ton} \tag{4.22}$$

$$Uranium = Emissione\ \left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Potere\ Calorifero\ \left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 0{,}0004\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 500.000\left[{}^{MJ}/_{kg}\right] = 200\ {}^{MJ}/_{ton} \tag{4.23}$$

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Natural\ Gas\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + Crude\ Oil\ \left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + Coal\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + Uranium\left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{1.145\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + 1.998{,}05\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + 95{,}76\left[{}^{MJ}/_{ton}\right] + 200\left[{}^{MJ}/_{ton}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{3.120}\ {}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.24}$$

Infine, il <u>Consumo di Acqua</u> è stato convertito in grammi su tonnellata corta come riportato nell'Eq. (4.25).

$$\boldsymbol{Consumo_{Acqua}} = \frac{Consumo\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} = \frac{977\left[{}^{kg}/_{ton}\right] \cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{ton}\right]} \approx \mathbf{904.719}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \tag{4.25}$$

Cemento

I dati di riferimento per il Life Cycle Inventory del cemento sono stati ricavati dalla relazione fornita dalla Portland Cement Association a cura di Marceau et al. [45] . Tali valori sono espressi in termini di emissioni generate per la produzione di una tonnellata corta di cemento.

Le quantità relative al Global Warming Potential (GWP) e alle emissioni di CO, NO_X, SO_2, PM_{10} e Hg, sono state definite sulla base dei valori riportati in Fig. 4.4.

Le calcolazioni e le conversioni necessarie affinché i valori potessero essere inseriti in PaLATE sono stato eseguite nelle Eq (4.26), (4.27), (4.28), (4.29), (4.30) e (4.31).

	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	0.0026	0.13	0.0891
Hg	1.10E-04	1.67E-04	5.38E-05	1.39E-04	1.25E-04
Dioxins and furans, TEQ	1.27E-10	7.37E-10	4.76E-12	1.34E-10	1.99E-10

Figura 3.4 - Emissioni generate dalla produzione di una tonnellata corta di cemento

$$\boldsymbol{GWP} = \left\{CO_2\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] + \left(25 \cdot CH_4\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right]\right)\right\} \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \left\{1.850\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] + \left(25 \cdot 0{,}0791\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right]\right)\right\} \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \mathbf{840.798}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \quad (4.26)$$

$$\boldsymbol{CO} = Emissione\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 2{,}21\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \mathbf{1.003}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \quad (4.27)$$

$$\boldsymbol{NO_X} = Emissione\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 5{,}01\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \mathbf{2.275}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \quad (4.28)$$

$$\boldsymbol{SO_2} = Emissione\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 3{,}32\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \mathbf{1.507}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \quad (4.29)$$

$$\boldsymbol{PM_{10}} = Emissione\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 0{,}593\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \mathbf{269}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}} \quad (4.30)$$

$$\boldsymbol{Hg} = Emissione\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 1{,}25 \cdot 10^{-4}\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \boldsymbol{0{,}06\ {}^{g}/_{short\ ton}}$$

(4.31)

Il valore di Gross Energy Requirement (GER) consumato per la produzione di una tonnellata metrica di cemento è stato riportato in Eq. (4.32)

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Emissione\left[{}^{GJ}/_{Mg}\right] \cdot Conversione\left[{}^{MJ}/_{GJ}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \frac{0{,}0046\left[{}^{GJ}/_{Mg}\right] \cdot 1.000\left[{}^{MJ}/_{GJ}\right]}{1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \boldsymbol{4\ {}^{MJ}/_{short\ ton}}$$

(4.32)

In maniera analoga a come effettuato per i calcoli precedenti, sono stati ricavati i valori relativi al consumo di elettricità (per il quale non è stata necessaria alcuna conversione) e al consumo di acqua. Le formulazioni sono state riportate nelle Eq. (4.33) e (4.34).

$$\boldsymbol{Consumo_{Elettricità} = 131\ {}^{kWh}/_{short\ ton}} \quad (4.33)$$

$$\boldsymbol{Consumo_{Acqua}} = Consumo\left[{}^{lb}/_{ton}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{lb}\right] = 1.682\left[{}^{lb}/_{short\ ton}\right] \cdot 454\left[{}^{g}/_{lb}\right] = \boldsymbol{763.628\ {}^{g}/_{short\ ton}}$$

(4.34)

Fornitura d'Acqua

I dati relativi alle emissioni prodotte durante i processi di fornitura d'acqua, riportati in Fig.4.5 sono stati ricavati dall'articolo Stokes & Horvath [46] , facendo riferimento ai valori di 'imported water' (IMP) poiché relativi ai processi di distribuzione.

All'interno delle Eq. (4.35), (4.36), (4.37) e (4.38) sono state riportate le conversioni effettuate affinché i dati potessero essere inseriti all'interno di PaLATE.

water source	energy (MJ/m³)	GHG (g CO_2 equiv/m³)	NO_x (g/m³)	PM (g/m³)	SO_x (g/m³)
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

Figura 3.5 - LCI per la fornitura d'acqua

$$\boldsymbol{GWP} = \frac{Emissione\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{Conversione\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right] \cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \frac{1.093\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{1\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right] \cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \boldsymbol{992\ {}^{g}/_{short\ ton}}$$

(4.35)

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Emissione\left[{}^{MJ}/_{m^3}\right]}{Conversione\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \frac{18\left[{}^{MJ}/_{m^3}\right]}{1\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \mathbf{16{,}3\ {}^{MJ}/_{short\ ton}} \tag{4.36}$$

$$\boldsymbol{NO_X} = \frac{Emissione\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{Conversione\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \frac{1{,}9\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{1\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \mathbf{1{,}72\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.37}$$

$$\boldsymbol{SO_2} = \frac{Emissione\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{Conversione\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \frac{2{,}9\left[{}^{g}/_{m^3}\right]}{1\left[{}^{Mg}/_{m^3}\right]\cdot 1{,}102\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} = \mathbf{2{,}63\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.38}$$

<u>Produzione del Diesel</u>

La maggior parte dei i dati ricavati per il Life Cycle Inventory del diesel sono stati forniti dal database europeo Ecoinvent 2.2, il quale tiene conto delle emissioni prodotte nella fase di produzione di 1 chilogrammo di diesel.

Nelle Eq. (4.39), (4.40), (4.41), (4.42), (4.43), (4.44), (4.45) e (4.46) sono state riportate le conversioni necessarie affinché i valori trovati potessero essere inseriti all'interno di PaLATE.

$$\boldsymbol{GWP} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]\cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}599\left[{}^{kg}/_{kg}\right]\cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{543.404\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.39}$$

$$\boldsymbol{GER} = \frac{Emissione\left[{}^{MJ}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{55\left[{}^{MJ}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{49.895\ {}^{MJ}/_{short\ ton}} \tag{4.40}$$

$$\boldsymbol{CO} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}7655\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{694\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.41}$$

$$\boldsymbol{NO_X} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{2{,}266\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{2.056\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.42}$$

$$\boldsymbol{SO_2} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{3{,}034\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{2.752\ {}^{g}/_{short\ ton}} \tag{4.43}$$

$$\boldsymbol{PM_{10}} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{0{,}053\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot 10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{48\ {}^{g}/_{short\ ton}}$$

(4.44)

$$\boldsymbol{Hg} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{(4{,}99\cdot10^{-5})\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{0{,}045}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}$$

(4.45)

$$\boldsymbol{Pb} = \frac{Emissione\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \frac{(1{,}89\cdot10^{-3})\left[{}^{kg}/_{kg}\right]}{(1{,}102\cdot10^{-3})\left[{}^{short\ ton}/_{kg}\right]} = \mathbf{2}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}$$

(4.46)

Infine, dall'articolo Sun et al. [47]. è stato ricavato il consumo di acqua dovuto alla produzione di un gallone di diesel. Naturalmente anche questo valore è stato convertito nell'Eq.(4.47) per garantire la coerenza con il software.

$$\boldsymbol{Consumo_{Acqua}}$$
$$= \frac{Emissione\ \left[{}^{gal_W}/_{gal_G}\right] \cdot Conversione\ \left[{}^{l}/_{gal_W}\right] \cdot Conversione\left[{}^{kg}/_{l}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{Densità_{Diesel}\ \left[{}^{lb}/_{gal_G}\right] \cdot Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{lb}\right]}$$
$$= \frac{0{,}3\ \left[{}^{gal_W}/_{gal_G}\right] \cdot 3{,}785\ \left[{}^{l}/_{gal_W}\right] \cdot 1\left[{}^{kg}/_{l}\right] \cdot 1.000\left[{}^{g}/_{kg}\right]}{6{,}943\ \left[{}^{lb}/_{gal_G}\right] \cdot 0{,}0005\left[{}^{short\ ton}/_{lb}\right]} = \mathbf{327.092{,}04}\ {}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}$$

(4.47)

3.3 Scelta della Strada di Progetto

Il tipo di strada che si è scelto di analizzare (Fig. 4.6) è una strada secondaria dell'A32 Torino-Bardonecchia che permette di rimanere in linea con quanto riportato nella tesi di Stirparo [1]. Infatti, la definizione di miscele innovative ad elevato contenuto di materiale riciclato, è nato dalla necessità di un'impresa locale di pavimentare le strade di servizio in modo tale da fornire un accesso sicuro ai punti d'interesse dell'infrastruttura (come, ad esempio, le pile dei viadotti). L'utilizzo di queste miscele per la pavimentazione sarà oggetto del primo caso studio.

Figura 3.6 - Strada secondaria dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia [48]

La strada scelta, riportata nelle Fig. 4.7 presenta unità funzionale pari ad 1 km di lunghezza e larghezza media pari a 4,5 m.

Figura 3.7 - Tracciato strada di servizio dell'A32 Torino-Bardonecchia [49]

Per quanto riguarda la stratigrafia della pavimentazione, descritta in Fig. 4.8, è stata mantenuta quella di progetto definita all'interno della tesi di Stirparo [1] per il campo prove, in modo da garantire una certa continuità nella trattazione. Lo spessore della fondazione è stato posto pari a 20 cm.

Figura 3.8 - Stratigrafia di progetto della strada di servizio [1]

3.4 Caso Studio 1: Mix 4 - S

Lo scopo di questo caso studio è stato quello di analizzare gli impatti ambientali, provenienti dall'utilizzo di una miscela innovativa ad alto contenuto di materiale riciclato.

Il set di miscele innovative definite all'interno della tesi di Antonio Stirparo [1] riportate in Tabella 4.1 sono tre e presentano, in percentuale variabile, fresato bituminoso, sludge e sabbia miscelati a freddo con acqua ed emulsione bituminosa. Ai fini di questo elaborato di tesi è stata presa in considerazione la miscela che ha riportato le migliori caratteristiche prestazionali, ossia la Mix 4-S.

Tabella 3.1- Dosaggi relativi di RAP, Sludge e Sabbia nelle miscele

Miscele	RAP	Sludge	Sabbia	Acqua	Emulsione
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Mix 4-S	75	18	7	13,5	4
Mix 3-S	70	21	9	16	4
Mix 2-S	65	25	10	13,5	4

l processo di produzione della miscela prevede l'utilizzo di svariati macchinari come riportata lo schema in Fig. 4.9 . È previsto un mulino per la frantumazione del RAP, autocarri e cisterne per il trasporto dei materiali, una pala caricatrice ed un blender nella fase di produzione della miscela ed infine, una vibrofinitrice e un rullo gommato nella fase di stesa e compattazione.

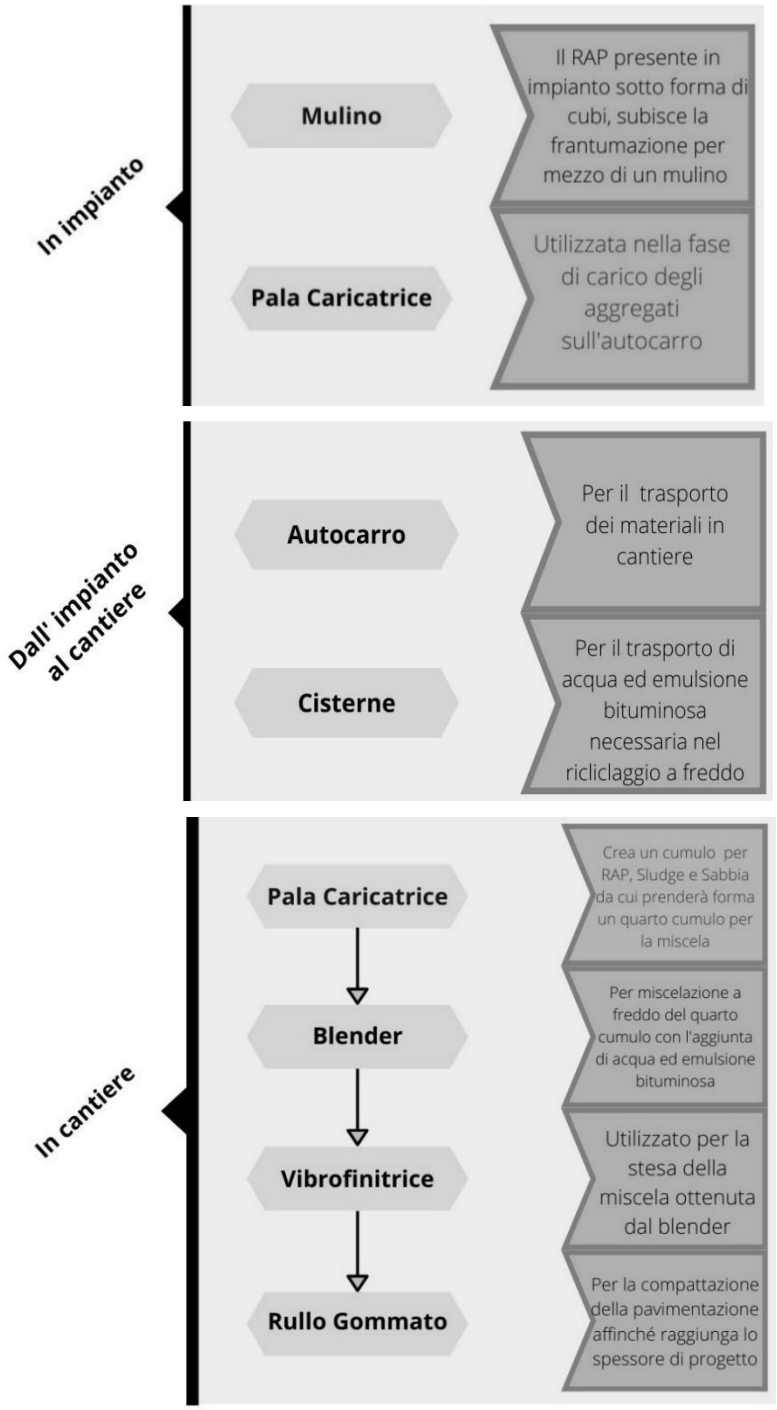


Figura 3.9 - Macchinari utilizzati nel processo di produzione della miscela Mix 4-S e della costruzione stradale

La miscela così ottenuta è stata inserita all'interno di PaLATE e ne sono stati analizzati gli impatti ambientali mediante lo studio dei risultati forniti dal software.

3.4.1 Valutazione d'impatto

In questo paragrafo, sono stati elencati i processi necessari alla definizione dei dati di input richiesti dal software ai fini di uno studio di LCA. Per ogni foglio di lavoro, sono state di seguito esplicitate le scelte progettuali e le approssimazioni che sono state effettuate.

Design

In questo foglio di lavoro sono state messe in pratica le conversioni necessarie alla descrizione della stratigrafia della strada e le operazioni sono state riportate nelle Eq. (4.48), (4.49), (4.50) e (4.51).

$$Larghezza = \frac{Larghezza\ [m]}{Conversione\ \left[{}^{m}/_{ft}\right]} = \frac{4{,}5\ [m]}{0.305\ \left[{}^{m}/_{ft}\right]} = 14{,}75\ ft \tag{4.48}$$

$$Lunghezza = \frac{Lunghezza\ [km]}{Conversione\ \left[{}^{km}/_{mi}\right]} = \frac{1\ [km]}{1{,}609\ \left[{}^{km}/_{mi}\right]} = 0{,}62\ mi \tag{4.49}$$

$$Profondità_{Usura} = \frac{Profondità\ [m]}{Conversione\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = \frac{0{,}1\ [m]}{0{,}025\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = 4\ inches \tag{4.50}$$

$$Profondità_{Base} = \frac{Profondità\ [m]}{Conversione\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = \frac{0{,}2\ [m]}{0{,}025\ \left[{}^{m}/_{in}\right]} = 8\ inches \tag{4.51}$$

Nella Tabella 4.2 sono state riportate le caratteristiche geometriche della strada così come sono mostrate all'interno dell'applicativo, mantenendone quindi la formattazione originale.

Tabella 3.2 - Caratteristiche geometriche della strada di servizio

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Usura	14,75	0,62	4	598
Wearing Course 2				0
Wearing Course 3				0
Fondazione	14,75	0,62	8	1.195
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			**12**	1.793

Il volume finale di ogni strato è stato ottenuto mediante le operazioni riportate in Eq. (4.52) e (4.53). Il volume totale è stato ricavato sommando i singoli volumi come riportato in Eq. (4.54).

$$\boldsymbol{Volume_{Usura}} = \left\{\text{Larghezza } [ft] \cdot \left(\text{Lunghezza } [mi] \cdot \text{Conversione}\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(\text{Profondità } [in] \cdot Conversione\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot Conversione\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \left\{14{,}75[ft] \cdot \left(0{,}62[mi] \cdot 5.280\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(4[in] \cdot \tfrac{1}{12}\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot \tfrac{1}{27}\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \mathbf{598\ yd^3}$$

(4.52)

$$\boldsymbol{Volume_{Fondazione}} = \left\{\text{Larghezza } [ft] \cdot \left(\text{Lunghezza } [mi] \cdot \text{Conversione}\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(\text{Profondità } [in] \cdot Conversione\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot Conversione\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \left\{14{,}75[ft] \cdot \left(0{,}62[mi] \cdot 5.280\left[{}^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(8[in] \cdot \tfrac{1}{12}\left[{}^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot \tfrac{1}{27}\left[{}^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \mathbf{1.195\ yd^3}$$

(4.53)

$$\boldsymbol{Volume\ Totale} = Volume_{Usura} + Volume_{Fondazione} = 588\ [yd^3] + 1.177[yd^3] = \mathbf{1.793\ yd^3}$$

(4.54)

Initial Construction

I valori di input necessari all'interno del foglio di lavoro 'Initial Construction' sono le caratteristiche volumetriche e le distanze di trasporto relativi alla miscela e ai materiali che la compongono.

Per quanto concerne le *caratteristiche volumetriche*, basandosi sui dati forniti dall'Allegato III presente all'interno della tesi di Stirparo [1], sono state ricavate le masse volumiche (MV) delle tre miscele in esame come riportato in Tabella 4.3.

Tabella 3.3 - Massa volumica delle miscele innovative

Miscele	MV	
	[kg/m3]	[short ton/yd3]
Mix 4-S	2130,0	1,79
Mix 3-S	2133,3	1,80
Mix 2-S	2136,7	1,80

Data la necessità di definire le densità e i volumi dei materiali che costituiscono la miscela, di seguito sono stati riportati le calcolazioni effettuate per il Mix 4-S.

La quantità di miscela ($Q_{Mix4\text{-}S}$) necessaria per pavimentare lo strato di usura si ottiene come descritto in Eq. (4.55)

$$\boldsymbol{Q_{Mix\,4-S}} = MV_{Mix\,4-S}\left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Volume_{Usura}[yd^3] = 1{,}79\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot 598[yd^3] = \boldsymbol{1.073\ short\ ton}$$

(4.55)

Per computare le quantità dei singoli materiali che caratterizzano la miscela, è stato necessario scorporare dalla massa volumica totale, il contributo del bitume fornito dalla rottura dell' emulsione (%P_E) in fase di miscelazione. Considerando che l'emulsione bituminosa è caratterizzata per il 53% di acqua (%P_A) e per il 47% di bitume(%P_B), la quantità di miscela ($Q^{Agg}_{Mix\,4-S}$) composta unicamente da aggregato è stata riportata nell'Eq.(4.56).

$$\boldsymbol{Q^{Agg}_{Mix\,4-S}} = \frac{Q_{Mix\,4-S}[short\ ton]}{1 + (\%P_B \cdot \%P_E)} = \frac{1.073\ [short\ ton]}{1 + \left(\frac{47}{100} \cdot \frac{4}{100}\right)} = \boldsymbol{1.053\ short\ ton}$$

(4.56)

Note le masse volumiche apparenti (MVA) e le percentuali dei singoli materiali che compongono la miscela (riportate rispettivamente in Tabella 4.4 e 4.5), sono state calcolate le quantità di RAP (Q_{RAP}), sludge (Q_{SL}) e sabbia (Q_{SA}) come descritto nelle Eq. (4.57), (4.58) e (4.59).

Tabella 3.4 - MVA di RAP, Sludge e Sabbia

Materiali	MVA	
	[kg/m3]	[short ton/yd3]
RAP	2.562	2,16
Sludge	2.819	2,37
Sabbia	2.757	2,32

Tabella 3.5 - Percentuali di RAP, Sludge e Sabbia

Miscele	RAP	Sludge	Sabbia
	[%]	[%]	[%]
Mix 4-S	75	18	7

$$\boldsymbol{Q_{RAP}} = \%RAP\ \cdot Q^{Agg}_{Mix\,4-S}\ [short\ ton] = {75}/{100}\,[\%] \cdot\ 1.053\ [short\ ton] = \boldsymbol{790\ short\ ton}$$

(4.57)

$$\boldsymbol{Q_{SL}} = \%SL\ \cdot Q^{Agg}_{Mix\,4-S}\ [short\ ton] = {18}/{100}\ [\%] \cdot\ 1.053\ [short\ ton] = \boldsymbol{190\ short\ ton}$$

(4.58)

$$\boldsymbol{Q_{SA}} = \%SA\ \cdot Q^{Agg}_{Mix\,4-S}\ [short\ ton] = {7}/{100}\ [\%] \cdot\ 1.053\ [short\ ton] = \boldsymbol{74\ short\ ton}$$

(4.59)

Mentre, i volumi dei singoli materiali (V_{RAP}, V_{SL} e V_{SA}), sono stati definiti come il rapporto tra la quantità di ogni materiale e la sua massa volumica apparente, come riportato nelle Eq. (4.60), (4.61) e (4.62).

$$\boldsymbol{V_{RAP}} = \frac{Q_{RAP}\ [short\ ton]}{MVA_{RAP}\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \frac{790\ [short\ ton]}{2{,}16\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \boldsymbol{366\ yd^3} \tag{4.60}$$

$$\boldsymbol{V_{SL}} = \frac{Q_{RAP}\ [short\ ton]}{MVA_{RAP}\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \frac{190\ [short\ ton]}{2{,}37\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \boldsymbol{80\ yd^3} \tag{4.61}$$

$$\boldsymbol{V_{SA}} = \frac{Q_{RAP}\ [short\ ton]}{MVA_{RAP}\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \frac{74\ [short\ ton]}{2{,}37\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \boldsymbol{32\ yd^3} \tag{4.62}$$

Infine, il volume totale dell'aggregato presente nella miscela($V_{Mix\ 4\text{-}S}$) , è stato definito come la somma dei volumi dei singoli materiali come riportato in Eq. (4.63).

$$\boldsymbol{V_{Mix\ 4-S}} = V_{RAP}[yd^3] + V_{SL}[yd^3] + V_{SA}[yd^3] = 366\ [yd^3] + 80\ [yd^3] + 32\ [yd^3] = \boldsymbol{477}\ [\boldsymbol{yd^3}] \tag{4.63}$$

Per quanto riguarda le percentuali di acqua ed emulsione definite in fase di progettazione della miscela, sono state nuovamente riportate in Tab. 4.6 .

Tabella 3.6- Percentuali di acqua ed emulsione sul peso di aggregato

Miscele	Acqua	Emulsione
	[%]	[%]
Mix 4-S	13,5	4

La quantità (Q_E) e il volume (V_E) di emulsione necessaria per la pavimentazione dello strato di usura, sono stati definiti come già visto anche per gli altri materiali. Considerando che la massa volumica dell'emulsione (MV_E) è pari a 0,84 short ton/yd^3 (1000 kg/m^3), i passaggi numerici sono stati riportati nelle Eq. (4.64) e (4.65).

$$\boldsymbol{Q_E} = \%P_E \cdot Q^{Agg}_{Mix\ 4-S}\ [short\ ton] = {4}/{100}\ [\%] \cdot\ 1053\ [short\ ton] = \boldsymbol{42\ short\ ton} \tag{4.64}$$

$$\boldsymbol{V_E} = \frac{Q_E\ [short\ ton]}{MV_E\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \frac{42\ [short\ ton]}{0{,}84\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \boldsymbol{50\ yd^3} \tag{4.65}$$

Per quanto riguarda la definizione del volume di acqua necessario, è stato inizialmente computato il quantitativo di acqua fornito dagli aggregati umidi ($Q_{RAP,A}$, $Q_{SL,A}$ e $Q_{SA,A}$) utilizzati all'interno della miscela, i cui valori di umidità sono stati riportati in Tab.4.7. Una volta definite le quantità riportate nelle Eq. (4.66), (4.67) e (4.68), considerando la densità dell'acqua (γ_A) pari a 0,84 short ton/yd^3 (1000 kg/m^3) sono stati ricavati i rispettivi valori volumetrici ($V_{RAP,A}$, $V_{SL,A}$ e $V_{SA,A}$) come riportato nelle Eq. (4.69), (4.70) e (4.71).

Tabella 3.7 – Umidità per ogni frazione determinata in laboratorio

	Frazioni Umide
Materiali	[%]
$\%P_{RAP}$	2,5
$\%P_{SL}$	24
$\%P_{SA}$	6

$$\boldsymbol{Q_{RAP,A}} = \%P_{RAP} \cdot Q_{RAP}\,[short\ ton] = {}^{2,5}/_{100}\,[\%] \cdot\ 790\,[short\ ton] = \mathbf{20\ short\ ton} \tag{4.66}$$

$$\boldsymbol{Q_{SL,A}} = \%P_{SL} \cdot Q_{SL}\,[short\ ton] = {}^{24}/_{100}\,[\%] \cdot\ 190\,[short\ ton] = \mathbf{45\ short\ ton} \tag{4.67}$$

$$\boldsymbol{Q_{SA,A}} = \%P_{SA} \cdot Q_{SA}\,[short\ ton] = {}^{6}/_{100}\,[\%] \cdot 74\,[short\ ton] = \mathbf{4\ short\ ton} \tag{4.68}$$

$$\boldsymbol{V_{RAP,A}} = \frac{Q_{RAP,A}\,[short\ ton]}{\gamma_A\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \frac{20\,[short\ ton]}{0{,}84\,\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \mathbf{23\ yd^3} \tag{4.69}$$

$$\boldsymbol{V_{SL,A}} = \frac{Q_{SL,A}\,[short\ ton]}{\gamma_A\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \frac{45\,[short\ ton]}{0{,}84\,\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \mathbf{54\ yd^3} \tag{4.70}$$

$$\boldsymbol{V_{SA,A}} = \frac{Q_{SA,A}\,[short\ ton]}{\gamma_A\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \frac{4\,[short\ ton]}{0{,}84\,\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \mathbf{5\ yd^3} \tag{4.71}$$

Il volume di acqua totale dovuto all'umidità degli aggregati è stato riportato in Eq.(4.72)

$$\boldsymbol{V_A^{Agg}} = V_{RAP,A}\,[yd^3] + V_{SL,A}\,[yd^3] + V_{SA,A}\,[yd^3] = 23\,[yd^3] + 54\,[yd^3] + 5\,[yd^3] = \mathbf{83\ yd^3} \tag{4.72}$$

Considerando la percentuale di acqua ottimale (%P_A) definita in laboratorio e la densità dell'acqua (γ_A), mediante le Eq (4.73) e (4.74) sono state definite la quantità (Q_A) e il volume (V_A) di acqua di progetto.

$$\boldsymbol{Q_A} = \%P_A \cdot Q_{Mix\,4-S}^{Agg}\,[short\ ton] = {}^{13,5}/_{100}\,[\%] \cdot\ 1053\,[short\ ton] = \mathbf{142\ short\ ton} \tag{4.73}$$

$$\boldsymbol{V_A} = \frac{Q_A\,[short\ ton]}{\gamma_A\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \frac{142\,[short\ ton]}{0{,}84\ \left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]} = \mathbf{169\ yd^3} \tag{4.74}$$

A questo valore è stato necessario decurtare il volume di acqua proveniente dagli aggregati umidi utilizzati nella miscela, ossia il valore riportato in Eq.(4.75). In questo modo, è stato ottenuto il volume di acqua effettivo ($V_{A,eff}$) necessario per il processo di pavimentazione riportato in Eq.(4.75).

$$\boldsymbol{V_{A,eff}} = \boldsymbol{V_A}[yd^3]\ -\ \boldsymbol{V_A^{Agg}}[yd^3] =\ \mathbf{169}\ [\boldsymbol{yd^3}] -\ \mathbf{83}\ [\boldsymbol{yd^3}] = \mathbf{86\ yd^3} \tag{4.75}$$

Infine, è stato definito il volume del misto granulare non legato necessario per pavimentare lo strato di fondazione. Note le masse volumiche degli aggregati riportate in Tab 4.8 .

Tabella 3.8 -Masse volumiche del misto granulare non legato

$MV_{Agg.}$		$MV_{Agg,compattato}$	
[kg/m3]	**[short ton/yd3]**	**[kg/m3]**	**[short ton/yd3]**
2.700,00	2,27	2.170,00	1,83

La percentuale di vuoti (v) e la percentuale di inerti in volume (%$V_{Agg.}$) sono stati calcolati come riportato in Eq.(4.76) e (4.77).

$$\boldsymbol{v} = \left(1 - \frac{MV_{Agg,compattato}\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{MV_{Agg.}\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{2170\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{2700\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \mathbf{19{,}63}\ \% \tag{4.76}$$

$$\%\boldsymbol{V_{Agg.}} = 100[\%] - v[\%] = 100[\%] - 19{,}63[\%] = \mathbf{80{,}37}\ \% \tag{4.77}$$

Il volume totale di aggregati ($V_{Agg.}$) necessari è stato definito come riportato in Eq.(4.78)

$$\boldsymbol{V_{Agg.}} =\ V_{Fondazione}[yd^3] \cdot \left(\frac{\%V_{Agg.}}{100}\right) = 1.194{,}46[yd^3] \cdot \left(\frac{80{,}37[\%]}{100}\right) = \mathbf{960{,}8\ yd^3} \tag{4.78}$$

Un altro parametro di input da inserire all'interno del foglio 'Intial Construction' è la *distanza di trasporto* dei singoli materiali riportate in Tab. 4.9.

Tabella 3.9 - Distanze di trasporto relative ai singoli materiali

	Distanze di Trasporto	
Materiali	**[km]**	**[mi]**
RAP	43,8	27,22
Sludge	43,8	27,22
Sabbia	58,3	36,23
Acqua	43,8	27,22
Emulsione	415,8	258,42

Considerando l'impianto Sitalfa S.P.A. sito a Salbertrand (TO) come impianto di riferimento, le distanze di trasporto sono state definite come riportato di seguito.

RAP, sludge e acqua sono stati supposti presenti in impianto pronti per l'utilizzo, quindi la distanza di trasporto è stata considerata pari al tratto tra l'impianto e il cantiere, come riportato in Fig.4.10.

Figura 3.10 - Distanza di trasporto impianto – cantiere

Per i materiali restanti, oltre alla distanza impianto-cantiere è stata considerata anche la distanza dal punto di produzione all'impianto. Nello specifico per la:

- *sabbia*, è stato considerato il tratto dalla cava Mollieres di Cesana all'impianto, pari a 14,5 km (9,01 mi);
- *emulsione*, è stato considerato il tratto dal sito di costruzione, l'azienda Bitem S.r.l, all'impianto il quale è pari a 372 km (231,2 mi).

Il computo finale in termini di distanza percorsa per entrambi i materiali, sono stati riportarti rispettivamente nelle Eq.(4.79) e (4.80).

$$\boldsymbol{Distanza_{Sabbia}} = Distanza_{Mollieres-Sitalfa}[mi] + Distanza_{Sitalfa-Cantiere}[mi] = 9{,}01[mi] + 27{,}22[mi] = \boldsymbol{36{,}23\ mi}$$

(4.79)

$$\boldsymbol{Distanza_{Emulsione}} = Distanza_{Bitem-Sitalfa}[mi] + Distanza_{Sitalfa-Cantiere}[mi] = 231{,}2[mi] + 27{,}22[mi] = \boldsymbol{258{,}42\ mi}$$

(4.80)

Equipment

L'inventario dei macchinari (riportato in Tab.4.10) è stato effettuato tenendo conto sia del database fornito da PaLATE presente nel foglio 'Eqpmnt Details' , sia dei dati forniti in letteratura.

Nello specifico, fatta eccezione per il rullo gommato, i macchinari che è stato necessario reperire in letteratura perché non presenti nel database, sono stati il:

- **Mulino**, dove i valori relativi alla capacità del motore e alla produttività sono stati forniti dal sito delle DM Industries [50], mentre i valori relativi al consumo di carburante sono stati ricavati dall'articolo di Borghi et al [51];
- **Blender,** dove tutti i valori sono stati reperiti sul sito della Blend [52];
- **Pala caricatrice** e **Vibrofinitrice**, le cui caratteristiche sono state gentilmente fornite da Sitalfa S.p.A.
- **Grader,** i cui valori sono stati ricavati dall'articolo Celauro et al. [53].

Tabella 3.10 - Inventario macchinari

Macchinari	Marca	Capacità Motore	Produttività	Consumo Carburante
		[hp]	[short ton/h]	[l/h]
Mulino (RAP)	Dynamic Machines	124,7	551	125
Pala Caricatrice	Case 821G	230	200	19
Blender	Blend	50	164	0,2
Vibrofinitrice	Vogele	174	600	25
Rullo Gommato	Dynapac CP134	100	884	25,1
Grader	CAT 12M2	176	6125	40

Per i processi di trasporto sono state utilizzati autocarri e cisterne le cui caratteristiche, anche in questo caso, sono state fornite da Sitalfa S.p.A. e riportate in Tab. 4.11.

Tabella 3.11 - Inventario mezzi di trasporto

Macchinari	Tipo	Capacità	Efficienza Carburante
		[short ton]	[l/km]
Autocarro	**4 assi IVECO**	25	0,333
Cisterna	**3 assi MAN**	20	0,20

Environmental Results

Per i tutti i materiali utilizzati nella realizzazione dello strato stradale, ossia RAP, sludge sabbia, acqua ed emulsione bituminosa, sono state esplicitate le formulazioni necessarie alla definizione dei risultati ambientali. Nello specifico, seguendo la stessa struttura utilizzata all'interno del capitolo 2, per ogni inquinante a seconda del processo in atto, è stata riportata l'equazione correlata.

Sebbene la struttura di base delle equazioni sia stata mantenuta per quasi tutti i materiali, in alcuni casi è stato necessario effettuare delle modifiche per tener conto dei processi di realizzazione della pavimentazione prima citati.

Gross Energy Requirement (GER) [MJ]

Nella fase di *Material Production*, le formulazioni variano a seconda del tipo di materiale preso in considerazione.

Per **sabbia, acqua** ed **emulsione**, l'equazione generica è riportata in Eq.(4.81).

$$\boldsymbol{Material\ Production = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Consumo\ Energetico\ \left[{MJ}/{short\ ton}\right]} \tag{4.81}$$

Nella produzione del fresato è necessario tener conto dell'energia consumata nella frantumazione dei blocchi ad opera del mulino, per questo motivo nell' Eq (4.82), sono state prese in considerazione le caratteristiche del macchinario.

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino} = \left\{\frac{Vol\ [yd^3] \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]}{Produttività\ \left[{short\ ton}/{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\ \left[{l}/{h}\right] \cdot Conversione\ \left[{J}/{l}\right]\right\}_{Mulino} \cdot Conversione\ \left[{MJ}/{J}\right]} \tag{4.82}$$

Il consumo di energia associato alla produzione di **sludge** è stato posto uguale a zero in quanto è un prodotto presente in impianto già pronto per l'utilizzo.

Infine, per quanto riguarda la produzione del **CMA**, la formulazione è stata riportata in Eq.(83)

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante} \left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{J}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante} \left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{J}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{\boldsymbol{Blender}} \right\} \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{J}}\right]$$

(4.83)

Nella fase di *Material Transportation*, l'equazione per il trasporto di **acqua** ed **emulsione** è riportata in Eq.(4.84)

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Capacit}\grave{\boldsymbol{a}}\,[\boldsymbol{Mg}]} \cdot \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{Mg}}\right]} \cdot \boldsymbol{Distanza}\,[\boldsymbol{mi}] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{km}}/_{\boldsymbol{mi}}\right] \cdot \boldsymbol{Efficienza\ Carburante} \left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{km}}\right] \cdot \boldsymbol{Energia} \left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{\boldsymbol{Cisterna}}$$

(4.84)

Per gli aggregati è stata prevista l'aggiunta di una pala caricatrice per tener conto dei consumi dovuti ai processi di carico sull'autocarro. La relativa formulazione è stata riportata in Eq.(4.85).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante} \left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{J}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{J}}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Capacit}\grave{\boldsymbol{a}}\,[\boldsymbol{Mg}]} \cdot \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{Mg}}\right]} \cdot \boldsymbol{Distanza}\,[\boldsymbol{mi}] \cdot \boldsymbol{Conversione} \left[{}^{\boldsymbol{km}}/_{\boldsymbol{mi}}\right] \cdot \boldsymbol{Efficienza\ Carburante} \left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{km}}\right] \cdot \boldsymbol{Energia} \left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{\boldsymbol{Autocarro}}$$

(4.85)

Il valore relativo al trasporto della miscela (**CMA**) è stato posto uguale a zero in quanto la miscelazione è stata effettuata direttamente in cantiere.

Nella fase di Processes (Equipment), è stato analizzato il consumo energetico dovuto alla stesa e alla compattazione dello strato di usura, la cui formulazione generale è riportata in Eq. (4.86).

$$\textbf{Process} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Contenuto\ Calore}\left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Contenuto\ Calore}\left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \right)_{Rullo\ Gommato} \right\} \cdot \boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{MJ}}/_{\boldsymbol{J}}\right]$$

(4.86)

<u>Global Warming Potential (GWP) [kg]</u>

Nella fase di *<u>Material Production</u>*, come già osservato per il consumo energetico, le emissioni di CO_{2eq}. associate alla produzione di **sabbia, acqua** ed **emulsione** sono state riportate in forma letterale nell' Eq.(4.87).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densit}\grave{\textbf{a}}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{kg}}/_{\textbf{g}}\right]$$

(4.87)

Nella lavorazione del fresato è necessario tener conto delle emissioni prodotte dal mulino durante la frantumazione come riportato nell' Eq. (4.88).

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{ \frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\ \boldsymbol{Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissioni\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{g}}\right] \cdot \frac{1}{\boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{kg}}\right]} \right\}_{\boldsymbol{Mulino}} \cdot \boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{kg}}/_{\boldsymbol{g}}\right]$$

(4.88)

Dato che lo **sludge** è presente in impianto già pronto per l'utilizzo, senza la necessità di successive lavorazioni, non vi è stata associata alcuna emissione nella fase di produzione.

Infine, le emissioni dovute alla produzione della miscela (CMA) sono state riportate in Eq. (4.89).

$$CMA = \left\{ \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{g}\right] \right)_{Pala\ Caricatrice} + \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{g}\right] \right)_{Blender} \right\} \cdot Conversione\left[{}^{kg}/_{g}\right] \quad (4.89)$$

Nella fase di *Material Transportation,* le emissioni di $CO_{2eq.}$ dovute al trasporto di **acqua** ed **emulsione** sono state computate come riportato nell'Eq.(4.90).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Carburante Motori Diesel}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \right)_{Cisterna} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{kg}}\right]} \quad (4.90)$$

Le formulazioni relative agli aggregati sono state modificate in modo tale da considerare anche il contributo dovuto alle operazioni di carico sugli autocarri per mezzo di una pala caricatrice, come descritto in Eq.(4.91)

$$\textbf{Material Transportation} = \left\{ \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{l}\right] \cdot Conversione\left[{}^{g}/_{g}\right] \right)_{Pala\ Caricatrice} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \cdot \textbf{Carburante Motori Diesel}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \right)_{Autocarro} \right\} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{kg}}\right]} \quad (4.91)$$

Nella fase di *Processes (Equipment)*, è stata analizzata l'emissione dovuta alla stesa e alla compattazione dello strato di usura, la cui formulazione generale è riportata in Eq. (4.92).

$$\textbf{Process} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{ston}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{ston}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\ \boldsymbol{Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissioni\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{g}}\right] \cdot \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{kg}}\right]} \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{ston}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{ston}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\ \boldsymbol{Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissioni\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{g}}\right] \cdot \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{kg}}\right]} \right)_{Rullo\ Gommato} \tag{4.92}$$

<u>Consumo di Acqua [kg]</u>

Nella fase di *<u>Material Production</u>*, soltanto la **sabbia** e l'**emulsione** presentano un effettivo consumo di acqua associata alla produzione in impianto ed è riportata in Eq. (4.93).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^{\mathbf{3}}] \cdot \textbf{Densit}\grave{\textbf{a}}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{yd}^{\mathbf{3}}}\right] \cdot \textbf{Consumo Acqua}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{ston}}\right] \tag{4.93}$$

Il consumo di acqua rispettivamente per **RAP**, **sludge**, **acqua** è stato posto pari a zero in quanto non è necessario nessun consumo di acqua per la loro produzione.

Il valore relativo al **CMA** è stato calcolato tenendo conto del consumo di acqua relativo alla produzione del diesel come riportato in Eq.(4.94).

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Consumo}_{\boldsymbol{Acqua}}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Consumo}_{\boldsymbol{Acqua}}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \right)_{\boldsymbol{Blender}} \right\} \cdot \boldsymbol{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{g}}\right] + \boldsymbol{Consumo}_{\boldsymbol{Acqua\ nella\ miscela}} \tag{4.94}$$

Nella fase di *<u>Material Transportation</u>*, i consumi di acqua registrati sono relativi alla produzione del diesel e sono stati computati come riportato in Eq. (4.95) per **acqua** ed **emulsione**. I valori relativi a **sabbia**, **RAP** e **sludge**, sono stati riportati in Eq.(4.96).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \right)_{\textit{Cisterna}} \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textbf{Consumo Acqua}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{ston}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \tag{4.95}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \left\{ \left(\frac{\textit{Vol}\,[\textit{yd}^3] \cdot \textit{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{\textit{yd}^3}\right]}{\textit{Produttività}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{\textit{h}}\right]} \cdot \textit{Consumo Carburante}\left[{}^{\textit{l}}/_{\textit{h}}\right] \right)_{\textit{Pala Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \right)_{\textit{Autocarro}} \right\} \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textit{Consumo Acqua}\left[{}^{\textit{g}}/_{\textit{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \tag{4.96}$$

Il valore relativo al **CMA** è stato posto pari a zero.

Il valore relativo alla fase di *Process(Equipment)* , come nella fase precedente, presenta un consumo di acqua dovuto alla produzione del diesel ed è stato esplicitato in Eq.(4.97).

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ston}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textit{Consumo Acqua}\left[{}^{\textit{g}}/_{\textit{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \right\} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \tag{4.97}$$

NOx [g]

Nella fase di *Material Production*, le emissioni di NO_x dovute alla lavorazione della **sabbia**, dell'**emulsione** e alla fornitura dell'**acqua**, sono state calcolate mediante l'Eq. (4.98).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{g}/{short\ ton}}\right] \tag{4.98}$$

Le emissioni nella fase di lavorazione del RAP sono state rappresentate dall'Eq. (4.99)

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right\}_{\boldsymbol{Mulino}} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{g}/{h_p \cdot h}}\right] \tag{4.99}$$

Le emissioni dovute alla produzione dello **sludge** sono state riportate pari a zero in quanto disponibile in impianto già pronto per l'utilizzo senza la necessità di ulteriori lavorazioni.

Le emissioni dovute alla produzione di **CMA** sono state descritte in Eq. (4.100).

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{\left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{short\ ton}/{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right)_{\boldsymbol{Blender}}\right\} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{g}/{h_p \cdot h}}\right] \tag{4.100}$$

La fase di *Material Transportation*, per quanto riguarda il trasporto di **acqua** ed **emulsione** stata riportata in Eq.(4.101).

$$\mathbf{Material\ Transportation} = \left(\frac{\mathbf{Vol}\,[\mathbf{yd^3}] \cdot \mathbf{Densità}\left[\mathbf{{short\ ton}/{yd^3}}\right]}{\mathbf{Conversione}\left[\mathbf{{short\ ton}/{Mg}}\right]} \cdot \mathbf{Distanza}\,[\mathbf{mi}] \cdot \mathbf{Conversione}\left[\mathbf{{km}/{mi}}\right] \cdot \mathbf{Emissione}\left[\mathbf{{g}/{Mg \cdot km}}\right]\right)_{Cisterna} \tag{4.101}$$

Nella fase di trasporto degli aggregati sono stati considerati anche i contributi dovuti ai processi di carico dei materiali ad opera della pala caricatrice, come riportato in Eq.(4.102)

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textit{Vol}\,[yd^3] \cdot \textit{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{yd^3}\right]}{\textit{Produttività}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{h}\right]} \cdot \textit{Capacità Motore}\,[h_p] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{h_p \cdot h}\right] \right)_{\textit{Pala Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \right)_{\textit{Autocarro}}$$

(4.102)

Il valore di **CMA** è stato posto uguale a zero in quanto la miscelazione avviene direttamente in cantiere.

Nella fase di Processes (Equipment) le emissioni relative ai processi di stesa e di compattazione sono riportati in Eq.(4.103).

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right\}_{\textit{Vibrofinitrice}} + \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right\}_{\textit{Rullo Gommato}}$$

(4.103)

PM10 [g]

Nella fase di *Material Production*, le emissioni di PM_{10} dovute alla produzione di **sabbia**, **emulsione** ed **acqua** sono state riportate in Eq. (4.104)

$$\textit{Material Production} = \textit{Vol}\,[yd^3] \cdot \textit{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{yd^3}\right] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{\textit{short ton}}\right]$$

(4.104)

Le emissioni prodotte nella fase di lavorazione del **RAP** sono state riporte in Eq.(4.105).

$$\textit{RAP}_{\textit{Mulino}} = \left\{ \frac{\textit{Vol}\,[yd^3] \cdot \textit{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{yd^3}\right]}{\textit{Produttività}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{h}\right]} \cdot \textit{Capacità Motore}\,[h_p] \right\}_{\textit{Mulino}} \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{h_p \cdot h}\right]$$

(4.105)

Le emissioni alla produzione di **sludge** sono state riportate pari a zero poiché disponibile in impianto già pronto per l'utilizzo, senza la necessità di ulteriori lavorazioni.

Le emissioni prodotte nella fase di produzione della miscela (CMA) sono state riportate in Eq. (4.106).

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\left[\boldsymbol{yd^3}\right] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\left[\boldsymbol{h_p}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\left[\boldsymbol{yd^3}\right] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\left[\boldsymbol{h_p}\right] \right)_{\boldsymbol{Blender}} \right\} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{h_p \cdot h}}\right] \quad (4.106)$$

Nella fase di *Material Transportation*, le emissioni dovute al trasporto di **emulsione** ed **acqua** sono state calcolate come riportato nell' Eq. (4.107).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\left[\textbf{yd}^3\right] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \right)_{Cisterna} \quad (4.107)$$

Le emissioni di PM_{10} dovute al trasporto di **sabbia**, **RAP** e **sludge**, sono state calcolate come riportato in Eq. (4.108) per tener conto non solo delle emissioni dovute al solo trasporto, ma anche a quelle dovute ai processi di carico del materiale su mezzo di trasporto

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\left[\textbf{yd}^3\right] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburatne}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \cdot \textbf{Densità Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\boldsymbol{Mg}}/_{\boldsymbol{g}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{kg}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{kg}}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\left[\textbf{yd}^3\right] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\ [\textbf{mi}]\ \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \right)_{Autocarro} \quad (4.108)$$

Dato che la miscelazione avviene in impianto, è stato posto un valore di trasporto per **CMA** pari a zero.

Nella fase di *Processes (Equipment)*, è stato computato il particolato emesso nelle fasi di scarico, stesa e compattazione del conglomerato, come riportato in Eq. (4.109).

$$\mathbf{Process} = \left\{ \left(\frac{\mathbf{Vol}\,[\mathbf{yd^3}] \cdot \mathbf{Densità}\left[{}^{\mathbf{short\ ton}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]}{\mathbf{Produttività}\left[{}^{\mathbf{ston}}/_{\mathbf{h}}\right]} \cdot \mathbf{Capacità\ Motore}\,[\mathbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp \cdot h}}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\mathbf{Vol}\,[\mathbf{yd^3}] \cdot \mathbf{Densità}\left[{}^{\mathbf{short\ ton}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]}{\mathbf{Produttività}\left[{}^{\mathbf{ston}}/_{\mathbf{h}}\right]} \cdot \mathbf{Capacità\ Motore}\,[\mathbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp \cdot h}}\right] \right)_{Rullo\ Gommato} \right\} + \left(\frac{\mathbf{Vol}\,[\mathbf{yd^3}] \cdot \mathbf{Densità}\left[{}^{\mathbf{short\ ton}}/_{\mathbf{yd^3}}\right]}{\mathbf{Conversione}\left[{}^{\mathbf{short\ ton}}/_{\mathbf{Mg}}\right]} \cdot \mathbf{Emissione}\left[{}^{\mathbf{kg}}/_{\mathbf{Mg}}\right] \cdot \mathbf{Conversione}\left[{}^{\mathbf{g}}/_{\mathbf{kg}}\right] \right)_{Scarico}$$

(4.109)

SO_2 [g]

Nella fase di Material Production, le emissioni prodotte nella produzione di **sabbia**, **emulsione** ed **acqua** sono state riportate in Eq. (4.110).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]$$

(4.110)

Le emissioni prodotte nella fase di lavorazioni del **RAP** sono state riportate in Eq.(4.111).

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{ \frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}] \right\}_{Mulino} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{h_p \cdot h}}\right]$$

(4.111)

Le emissioni dovute alla produzione di **sludge** sono state poste uguali a zero mentre per il **CMA** sono state descritte mediante l'Eq.(4.112).

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}] \right)_{Pala\ Caricatrice} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}] \right)_{Blender} \right\} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{h_p \cdot h}}\right]$$

(4.112)

Nella fase di *Material Transportation*, le emissioni di SO_2 per **acqua** ed **emulsione** sono state computate come riportato in Eq.(4.113). La **sabbia**, il **RAP** e lo **sludge** computano al loro interno anche il contributo dovuto al processo di carico sull'autocarro operato da una pala caricatrice, come descritto in Eq.(4.114).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \right)_{Cisterna} \tag{4.113}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textit{Vol}\,[\textit{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{\textit{yd}^3}\right]}{\textit{Produttività}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{\textit{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[h_p] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{h_p \cdot h}\right] \right)_{Pala\ Caricatrice} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg} \cdot \textbf{km}}\right] \right)_{Autocarro} \tag{4.114}$$

Dato che la miscelazione avviene in cantiere il valore di trasporto per **CMA** è stato posto uguale a zero.

La fase di *Processes (Equipment)* è stata descritta mediante l'Eq.(4.115)

$$\textbf{Process} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{g}/_{hp \cdot h}\right] \right)_{Rullo\ Gommato} \tag{4.115}$$

CO [g]

Le formulazioni presenti all'interno della fase di *Material Production* sono state esplicitate mediante l'Eq. (4.116) per quanto riguarda la produzione di **sabbia**, **emulsione** ed **acqua**.

$$\textbf{Material Production} = \textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[{}^{g}/_{\textbf{short ton}}\right] \tag{4.116}$$

Nel caso del **RAP**, le emissioni di CO sono dovute alle lavorazioni effettuate dal mulino di lavorazione, come descritto in Eq.(4.117)

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{\frac{\boldsymbol{Vol\,[yd^3]} \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right\}_{\boldsymbol{Mulino}} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{}^{g}/_{h_p \cdot h}}\right] \tag{4.117}$$

Le emissioni dovute alla produzione di **sludge** sono state poste uguali a zero mentre, i valori relativi al **CMA**, sono stati riportati in Eq. (4.118).

$$\boldsymbol{CMA} = \left\{\left(\frac{\boldsymbol{Vol\,[yd^3]} \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol\,[yd^3]} \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}]\right)_{\boldsymbol{Blender}}\right\} \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{}^{g}/_{h_p \cdot h}}\right] \tag{4.118}$$

La fase di <u>*Material Transportation*</u> è stata descritta per **acqua** ed **emulsione** dall' Eq.(4.119), per gli **aggregati** dall'Eq.(4.120) e per il **CMA**, poiché è realizzato in cantiere, è stato riportato avente trasporto nullo.

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\textbf{Conversion}\left[\textbf{{}^{short\ ton}/_{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{{}^{km}/_{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[\textbf{{}^{g}/_{Mg \cdot km}}\right]\right)_{Cisterna} \tag{4.119}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol\,[yd^3]} \cdot \boldsymbol{Densità}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[\boldsymbol{{}^{short\ ton}/_{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Capacità\ Motore}\,[\boldsymbol{h_p}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[\boldsymbol{{}^{g}/_{h_p \cdot h}}\right]\right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[\textbf{{}^{short\ ton}/_{yd^3}}\right]}{\textbf{Conversion}\left[\textbf{{}^{short\ ton}/_{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[\textbf{{}^{km}/_{mi}}\right] \cdot \textbf{Emissione}\left[\textbf{{}^{g}/_{Mg \cdot km}}\right]\right)_{Autocarro} \tag{4.120}$$

Nella fase di Processes (Equipment), le emissioni dovute alla stesa e alla compattazione sono state riportate in Eq.(4.121).

$$\textbf{Process} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp}\cdot\boldsymbol{h}}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Capacità Motore}\,[\textbf{hp}] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{hp}\cdot\boldsymbol{h}}\right] \right)_{Rullo\ Gommato}$$

(4.121)

Hg [g]

Nella fase di *Material Production*, le emissioni di Hg dovute alla produzione della **sabbia** dell'**emulsione** e dell'**acqua** sono state trattate mediante la formulazione riportata in Eq.(4.122).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]$$

[Z65] [Z66] (4.122)

Le emissioni dovute alla lavorazione del **RAP** sono state riportate in Eq.(4.123)

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{ \frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \right\}_{Mulino} \cdot \boldsymbol{Densità\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z69] (4.123)

Le emissioni per **sludge** e **CMA** sono stati definiti pari a zero.

Nella fase di *Material Transportation*, per **acqua** ed **emulsione**, la formulazione utilizzata da PaLATE è stata riportata in Eq. (4.124). Per gli **aggregati**, le equazioni sono state modificate per poter tener conto dell'intervento della pala caricatrice, come descritto in Eq.(4.125).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \right)_{Cisterna} \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z391] [Z396] (4.124)

$$\textbf{Material Transportation} = \left\{ \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacit}\grave{\text{a}}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \right)_{Autocarro} \right\} \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z390] [Z394] [Z401] (4.125)

Nella fase di Processes (Equipment), le emissioni dovute ai processi di stesa e compattazione sono state esplicitate dall' Eq. (4.126)

$$\textbf{Process} = \left\{ \frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttivit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right] \right\} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[Z763] (4.126)

Pb [g]

Nella fase di *Material Production*, le emissioni di Pb dovute alla produzione di **sabbia**, **emulsione** e **acqua** sono state esplicitate dalle Eq. (4.127).

$$\boldsymbol{Material\ Production} = \boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]$$

[AA84] (4.127)

Le emissioni di **RAP** sono state definite come riportato in Eq. (4.128).

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino}} = \left\{ \frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}] \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\text{a}}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]} \cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right] \right\}_{\boldsymbol{Mulino}} \cdot \boldsymbol{Densit}\grave{\text{a}}\ \boldsymbol{Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{l}}\right] \cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]$$

[AA69] (4.128)

Le emissioni dovute alla produzione si **sludge** e **CMA** è stato posto pari a zero.

Nella fase di *Material Transportation,* sono state riportate la formulazione relativa al trasporto di **acqua** ed **emulsione** in Eq (4.129) e quella relativa al trasporto degli **aggregati** in Eq.(4.130).

$$\textbf{Material Transportation} = \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3]\cdot\textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]}\cdot\frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]}\cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right]\cdot\textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right]\right)_{Cisterna}\cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right]\cdot \boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]\cdot\frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[AA391][AA 396] (4.129)

$$\textbf{Material Transportation} = \left\{\left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd}^3]\cdot\boldsymbol{Densità}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{yd}^3}\right]}{\boldsymbol{Produttività}\left[{}^{\boldsymbol{short\ ton}}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot\boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[{}^{\boldsymbol{l}}/_{\boldsymbol{h}}\right]\right)_{Pala\ Caricatrice}+\left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3]\cdot\textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]}\cdot\frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]}\cdot\textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right]\cdot\textbf{Efficienza Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right]\right)_{Autocarro}\right\}\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right]\cdot\boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]\cdot\frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[AA 390] [AA 394] [AA 401] (4.130)

Nella fase di Processes (Equipment), le emissioni dovute ai processi di stesa e compattazione sono state esplicitate dall' Eq. (4.131)

$$\textbf{Process} = \left\{\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3]\cdot\textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{h}}\right]}\cdot\textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right]\cdot\boldsymbol{Emissione}\left[{}^{\boldsymbol{g}}/_{\boldsymbol{short\ ton}}\right]\cdot\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]\right\}\cdot\frac{1}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

[AA763] (4.131)

RCRA Hazardous Waste Generated [g]

Nella fase di *Material Production*, i valori di emissione per **sabbia**, **emulsione** ed **acqua** sono stati definiti come in Eq.(4.132).

$$\boldsymbol{Material\ Production = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Emissione\ \left[{g}/{short\ ton}\right]} \tag{4.132}$$

Il valore di emissione associato alla lavorazione del RAP è stato descritto in Eq. (4.133).

$$\boldsymbol{RAP_{Mulino} = \left\{\frac{Vol\ [yd^3] \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]}{Produttività\ \left[{short\ ton}/{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\ \left[{l}/{h}\right]\right\}_{Mulino} \cdot Densità\ Carburante\left[{g}/{l}\right] \cdot Emissione\ \left[{g}/{short\ ton}\right] \cdot Conversione\ \left[{ston}/{Mg}\right] \cdot \frac{1}{Conversione\ \left[{g}/{Mg}\right]}} \tag{4.133}$$

I valori di emissione relativi **sludge** e **CMA** sono stati posti pari a zero.

Nella fase di Material Transportation, i valori di emissione sono stati calcolati come riportato dall'Eq. (4.134) per il trasporto di **acqua** ed **emulsione**. Per gli **aggregati**, i valori di emissione sono stati descritti dall' Eq.(4.135)

$$\boldsymbol{Material\ Transportation = \left(\frac{Vol\ [yd^3] \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right]}{Capacità\ [Mg]} \cdot \frac{1}{Conversione\ \left[{short\ ton}/{Mg}\right]} \cdot Distanza\ [mi]\ \cdot Conversione\ \left[{km}/{mi}\right] \cdot Consumo\ Carburante\ \left[{l}/{km}\right]\right)_{Cisterna} \cdot Conversione\ \left[{g}/{l}\right] \cdot Emissione\ \left[{g}/{ston}\right] \cdot Conversione\ \left[{ston}/{Mg}\right] \cdot \frac{1}{Conversione\ \left[{g}/{Mg}\right]}} \tag{4.134}$$

$$\textbf{Material Transportation} = \left\{ \left(\frac{\textit{Vol}\,[yd^3] \cdot \textit{Densità}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{yd^3}\right]}{\textit{Produttività}\left[{}^{\textit{short ton}}/_{h}\right]} \cdot \textit{Consumo Carburante}\left[{}^{l}/_{h}\right] \right)_{\textit{Pala Caricatrice}} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Capacità}\,[\textbf{Mg}]} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right]} \cdot \textbf{Distanza}\,[\textbf{mi}] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{km}}/_{\textbf{mi}}\right] \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{km}}\right] \right)_{Autocarro} \right\} \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{\textit{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{short ton}}/_{\textbf{Mg}}\right] \cdot \frac{1}{\textbf{Conversione}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

(4.135)

Nella fase di Processes (Equipment) , le emissioni relative al processo di stesa e compattazione sono state calcolate come riportate in Eq.(4.136).

$$\textbf{Process} = \left\{ \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ston}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Densità Carburante}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{\textit{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\textbf{Vol}\,[\textbf{yd}^3] \cdot \textbf{Densità}\left[{}^{\textbf{short ston}}/_{\textbf{yd}^3}\right]}{\textbf{Produttività}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{h}}\right]} \cdot \textbf{Consumo Carburante}\left[{}^{\textbf{l}}/_{\textbf{h}}\right] \cdot \textbf{Densità Carburante}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{l}}\right] \cdot \textit{Emissione}\left[{}^{g}/_{\textit{short ton}}\right] \cdot \textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{ston}}/_{\textbf{Mg}}\right] \right)_{Rullo\ Gommato} \right\} \cdot \frac{1}{\textbf{Conversion}\left[{}^{\textbf{g}}/_{\textbf{Mg}}\right]}$$

(4.136)

3.4.2 Risultati

I risultati ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di un 1 chilometro di strada sono stati riportati in Fig. 4.11.

		GER [MJ]	Consumo di Acqua [kg]	GWP [Mg]	NO_x [kg]	PM_{10} [kg]	SO_2 [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential (Cancer) [kg]	Human Toxicity Potential (Non-cancer) [Mg]
Initial Construction	Materials Production	280.888	107.504	19	107	362	59	62	1	67	13.195	1.317	13.617
	Materials Transportation	85.872	750	6	548	96	33	48	0	1	244	2	3
	Processes (Equipment)	5.480	43	0	11	1	1	2	0	0	44	0	0
	Total	**372.240**	**108.296**	**25**	**665**	**458**	**93**	**112**	**1**	**68**	**13.483**	**1.319**	**13.620**

Figura 3.11 – Risultati ambientali relativi al caso studio Mix 4 – S

Si è deciso di analizzare GER, Consumo di Acqua e GWP più nel dettaglio. Nella Fig. 4.12, sono state riportate le emissioni suddivise in base all'impatto fornito da ogni processo.

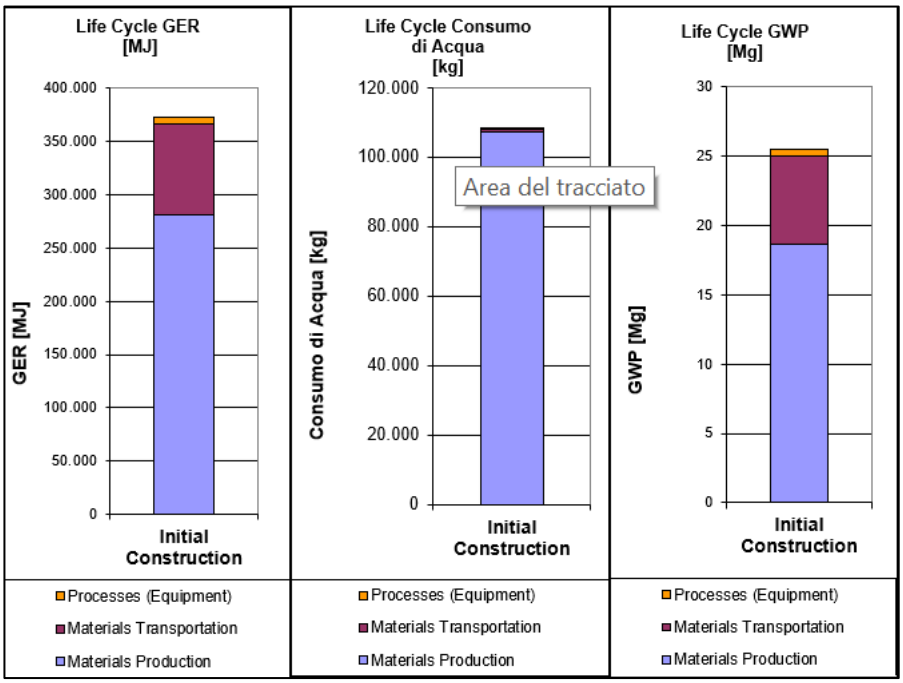


Figura 3.12 – GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio Mix 4 – S

Si noti come il maggiore consumo di energia è attribuibile alla fase di produzione dei materiali, il quale rappresenta oltre il 75% dell'energia totale consumata, rispetto al 23% e al 1% rispettivamente per le fasi di trasporto e realizzazione della pavimentazione.

Il consumo di acqua presenta una netta predominanza nella fase di produzione dei materiali con un utilizzo pari al 99 % sul totale. Il restante 1 % è dovuto alla fase di trasporto mentre alla fase di realizzazione non compete alcun consumo di acqua.

Le emissioni di CO_{2eq}. forniscono un apporto pari al 73% e 25% per le fasi di produzione e trasporto dei materiali contro il solo 2% dovuto alla fase di realizzazione.

3.5 Caso Studio 2 : 100%RAP

Lo scopo di questo caso studio è stato analizzare gli impatti ambientali provenienti dall'utilizzo di una miscela costituita al 100% da fresato bituminoso. Lo studio di Life Cycle Assessment è stato portato avanti mediante l'utilizzo del software PaLATE.

Il processo di produzione della miscela, come riportato in Fig. 4.13, prevede l'utilizzo di un mulino per la frantumazione del fresato, di un autocarro per il trasporto in situ ed infine, di una vibrofinitrice e di un rullo gommato per i processi di stesa e compattazione. Inoltre, è stata prevista una pala caricatrice per ovviare ai processi di carico e scarico del fresato.

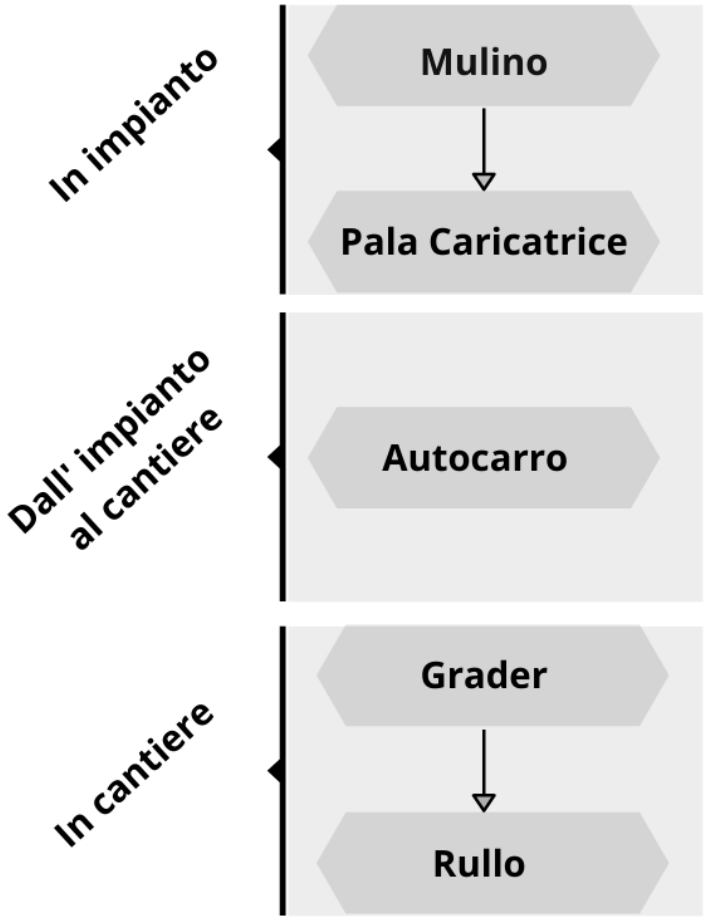


Figura 3.13 – Macchinari utilizzati per la produzione della miscela 100%RAP e della costruzione stradale

3.5.1 Valutazione d'impatto

Come effettuato per il Mix 4-S , anche in questo paragrafo sono stati elencati i processi necessari alla definizione dei dati di input richiesti dal software ai fini di uno studio di LCA. Per ogni foglio di lavoro, sono state di seguito esplicitate le scelte progettuali e le approssimazioni che sono state eseguite.

Design

Le caratteristiche geometriche della strada differiscono dal caso studio Mix 4 – S soltanto per quanto riguarda la stratigrafia. In questo caso, infatti, è stato considerato un unico strato avente una profondità pari a 30 cm la cui conversione in inches è stata riportata nell'Eq. (4.137).

$$Profondità_{Usura} = \frac{Profondità\ [m]}{Conversione\ [^{m}/_{in}]} = \frac{0{,}3\ [m]}{0{,}025\ [^{m}/_{in}]} = 12\ inches \tag{4.137}$$

In Tab. 4.12 sono state riportate le caratteristiche geometriche della strada così come sono mostrate all'interno del software PaLATE.

Tabella 3.12 – Caratteristiche geometriche della strada di servizio

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Usura	14,75	0,62	12,0	1.793
Wearing Course 2				0
Wearing Course 3				0
Fondazione				
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			12	1.793

Il volume finale dello strato è stato ottenuto come riportato in Eq.(4.138)

$$\boldsymbol{Volume_{Strato}} = \left\{\text{Larghezza } [ft] \cdot \left(\text{Lunghezza } [mi] \cdot \text{Conversione } \left[^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(\text{Profondità } [in] \cdot Conversione\left[^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot Conversione\left[^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \left\{14{,}75[ft] \cdot \left(0{,}62[mi] \cdot 5280\left[^{ft}/_{mi}\right]\right) \cdot \left(12[in] \cdot \frac{1}{12}\left[^{ft}/_{in}\right]\right)\right\} \cdot \frac{1}{27}\left[^{yd^3}/_{ft^3}\right] = \mathbf{1.793\ yd^3} \tag{4.138}$$

Initial Construction

I valori di input necessari all'interno del foglio di lavoro 'Initial Construction' sono le caratteristiche volumetriche e le distanze di trasporto relativi alla miscela e ai materiali che la compongono.

Le masse volumiche relative al RAP sciolto e compattato sono state riportate in Tab. 4.13.

Tabella 3.13 – Masse volumiche del fresato bituminoso

MV_{RAP}		$MV_{RAP,compattato}$	
kg/m³	short ton/yd³	kg/m³	short ton/yd³
2562,00	2,16	2050	1,73

La percentuale di vuoti (v) e la percentuale di RAP in volume (%V_{RAP}) sono stati calcolati come riportato in Eq.(4.139) e (4.140).

$$\boldsymbol{v} = \left(1 - \frac{MV_{RAP,compattato}\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{MV_{RAP}\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{2050\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{2562\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \mathbf{19,98}\ \% \qquad (4.139)$$

$$\%\boldsymbol{V_{RAP}} = 100[\%] - v[\%] = 100[\%] - 19{,}98[\%] = \mathbf{80,02}\ \% \qquad (4.140)$$

Considerando il volume dello strato da pavimentare riportato in Eq.(4.138), il volume totale di fresato bituminoso (V_{RAP}) necessario è stato ricavato come descritto in Eq.(4.141).

$$\boldsymbol{V_{RAP}} = V_{Strato}[yd^3] \cdot \left(\frac{\%V_{RAP}}{100}\right) = 1793[yd^3] \cdot \left(\frac{80{,}02[\%]}{100}\right) = \mathbf{1434,8\ yd^3} \qquad (4.141)$$

Le *distanze di trasporto* sono state considerate uguali a quelle definite per il fresato bituminoso utilizzato all'interno del caso studio Mix 4-S, riportato in Tab.4.8.

Equipment

L'inventario dei macchinari utilizzati combacia con quello impiegato nel caso studio Mix 4-S e riportato nelle Tab.4.9 e 4.10. L'unico mezzo che non è stato utilizzato è il blender in quanto il fresato bituminoso, dopo essere stato frantumato, è stato supposto direttamente soggetto a stesa e compattazione, senza la necessità di ulteriori lavorazioni intermedie. Inoltre, la vibrofinitrice è stata sostituita con un grader.

Environmntal Results

Le operazioni svolte da PaLATE al fine di definire i risultati ambientali dovuti all'utilizzo di fresato bituminoso, non sono state modificate rispetto a quanto già effettuato nel caso studio Mix 4-S.

A titolo di esempio sono state richiamate le formulazioni necessarie alla definizione del Gross Energy Requirement (GER) nelle varie fasi di realizzazione dello strato di pavimentazione.

Tutte le formulazioni sono state riportate in Eq.(4.142), (4.143) e (4.144).

$$RAP_{Material_{Production}} = \left\{ \frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Conversione\left[{}^{J}/_{l}\right] \right\}_{Mulino} \cdot Conversione\left[{}^{MJ}/_{J}\right] \tag{4.142}$$

$$RAP_{Material_{Transportation}} = \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Conversione\left[{}^{J}/_{l}\right] \cdot Conversione\left[{}^{MJ}/_{J}\right] \right)_{Pala\ Caricatrice} + \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Capacità\,[Mg]} \cdot \frac{1}{Conversione\left[{}^{short\ ton}/_{Mg}\right]} \cdot Distanza\,[mi] \cdot Conversione\left[{}^{km}/_{mi}\right] \cdot Efficienza\ Carburante\left[{}^{l}/_{km}\right] \cdot Energia\left[{}^{MJ}/_{l}\right] \right)_{Autocarro} \tag{4.143}$$

$$RAP_{Processes} = \left\{ \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Contenuto\ Calore\left[{}^{MJ}/_{l}\right] \right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{Vol\,[yd^3] \cdot Densità\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right]}{Produttività\left[{}^{short\ ton}/_{h}\right]} \cdot Consumo\ Carburante\left[{}^{l}/_{h}\right] \cdot Contenuto\ Calore\left[{}^{MJ}/_{l}\right] \right)_{Rullo\ Gommato} \right\} \cdot Conversione\left[{}^{MJ}/_{J}\right] \tag{4.144}$$

3.5.2 *Risultati*

I risultati ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di un chilometro di strada avente un solo strato di spessore pari a 30 cm, sono stati riportati in Fig. 4.14.

		GER [MJ]	Consumo di Acqua [kg]	GWP [Mg]	NO_x [kg]	PM_{10} [kg]	SO_2 [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential (Cancer) [kg]	Human Toxicity Potential (Non-cancer) [Mg]
Initial Construction	Materials Production	25.194	0,00	2	10	1	1	2	0,02	1	232	45	81
	Materials Transportation	69.405	595	5	420	72	25	42	0,08	3	551	2	2
	Processes (Equipment)	3.912	30	0	6	0	0	1	0,00	0	31	0	0
	Total	**98.511**	**625**	**7**	**436**	**73**	**27**	**45**	**0**	**4**	**814**	**47**	**83**

Figura 3.14 – Risultati ambientali relativi al caso studio 100% RAP

In Fig. 4.15 sono state riportate le emissioni e i consumi relativi a GER, Consumo di Acqua e GWP effettuando un'analisi più approfondita sull'incidenza delle varie fasi sul consumo totale.

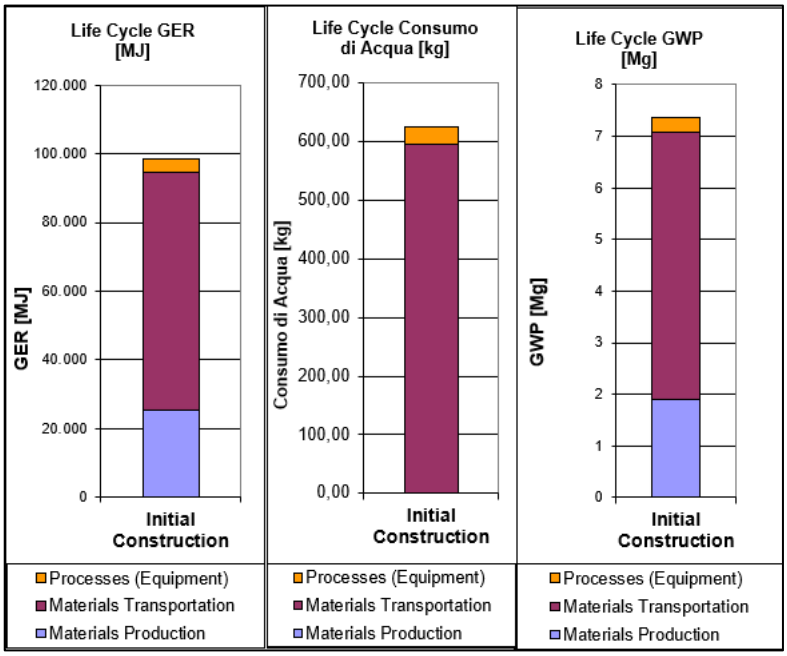


Figura 3.15 - GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio 100%RAP

Il consumo di energia preponderante è stato effettuato nella fase di trasporto con un'incidenza sul totale pari al 70%, mentre alla fase di produzione dei materiali e realizzazione della pavimentazione corrispondono rispettivamente il 26% e il 4%.

Il consumo di acqua si è verificato soltanto nelle fasi di trasporto e realizzazione con un'incidenza sul totale pari 95% e 5%. Alla fase di produzione del fresato non è stato attribuito nessun consumo.

Per quanto riguarda le emissioni di CO_{2eq}, la fase più incidente risulta essere quella di trasporto con un valore pari al 70% sul totale, mentre alla fase di produzione e realizzazione presentano valori pari rispettivamente a 26% e 4%.

3.6 Caso Studio 3 : 100% Aggregati Vergini

In questo caso studio sono stati esaminati i crediti ambientali derivanti dall'utilizzo di una miscela costituita al 100% da aggregati vergini. Anche in questo caso, è stato effettuato uno studio di Life Cycle Assessment mediante l'utilizzo del software PaLATE.

Le emissioni generate durante la fase di produzione degli inerti in impianto, sono state conteggiate dal software mediante i valori presente nella Sector Table. Per quanto concerne i macchinari inseriti come dati di input (riportati in Fig.4.16) sono stati scelti: gli autocarri per il trasporto, una pala caricatrice per il carico e lo scarico degli aggregati, un blender per la miscelazione degli inerti con acqua, una vibrofinitrice e ad un rullo gommato per la stesa e la compattazione.

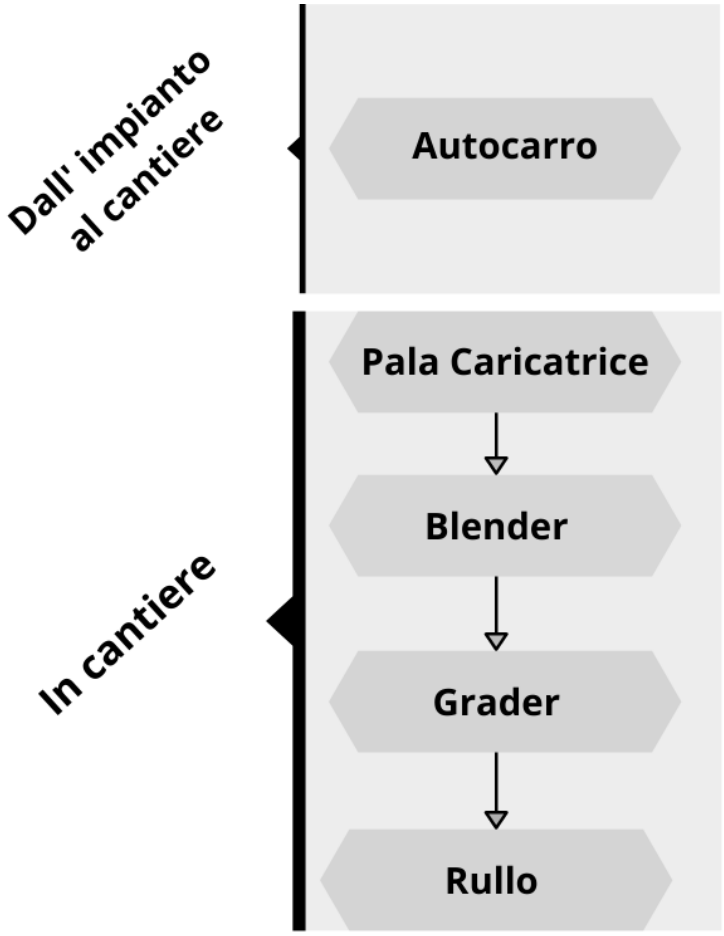


Figura 3.16 - Macchinari utilizzati per la produzione della miscela 100% Aggregati e della costruzione stradale

3.6.1 Valutazione d'impatto

Come effettuato per gli altri due casi studio , anche in questo paragrafo sono stati elencati i processi necessari alla definizione dei dati di input richiesti dal software ai fini di uno studio di LCA. Per ogni foglio di lavoro, sono state di seguito esplicitate le scelte progettuali e le approssimazioni che sono state eseguite.

Design

Le caratteristiche geometriche della strada coincidono con quelle definite per il caso studio 100% RAP in quanto anche in questo caso, lo strato di pavimentazione da realizzare è unico e pari a 30cm.

In Tab 4.11 sono riportate i valori così come riportati in PaLATE e il volume dello strato da pavimentare è stato descritto in Eq.(4.138).

Initial Construction

Le caratteristiche volumetriche e le distanze di trasporto relativi alla miscela e ai materiali che la compongono sono valori di input necessari all'interno del foglio di lavoro 'Initial Construction'.

Le masse volumiche relative agli aggregati allo stato sciolto e compattato sono state riportate in Tab. 4.14.

Tabella 3.14 – Masse volumiche degli inerti

MV_A		$MV_{A,compattato}$	
kg/m³	short ton/yd³	kg/m³	short ton/yd³
2.700,00	2,27	2050	1,73

La percentuale di vuoti (v) e la percentuale di aggregati in volume (%V_A) sono stati calcolati come riportato in Eq.(4.145) e (4.146).

$$\boldsymbol{v} = \left(1 - \frac{MV_{A,compattato}\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{MV_A\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{2.050\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}{2.700\left[{}^{kg}/_{m^3}\right]}\right) \cdot 100 = \mathbf{24,07}\ \% \qquad (4.145)$$

$$\%\boldsymbol{V_A} = 100[\%] - v[\%] = 100[\%] - 24{,}07[\%] = \mathbf{75,93}\ \% \qquad (4.146)$$

Il volume (V_A) e la massa (Q_A) aggregati sono stati calcolati come riportato in Eq. (4.147) e (4.148).

$$\boldsymbol{V_A} = V_{strato}[yd^3] \cdot \left(\frac{\%V_A}{10\,0}\right) = 1.793 \cdot \left(\frac{75{,}93}{100}\right) = \mathbf{1.361,5\ yd^3} \qquad (4.147)$$

$$\boldsymbol{Q_A} = V_A[yd^3] \cdot MV_A\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] = 1.361{,}5[yd^3] \cdot 2{,}27\left[{}^{short\ ton}/_{yd^3}\right] = \mathbf{3097\ short\ ton} \qquad (4.148)$$

Dato che la percentuale di acqua sul peso di aggregato (P_W) è pari all'8% e considerando la densità dell'acqua (γ_W) pari a 0,84 short ton/yd³ (1000 kg/m³), la massa (Q_W)e il volume di

acqua (V_W) necessari per la pavimentazione dello strato sono stati descritti in Eq.(4.149) e (4.150)

$$\boldsymbol{Q_W} = Q_A[short\ ton] \cdot \left(\frac{P_W\ [\%]}{100}\right) = 3097[short\ ton] \cdot \left(\frac{8\ [\%]}{100}\right) = \boldsymbol{248\ short\ ton} \tag{4.149}$$

$$\boldsymbol{V_W} = \frac{Q_W[short\ ton]}{\gamma_W\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \frac{248[short\ ton]}{0{,}84\left[{short\ ton}/{yd^3}\right]} = \boldsymbol{294\ yd^3} \tag{4.150}$$

Le distanze di trasporto sono state poste uguali a quelle definite per gli aggregati utilizzati all'interno del caso studio Mix 4-S e riportato in Tab 4.8.

Equipment

L'inventario dei macchinari utilizzati combacia parzialmente con quello impiegato nel caso studio Mix 4-S e riportato nelle Tab.4.9 e 4.10. L'unico mezzo che non è stato utilizzato è il mulino di frantumazione in quanto i processi di produzione degli aggregati sono stati già conteggiati dalla Sector Table presente in PaLATE. Inoltre, gli ultimi due macchinari sono stati sostituiti con un grader e un rullo compattatore.

Environmental Results

Le operazioni svolte da PaLATE al fine di definire i risultati ambientali dovuti all'utilizzo di aggregati vergini ed acqua non sono state modificate rispetto a quanto già analizzato nel caso studio Mix 4-S.

A titolo di esempio sono state richiamate le formulazioni necessarie alla definizione del Gross Energy Requirement (GER) nelle varie fasi di realizzazione dello strato di pavimentazione.

Le formulazioni relative alla fase di Material Production sono state riportate in Eq.(4.151), (4.152) e (4.153).

$$\boldsymbol{Aggregati_{Material_{Production}} = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Consumo\ Energetico\ \left[{MJ}/{short\ ton}\right]} \tag{4.151}$$

$$\boldsymbol{Acqua_{Material_{Production}} = Vol\ [yd^3]\ \cdot Densità\ \left[{short\ ton}/{yd^3}\right] \cdot Consumo\ Energetico\ \left[{MJ}/{short\ ton}\right]} \tag{4.152}$$

$$\boldsymbol{Miscela_{Material_{Prpduction}}} = \left\{\left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{h}}\right]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{J}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{h}}\right]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{J}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{\boldsymbol{Blender}}\right\}\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{J}}\right]$$

(4.153)

Le formulazioni dovute alla fase di Material Transportation e di Processes sono state descritte mediante le Eq. (4.154), (4.155) e (4.156).

$$\mathbf{Aggregati}_{\boldsymbol{Material_{Transportation}}} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{h}}\right]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{J}/_{\boldsymbol{l}}\right]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{J}}\right]\right)_{\boldsymbol{Pala\ Caricatrice}} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Capacit}\grave{\boldsymbol{a}}\,[\boldsymbol{Mg}]}\cdot\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{Mg}}\right]}\cdot \boldsymbol{Distanza}\,[\boldsymbol{mi}]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{km}/_{\boldsymbol{mi}}\right]\cdot \boldsymbol{Efficienza\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{km}}\right]\cdot \boldsymbol{Energia}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{\boldsymbol{Autocarro}}$$

(4.154)

$$\boldsymbol{Acqua_{Material_{Transportation}}} = \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Capacit}\grave{\boldsymbol{a}}\,[\boldsymbol{Mg}]}\cdot\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{Mg}}\right]}\cdot \boldsymbol{Distanza}\,[\boldsymbol{mi}]\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{km}/_{\boldsymbol{mi}}\right]\cdot \boldsymbol{Efficienza\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{km}}\right]\cdot \boldsymbol{Energia}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{\boldsymbol{Cisterna}}$$

(4.155)

$$\boldsymbol{Miscela_{Processes}} = \left\{\left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{h}}\right]\cdot \boldsymbol{Contenuto\ Calore}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{Vibrofinitrice} + \left(\frac{\boldsymbol{Vol}\,[\boldsymbol{yd^3}]\cdot\boldsymbol{Densit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{yd^3}}\right]}{\boldsymbol{Produttivit}\grave{\boldsymbol{a}}\left[\boldsymbol{short\ ton}/_{\boldsymbol{h}}\right]}\cdot \boldsymbol{Consumo\ Carburante}\left[\boldsymbol{l}/_{\boldsymbol{h}}\right]\cdot \boldsymbol{Contenuto\ Calore}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{l}}\right]\right)_{Rullo\ Gommato}\right\}\cdot \boldsymbol{Conversione}\left[\boldsymbol{MJ}/_{\boldsymbol{J}}\right]$$

(4.156)

3.6.2 *Risultati*

I risultati ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di un chilometro di strada avente un solo strato di spessore pari a 30 cm, sono stati riportati in Fig. 4.17.

		GER [MJ]	Consumo di Acqua [kg]	GWP [Mg]	NO_x [kg]	PM_{10} [kg]	SO_2 [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential (Cancer) [Kg]	Human Toxicity Potential (Non-cancer) [Mg]
Initial Construction	Materials Production	204.120	227.938	14	130	488	38	58	0	10	554	45.216	570.811
	Materials Transportation	92.159	789	7	570	97	35	54	0	4	732	2	3
	Processes (Equipment)	3.703	29	0	6	0	0	1	0	0	0	0,00	0,00
	Total	**299.983**	**228.756**	**21**	**706**	**586**	**73**	**113**	**0**	**14**	**1.286**	**45.218**	**570.813**

Figura 3.17 - Risultati ambientali relativi al caso studio 100% Aggregati Vergini

In Fig. 4.18 sono state riportate le emissioni e i consumi relativi a GER, Consumo di Acqua e GWP osservando l'impatto delle varie fasi sul consumo/emissione totale.

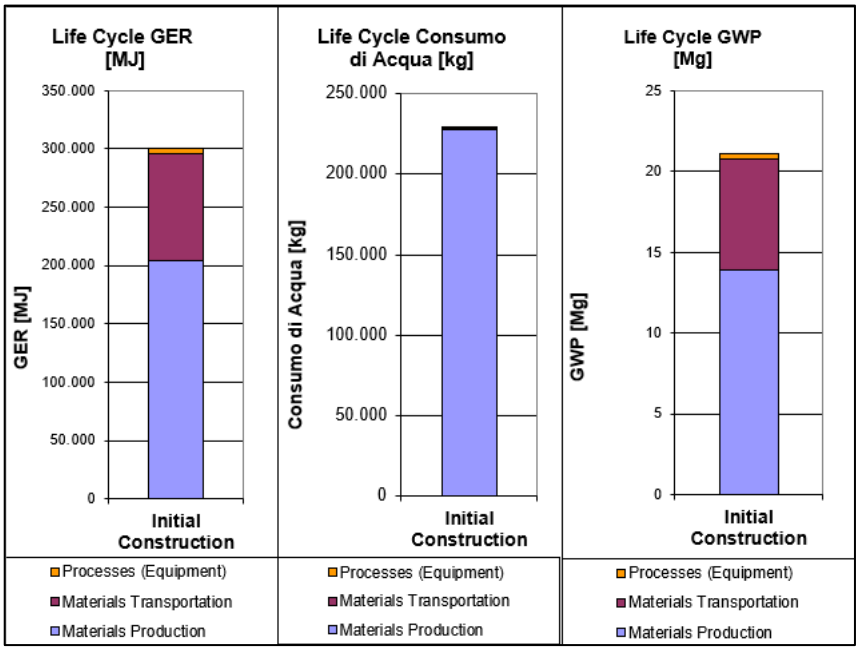


Figura 3.18 -- GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio 100%Aggregati

Il più alto consumo di energia è stato effettuato nella fase di produzione con un'incidenza sul totale pari al 68%, mentre alla fase di trasporto dei materiali e realizzazione della pavimentazione corrispondono rispettivamente il 31 % e l' 1%.

Il consumo di acqua maggiore si è verificato nella fase di produzione dei materiali con un valore pari a quasi il 100% del totale.

Per quanto riguarda le emissioni di CO_{2eq}, i valori maggiori si verificano durante la fase di produzione e trasporto con un'incidenza pari al 66 % e 33 % rispettivamente. Alla fase di realizzazione della strada compete un valore pari allo 1%.

CAPITOLO 5

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

L'analisi dei tre casi studio, trattati all'interno del capitolo precedente, è risultata fondamentale per la valutazione degli impatti riportata in questo capitolo.

Sono stati effettuati due differenti confronti e gli approcci LCA scelti sono del tipo:

- *Cradle to Gate*, all'interno del quale sono stati presi in considerazione tutti i processi a partire dalla produzione delle materie prime, fino alla fase di costruzione della pavimentazione. L'unità funzionale scelta è caratterizzata dalla lunghezza della strada posta pari ad 1 km;
- *Cradle to the End*, in cui sono stati considerati tutti i processi a partire dalla fase di produzione dei materiali, fino alla fine della vita di servizio della pavimentazione. L'unità funzionale considera in più, rispetto al confronto precedente, la durata della vita utile della strada.

Nei paragrafi successivi sono stati analizzati nel dettaglio i confronti effettuati.

4.1 I Confronto : Cradle to Gate

Il tipo di valutazione che è stata effettuata in questo paragrafo si incentra sulla comparazione dei tre casi studio presentati nel capitolo 4 sulla base della sola fase di 'Initial Construction' (fase di costruzione) utilizzata in PaLATE.

Come già ampiamente approfondito, tale fase si compone di tre unità di processo fondamentali per la costruzione di una strada:

- Material Production, all'interno del quale si prendono in considerazione tutti i processi relativi alla produzione dei materiali;
- Material Transportation, il quale fornisce il contributo impattante dovuto al trasporto dei materiali in cantiere;
- Processes, all'interno del quale sono computati gli impatti dovuti alle attività di cantiere.

Per ognuno dei dodici inquinanti forniti da PaLATE e descritti nel dettaglio all'interno del capitolo 2, sono stati riportarti tre confronti grafici (riportati in Fig. 5.2 e 5.3) le cui caratteristiche sono state descritte nella legenda di Fig. 5.1.

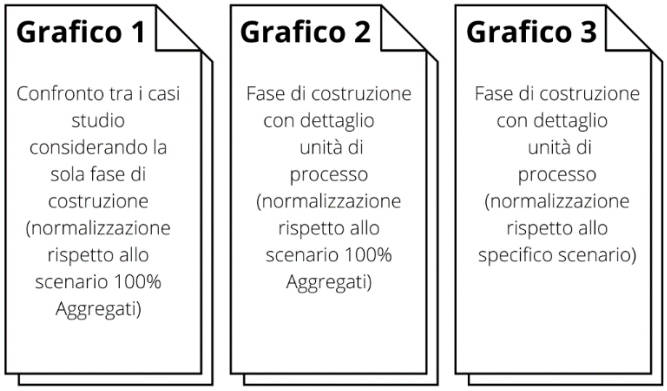


Figura 4.1 – Interpretazione dei grafici relativi al I Confronto

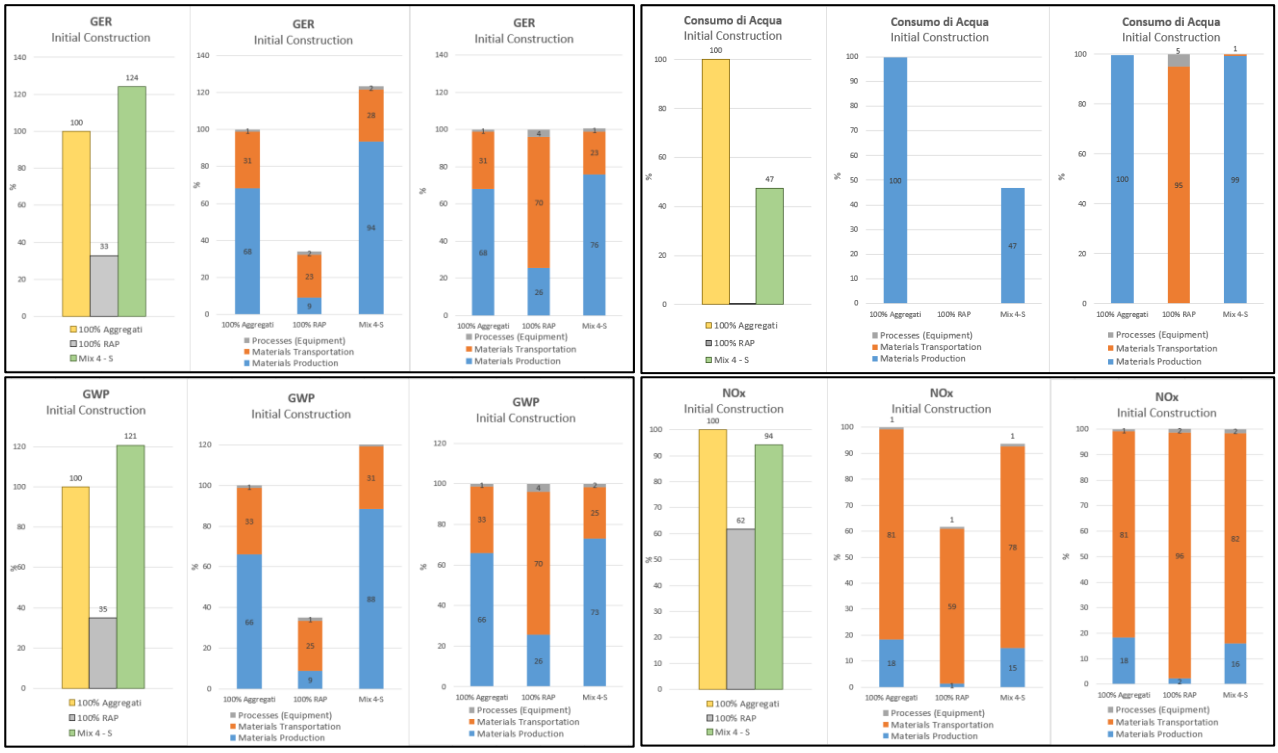


Figura 4.2 I Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE (parte 1)

Figura 4.3 - I Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE (parte 2)

Osservando i grafici di Fig. 5.2 e 5.3, in un'ottica volta alla valutazione del ciclo vita e considerando l'approccio LCA scelto, è stato possibile ottenere un quadro completo non solo della differenza d'impatto che presentano le tre miscele nella sola fase di costruzione, ma anche quale delle unità di processo che la caratterizzano fornisca il contributo maggiore.

Considerando il primo dei tre di grafici proposti per ogni inquinante si nota come, nel caso Mix 4-S, soltanto 5 inquinanti su 12 riportano un effettivo vantaggio ambientale rispetto alla miscela 100% Aggregati posta come riferimento. In particolare, presenta dei lievi vantaggi per quanto riguarda le emissioni di NOx e PM10 mentre è in grado di abbattere notevolmente gli impatti dovuti al consumo di acqua e agli HTP cancerogeni e non cancerogeni. Nei restanti 7 inquinanti, la quota parte in esubero è dovuta alla produzione di emulsione e alla frantumazione del RAP per quanto compete ai processi di produzione e per quanto riguarda la fase di trasporto, allo spostamento in cantiere degli stessi (compresa lo sludge). Inoltre, l'utilizzo di una vibrofinitrice e un rullo gommato per la stesa della miscela, in aggiunta al grader e al rullo compattatore per lo strato di fondazione, permettono di giustificare nel complesso tale disparità.

Per quanto riguarda la miscela 100%RAP, continuando ad osservare il primo grafico si nota come, procedere con l'utilizzo di questo materiale, permetta l'abbattimento delle emissioni di tutti i dodici inquinanti presentati da PaLATE e non soltanto rispetto alla miscela 100% Aggregati ma anche rispetto alla miscela innovativa.

Con l'intento di ottenere un quadro più esaustivo, il primo grafico è stato scomposto nelle varie unità di processo caratterizzate rispettivamente dalla produzione e dal trasporto dei materiali e, infine, dalle attività di cantiere. È stato in questo modo possibile osservare il contributo che ogni processo di lavorazione riveste nella produzione dei dodici inquinanti analizzati.

Nel caso Mix 4-S si nota come la suddivisione dell'ammontare di inquinanti emessi in ogni processo, nella quasi totalità dei casi, corrisponda alla stessa suddivisione riportata per la miscela 100%Aggregati. Per entrambi infatti, 7 inquinanti su 12 (GER, Consumo di Acqua, GWP, SOx, CO, HTP_{cancer} ed $HTP_{non\ cancer}$) i processi di produzione, trasporto e di cantiere contribuiscono approssimativamente allo stesso modo nella definizione dell'inquinante totale prodotto, indipendentemente dal suo valore finale. Questa similitudine può essere imputata ai 20 cm di strato di fondazione previsto nel caso studio Mix 4-S, realizzato in misto granulare non legato e alle fasi di miscelazione con pala e blender comuni ad entrambi i casi studio. Infine, una considerazione doverosa, è quella relativa al consumo di acqua e di emissioni di Hg e Pb, dove il contributo maggiore è fornito dai processi di produzione e trasporto dell'emulsione bituminosa.

In conclusione, per quanto riguarda la miscela 100%RAP, si nota come l'unità di processo che fornisce il contributo inquinante maggiore è caratterizzata dalla fase di trasporto del RAP sebbene questa, normalizzata a 100 rispetto alla miscela 100%Aggregati, risulti essere comunque notevolmente vantaggiosa.

4.2 Il Confronto: Cradle to the End

Il tipo di valutazione che è stata effettuata in questo paragrafo si basa sulla comparazione dei soli casi studio Mix 4-S e 100%RAP. I tipi di confronti, effettuati sulla base dei risultati forniti da PaLATE, sono stati suddivisi in due parti:

- Parte I : Maintenance, all'interno del quale è stata effettuata una comparazione considerando unicamente la fase di manutenzione;
- Parte II : Initial Construction & Maintenance, in cui è stato effettuato un confronto considerando il totale emesso dalla fase di costruzione e manutenzione.

4.2.1 Parte I: Maintenance

Per entrambe le miscele, le opere di manutenzione sono state effettuate utilizzando del fresato bituminoso frantumato, steso mediante l'utilizzo di un grader e successivamente compattato per mezzo di un rullo compattatore.

Per il *Mix 4–S* è stato definito un ciclo di manutenzione ogni due anni per dieci anni (decimo anno escluso) in cui è stato previsto il rifacimento del 30 % dello spessore dello strato di usura.

Per la miscela 100%RAP sono stati previsti dei cicli di riparazione delle buche ogni sei mesi per due anni. L'area delle buche è stata posta pari al 5% della superficie complessiva mentre la profondità media, pari a 3 cm. Inoltre, ogni due anni è stata prevista la stesa di un nuovo strato di fresato bituminoso pari al 10% dello spessore inziale, per una vita utile della strada pari a dieci anni (decimo anno escluso).

I volumi di fresato bituminoso necessari per effettuare i cicli di manutenzione sono stati riportati in Tab 5.1.

Tabella 4.1 Volumi di RAP necessari per i cicli di manutenzione

	V_{RAP}	
	m^3	yd^3
Mix 4-S	432,08	573,93
100%RAP	513,10	679,89

I volumi di RAP ottenuti sono stati inseriti in PaLATE e gli impatti ambientali generati sono stati confrontati, per ognuno dei dodici inquinanti trattati dall'applicativo, negli istogrammi riportati nelle Fig. 5.5 e 5.6.

Una legenda, utile alla comprensione dei grafici, è stata riportata in Fig 5.4.

Figura 4.4 - Interpretazione dei grafici relativi al II Confronto – Parte I : Maintenance

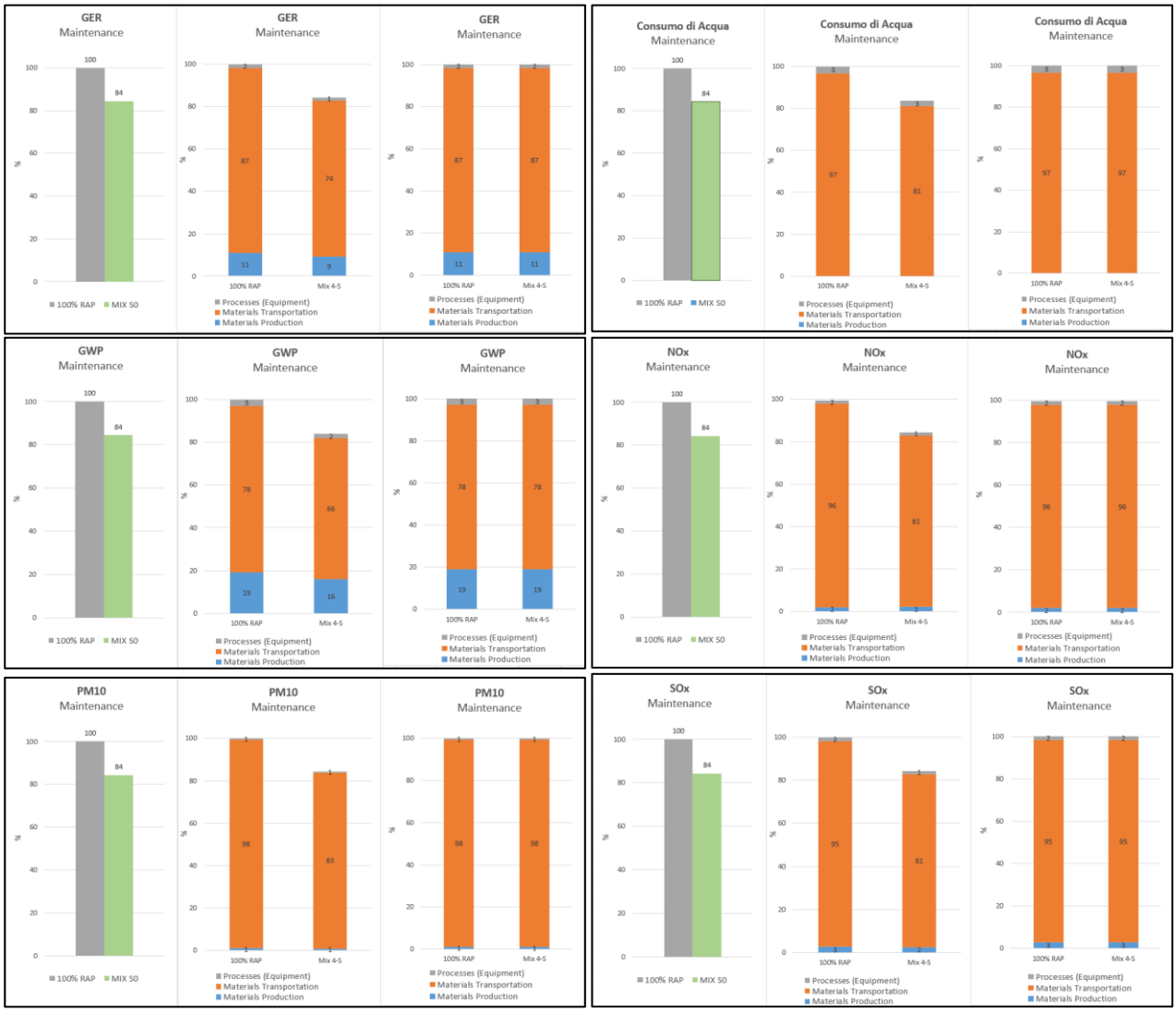


Figura 4.5 - II Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte I : Maintenance (parte 1)

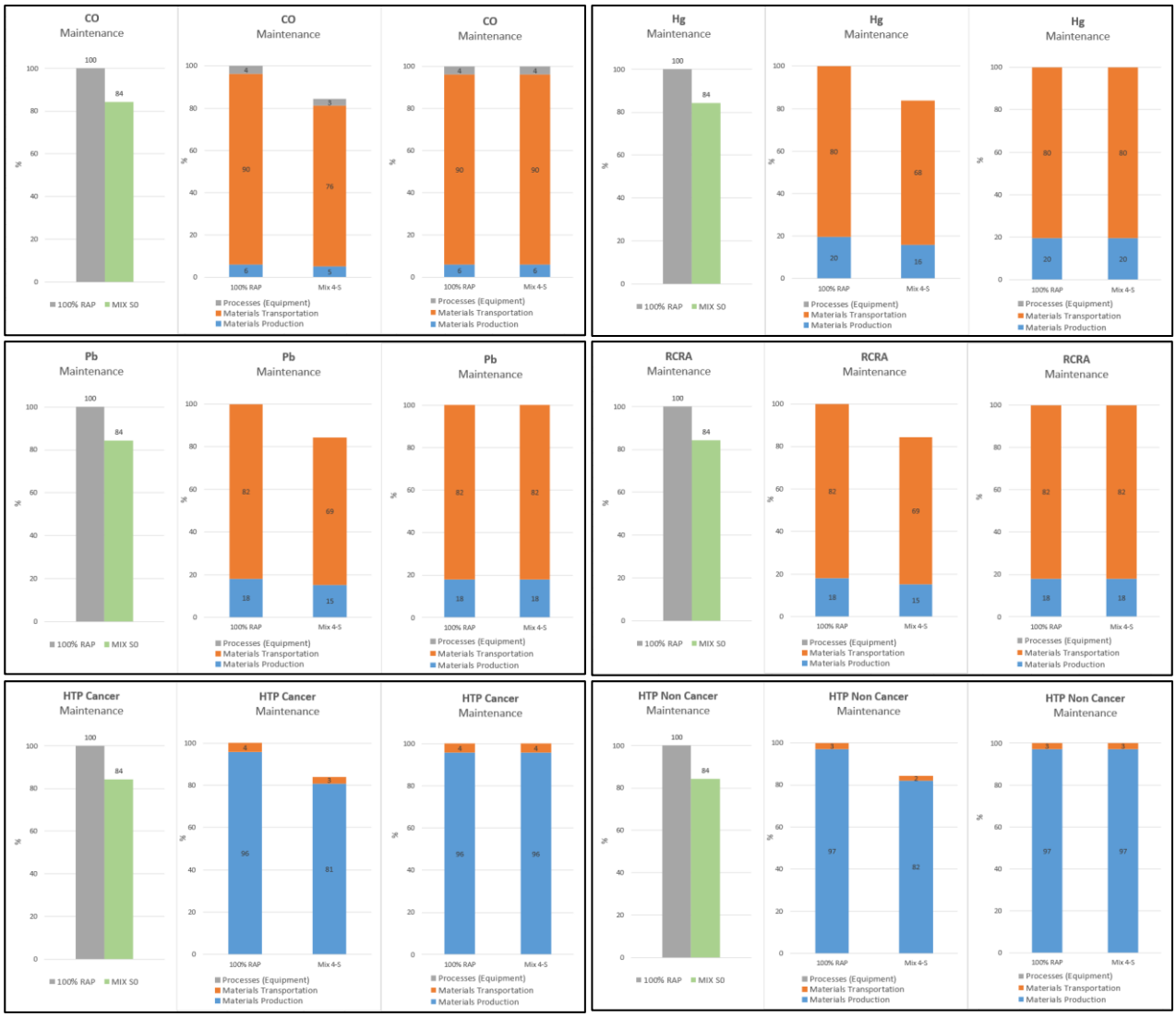


Figura 4.6 - Il Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte I : Maintenance (parte 2)

Esaminando le Fig. 5.5 e 5.6 e focalizzando l'attenzione sul primo dei grafici forniti per ogni inquinante, si nota come, la differenza tra l'impatto ambientale fornito dalle due miscele rimane sempre costante, indipendentemente dal tipo di inquinante considerato. Questo risultato è dovuto in buona parte al processo di funzionamento dell'applicativo. Nel foglio di lavoro relativo alla fase di manutenzione, infatti, non sono richiesti il numero di cicli di manutenzione o il tipo di riparazioni da effettuare, ma soltanto il volume di RAP necessario per eseguirli. Posto questo e il fatto che per entrambe le miscele sono stati utilizzati gli stessi macchinari, l'unico parametro di input variabile è il volume di RAP utilizzato. In definitiva la discrepanza riportata in Eq.(5.1) è imputabile agli 81,02 m³ in meno utilizzati nel caso studio Mix 4-S e descritti in Eq. (5.2).

$$\Delta\,[\%] = 100\%RAP\,[\%] - Mix\ 4-S\,[\%] = 100\,[\%] - 84\,[\%] = \mathbf{16}\,\% \qquad (5.1)$$

$$\Delta = 100\%RAP\,[m^3] - Mix_{4-S}\ [m^3] = 513,10\,[m^3] - 432,08\ [m^3] = \mathbf{81,02}\ \boldsymbol{m^3} = \mathbf{105,96}\ \boldsymbol{yd^3} \qquad (5.2)$$

Allo stesso modo, l'utilizzo degli stessi macchinari si ripercuote anche sulle informazioni fornite dal terzo grafico. Per ogni inquinante, infatti, il contributo fornito dalle unità di processo relative alla produzione/trasporto dei materiali e alle attività di cantiere, risulterà essere ripartito nel medesimo modo per entrambe le miscele.

Globalmente è possibile notare come per 10 inquinanti sui 12 totali riportati, l'unità di processo che contribuisce maggiormente alle emissioni nella fase di manutenzione è relativa al trasporto del RAP in cantiere. Mentre per gli altri due inquinanti, HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer,}$ le emissioni preponderanti si verificano nella fase di frantumazione del RAP. Inoltre, per tutte le attività svolte in cantiere, le emissioni di Hg, Pb, RCRA, HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer}$ risultano essere trascurabili.

4.2.2 Parte II : Initial Construction & Maintenance

Un'interpretazione completa dei risultati, in accordo con l'approccio Cradle to the End imposto, è stata effettuata analizzando l'impatto complessivo generato dall'unione delle fasi di costruzione e manutenzione analizzate nei precedenti paragrafi.

In Fig. 5.7 è stata fornita una legenda utile per l'interpretazione dei grafici forniti per ogni inquinante e riportati in Fig. 5.8.

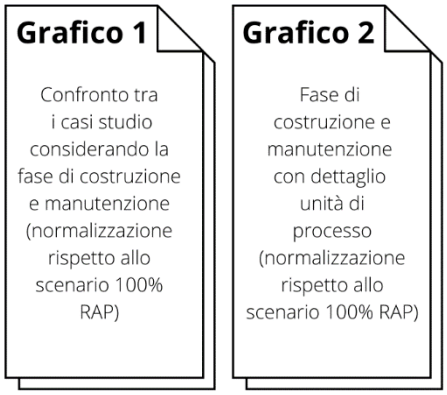


Figura 4.7 - Interpretazione dei grafici relativi al II Confronto – Parte II : Initial Construction & Maintenance

Osservando il primo grafico proposto per ognuno degli inquinanti riportati in Fig. 5.8, si nota come nello studio del ciclo di vita di una pavimentazione ,dalla produzione dei materiali alla fine dell'utilizzo della strada, l'utilizzo della miscela Mix 4-S risulta essere sempre svantaggiosa rispetto ad una 100%RAP.

Focalizzandosi invece, sul secondo grafico fornito per ogni inquinante e riportato sempre in Fig. 5.8, si nota come il contributo d'impatto ambientale preponderante per la miscela Mix 4-S è stato generato in tutti i casi, dalla fase di costruzione della miscela. Per alcuni inquinanti, l'apporto dovuto alla fase di Initial Construction è risultato così elevato da rendere quasi trascurabile il contributo dovuto alla fase di manutenzione come accade per il consumo di acqua e per le emissioni dovute agli HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer.}$ Tale discrepanza è dovuta non solo all'utilizzo di materiali molto impattanti come l'emulsione bituminosa, ma anche ai processi di miscelazione mediante pala e blender i quali risultano assenti se si utilizza una miscela contenente solo fresato bituminoso.

Anche per quanto riguarda la miscela 100%RAP la fase preponderante, in termini di impatti ambientali generati, è determinata dalla fase di costruzione della pavimentazione.

In conclusione, nell'ottica di valutazione ambientale, la miscela 100%RAP risulta essere conveniente rispetto alla miscela Mix 4-S per tutti gli inquinanti analizzati. Nello specifico è vantaggiosa per quanto riguarda i consumi di energia, le emissioni di GWP, NOx, PM10, SOx e CO ed è in grado di abbattere notevolmente gli impatti relativi al consumo di acqua e alle emissioni di Hg, Pb, RCR, HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer}$.

Figura 4.8 - II Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte II : Initial Construction & Maintenance

CONCLUSIONI

La ricerca di soluzioni sempre più mirate alla sostenibilità ambientale ed economica è diventato uno degli aspetti su cui fondare la progettazione ed il processo costruttivo delle attuali infrastrutture viarie. In particolare, la costruzione della sovrastruttura stradale ha sempre più frequentemente visto l'adozione di soluzioni sostenibili mediante l'apporto di materie prime secondarie in ragione di materiali vergini, senza penalizzare le caratteristiche funzionali e strutturali che la sovrastruttura stessa dovrà garantire nel corso della propria vita di servizio.

Tra le materie prime secondarie, quella più diffusamente impiegata nella costruzione delle strade è il fresato bituminoso. Infatti, il riciclaggio del fresato bituminoso, genera importanti vantaggi tecnici, economici e ambientali. Tra gli altri materiali di riciclaggio che possono essere riutilizzati nella produzione di miscele per le costruzioni stradali vi sono i fanghi di segagione (sludge), ovvero il materiale granulare fine residuo dalle operazioni di frantumazione e lavaggio degli inerti provenienti da cava o da attività estrattiva. Alcuni studi preliminari hanno dimostrato la possibilità di riutilizzo di tale materiale all'interno di conglomerati bituminosi tradizionali, in sostituzione del filler, e in miscele cementizie "fluide" e "auto-compattanti".

Le attuali tecniche di produzione dei conglomerati bituminosi seguono le tradizionali metodologie "a caldo", "tiepide" e "a freddo". Quest'ultima è sicuramente quella più vantaggiosa nell'ottica della sostenibilità ambientale poiché non è necessario portare ad elevate temperature i materiali e, molto spesso, è realizzata in situ, riducendo, di conseguenza, le emissioni nocive legate al trasporto dei materiali.

Attraverso un precedente lavoro di tesi magistrale condotto nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, sono state studiate alcune delle miscele innovative per strade secondarie a basso volume di traffico, con le quali coniugare gli aspetti di sostenibilità tecnica, ambientale ed economica. Da un punto di vista tecnico, le miscele sono state confezionate con elevate quantità di fresato bituminoso e sludge (> 90 %), sabbia ed emulsione bituminosa. Da un punto di vista economico, sono state sviluppate miscele ad elevata lavorabilità, tali da richiedere ridotte e poco costose lavorazioni di messa in opera. Infine, l'aspetto di sostenibilità ambientale ha riguardato l'utilizzo di elevate quantità di materie prime secondarie in miscele prodotte a freddo e la minimizzazione dei processi in cantiere, dalla produzione delle miscele alla compattazione.

L'analisi di quest'ultimo aspetto è stato l'obiettivo di questo lavoro di tesi. Infatti, la valutazione della sostenibilità ambientale è stata condotta sull'intero ciclo di vita della miscela innovativa denominata Mix4-S. Lo studio ha seguito il corrente approccio di Life Cycle Assessment (LCA), in accordo alla normativa europea EN 14044, ed è stato impiegato il l'applicativo PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) sviluppato dal *Consortium on Green Design and Manufacturing* della University of California-Berkeley.

In una prima fase, è stato analizzato PaLATE, deducendo i principi di funzionamento per il calcolo degli impatti e i vari fogli di lavoro sono stati personalizzati in base alle esigenze del presente lavoro. È stata condotta, inoltre, un'approfondita analisi dell'inventario esistente, seguita da un aggiornamento dei valori numerici rispetto ai materiali e alle lavorazioni considerate. Sostenendo i molteplici aspetti positivi dell'applicativo, primi su tutti la gratuità e la trasparenza dei processi di calcolo, sono state riscontrate delle anomalie, poi accuratamente sistemate.

Entrando nel merito dello studio di LCA, gli impatti del ciclo di vita della miscela Mix 4-S sono stati confrontati con altre due miscele, ipotizzate come rappresentative dello stato corrente con cui sono realizzate le sovrastrutture delle strade di servizio a basso volume di traffico. La prima è costituita da 100 % di fresato bituminoso (100%RAP) mentre la seconda da 100 % aggregati vergini (100%Aggregati).

Sono stati realizzati due confronti, considerando due approcci:

- *cradle to gate*, per tutte le miscele, ove sono stati considerati tutti i processi, dalla produzione delle materie prime (vergini e secondarie) fino alla costruzione della strada. L'unità funzionale scelta è stata 1 km di sviluppo della pavimentazione;
- *cradle to the end*, per la miscela Mix4-S e 100%RAP, in cui sono stati considerati i processi che vanno dalla produzione dei materiali fino al termine della vita utile della pavimentazione, considerando anche la manutenzione (eseguita mediante l'utilizzo di fresato bituminoso, effettuando opere di rifacimento dello strato nel primo caso e rifacimento e riparazione buche, nel secondo). L'unità funzionale scelta è stata 1 km di sviluppo della pavimentazione nella durata della vita di servizio della strada posta pari a dieci anni.

Gli indicatori utilizzati per valutare gli impatti sono il Gross Energy Requirement (GER), il consumo di acqua, il Global Warming Potentials (GWP), NO_x, SO_x, CO, Hg, Pb, RCRA Hazardous Waste Generated, e Human Toxicity Potentials (HTP) cancerogeni e non cancerogeni.

Per quanto riguarda PaLATE, è risultato esaustivo da un punto di vista dei risultati forniti e funzionale in termini di manipolazione dei processi. Infatti, garantisce un'elevata trasparenza dei processi utilizzati e ne agevola le modifiche quando è necessario mantenere la conformità con i processi produttivi analizzati. Permette quindi, di creare uno studio quanto più variabile e originale possibile.

Procedendo con l'interpretazione dei dati forniti dall'applicativo, dal primo confronto eseguito per tutti e tre i casi studio mediante l'approccio *cradle to gate*, è emerso che:

- il vantaggio ambientale proveniente dall'utilizzo della miscela Mix 4-S, risulta compromesso dall'utilizzo di un materiale misto granulare non legato di primo impiego per lo strato di fondazione. Si nota infatti come il vantaggio atteso in ragione dell'utilizzo di materiali, che non necessitano processi di lavorazione delle materie prime come RAP e sludge, sia stato compromesso dall'utilizzo di aggregati vergini nello strato di fondazione. Osservando i risultati forniti da PaLATE, soltanto 5 inquinanti su 12 riportano un effettivo vantaggio ambientale rispetto alla miscela 100% Aggregati posta come riferimento. In particolare, NOx e PM10 presentano dei lievi vantaggi in termini di emissioni mentre, consumo di acqua e agli HTP cancerogeni e non cancerogeni, riportano dei valori notevolmente inferiori;
- Il ridotto consumo atteso in termini energetici e di emissioni dovuti, ad esempio, all'utilizzo di miscelazioni a freddo piuttosto che a caldo, sono state pregiudicate dall'utilizzo dell'emulsione bituminosa i cui contributi inquinanti sono risultati essere i più alti tra tutti i materiali utilizzati all'interno del Mix 4-S e del 100%RAP.
- Nonostante la presenza del misto granulare e dell'emulsione, il Mix 4-S è in grado di abbattere notevolmente i consumi di acqua rispetto alla miscela 100%Aggregati ed è sempre vantaggioso in termini di emissioni tossiche sia cancerogene che non cancerogene;

Per quanto riguarda il secondo confronto, eseguito per il caso studio Mix 4-S e 100%RAP con un approccio cradle to the end, oltre a fornire una conferma di quanto osservato nel primo confronto, è stato possibile notare che:

- La fase di manutenzione risulta esser trascurabile rispetto alla fase di costruzione in termini di valutazione dell'impatto ambientale. È stato notato, infatti, come il contributo in termini di emissioni nocive generate durante le opere di manutenzione, sia risultato minimo, rispetto alle emissioni generate durante la fase di costruzione. Complessivamente è possibile notare come per 10 inquinanti sui 12 totali forniti da PaLATE, l'unità di processo che contribuisce maggiormente alle emissioni nella fase di manutenzione è relativa al trasporto del fresato in cantiere. Mentre, per gli altri due inquinanti, HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer}$, le emissioni preponderanti si verificano nella fase di frantumazione del RAP per mezzo del mulino. Inoltre, per tutte le attività svolte in cantiere, le emissioni di Hg, Pb, RCRA, HTP_{Cancer} e $HTP_{Non\ Cancer}$ risultano essere trascurabili.
- Sebbene la miscela 100%RAP sia stata trovata efficace nell'ottica dell'abbattimento di emissioni nocive e dei consumi di acqua ed energia, tali vantaggi sono controbilanciati da continui dissesti del manto superficiale e dalla necessità di una manutenzione ricorrente.

Alla luce di quanto appreso, si può affermare che la totale sostenibilità di una pavimentazione avente le caratteristiche descritte all'interno del caso studio Mix 4-S necessita di ulteriori studi di LCA all'interno del quale sia prevista, ad esempio, la sostituzione del misto granulare non legato dello strato di fondazione con un materiale riciclato. Inoltre, avendo appurato l'importanza rivestita dall'emulsione bituminosa nel quadro totale delle emissioni nocive, studi futuri potrebbero orientarsi verso la ricerca di leganti alternativi a ridotto impatto ambientale.

In conclusione, ulteriori studi di LCA sulla sostenibilità del Mix 4-S potrebbero essere effettuati mediante software commerciali, come ad esempio SimaPro, con l'obiettivo di comprendere meglio il funzionamento dell'applicativo PaLATE e renderlo più performante.

Bibliografia

[1] A. Stiraparo, E. Santagata, D. Dalmazzo, P. P. Riviera e L. Urbano, «Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali,» Torino, A.A. 2018-2019.

[2] RMRC, «Recycled Materials Resource Center,» 2020. [Online]. Available: https://rmrc.wisc.edu/palate/.

[3] R. Nathman, S. McNeil e T. J. Van Dam, «Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision-Making Toolbox,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* vol. 2039, n. 1, pp. 40-49, January 2009.

[4] K. Del Ponte, B. M. Natarajan, A. P. Ahlman, A. Baker, E. Elliot e T. B. Edil, «Life-Cycle Benefits of Recycled Material in Highway Construction,» *Transportation Research Board,* vol. 2628, n. 1, pp. 1-11, 2017.

[5] A. Farina, M. Zanetti, E. Santagata, G. Blengini e M. Lanotte, «Life Cycle Assessment of Road Pavements containing Crumb Rubber from End-of-Life Tires.,» in *International Sumposium on Pavement Life Cycle Assessment*, Davis, California , USA, 2014.

[6] Y.-Y. Lin, «Eco-decision Making for Pavement Construcution Projects,» Washington, 2012.

[7] C. M. University, «Economic Input-Output Life Cycle Assessment,» Maggio 2020. [Online]. Available: http://www.eiolca.net/.

[8] C. Cao, «21 - Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction,» in *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Mizi Fan, Feng Fu, 2017, pp. 529-544.

[9] C. M. University, «Use the Tool,» [Online]. Available: http://www.eiolca.net/cgi-bin/dft/use.pl. [Consultato il giorno Giugno 2020].

[10] U. S. Census Bureau, «North American Industry Classification System,» [Online]. Available: https://www.census.gov/eos/www/naics/. [Consultato il giorno Luglio 2020].

[11] Executive Office of the President of the United States, North American Industry Classification System, 2017, p. 963.

[12] G. Cicas, H. S. Matthews e C. Hendrickson, «The 1997 benchmark version of the Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) Model,» 2006, p. 41.

[13] R S Means Company, Means Building Construction Cost Data, 8th a cura di, R S Means Company, 1995.

[14] United States government, «The Origins of EPA,» EPA (United States Environmental Protection Agency), [Online]. Available: https://www.epa.gov/history/origins-epa. [Consultato il giorno 1 Settembre 2020].

[15] Environmental Protection Agency, «Source Classification Codes (SCCs),» [Online]. Available: https://ofmpub.epa.gov/sccwebservices/sccsearch/. [Consultato il giorno 1 Settembre 2020].

[16] Environmental Protection Agency, «Welcome to WebFire,» EPA (Environmental Protection Agency), Settembre 2020. [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/webfire/.

[17] Environmental Protection Agency, «Emission Factor Search,» EPA (Environmental Protection Agency), [Online]. Available: https://cfpub.epa.gov/webfire/SearchEmissionFactor/searchpage.cfm. [Consultato il giorno Settembre 2020].

[18] Environmental Protection Agency, AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Fifth a cura di, vol. I, New York City, United States: EPA (Environmental Protection Agency), 1995, p. 1998.

[19] Environmental Protection Agency, «Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing,» in *AP42 - Compilation of Air Emissions Factors*, Fifth Edition a cura di, vol. I, 2004.

[20] Environmental Protection Agency, «Gasoline and Diesel Industrial Engines,» in *AP42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, vol. Section 3.3, Morrisville, North Carolina, 1996, p. 74.

[21] Environmental Protection Agency, «Hot Mix Aphalt Plants,» in *AP42 - Compilation of Air Emissions Factors*, Fifth Edition a cura di, vol. Section 11.1, 2004.

[22] E. G. Hertwich, S. F. Mateles, W. S. Pease e T. E. McKone, «Human Toxicity Potentials for Life-Cycle Assessment and Toxics Release Inventory Risk Screening,» *Enivornmental Toxicology and Chemistry,* vol. 20, n. 4, pp. 928 - 939, 2001.

[23] A. Morse, P. T. Nash e S. Senadheera, «Environmental Characteristics of Traditional Construction and Maintenance Materials : Finale Report,» Lubbock , Texas, 2001.

[24] Environmental Protection Agency, «Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust,» Washington, DC, 2002.

[25] M. A. Williams, C. Salice e G. Reddy, «Wildlife Toxicity Assessment,» in *Wildlife Toxicity Assessment for Chemicals of Military Concern*, 2015, pp. 421 - 437.

[26] S. C. Davis e S. W. Diegel, Transportation Energy Data Book, 22 a cura di, O. R. N. Laboratory, A cura di, Oak Ridge, Tennessee, 2002, p. 351.

[27] Environmental Protection Agency, «Environmental Topics,» [Online]. Available: https://www.epa.gov/environmental-topics. [Consultato il giorno 1 Agosto 2020].

[28] ARPA Lombardia, «PM10 e PM2,5,» [Online]. Available: https://www.arpalombardia.it/Pages/Aria/Inquinanti/PM10-PM2,5.aspx?firstlevel=Inquinanti. [Consultato il giorno 5 Ottobre 2020].

[29] European Asphalt Pavement Association, «Asphalt the 100% recyclable construction product,» Brussels, Belgium, 2014.

[30] V. Antunes, A. Freire e J. Neves, «A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling,» *Construction and Building Materials,* vol. 211, p. 17, 2019.

[31] F. Moreno, M. Rubio e M. Martinez-Echevarria, «Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes,» *Construction and Building Materials,* vol. 25, n. 5, pp. 2465 - 2471, 2011.

[32] E. Santagata, L. Tsantilis, O. Baglieri, G. Chiappinelli e P. P. Riviera, «Re-use in asphalt pavements of fillers from natural stone sawmilling sludge,» in *Transport Infrastructure and Systems*, Roma, Italia, 2017, pp. 371-378.

[33] S. W. Goh, Z. You e T. Van Dam, «Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt,» in *Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, 2014.

[34] S. Jain e B. Singh, «Cold mix asphalt: An overview,» *Journal of Cleaner Production,* vol. 280, 2021.

[35] H. Stripple, «Life Cycle Assessment of Road,» Gothenburg, Sweden, 2001.

[36] J. P. C. Araújo, J. R. Oliveira e H. M. Silva, «The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* vol. 32, pp. 97 - 110, 2014.

[37] N. J. Santero, E. Masenet e A. Horvath, «Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review,» *Resources, Conservation and Recycling,* n. 55, pp. 801-809, 2011.

[38] C. Berry e S. McCarthy, «Guide to sustainable procurement in construction,» CIRIA, Londra, 2011.

[39] European Bitume Association, «The Eurobitume Life Cycle Inventory for Bitumen,» Bruessels, Belgium, 2020.

[40] E. Garbarino, G. A. Blengini e A. Piacenza, «Pianificazione e gestione dei rifiuti da C&D nella Provincia di Torino,» Torino, 2009.

[41] MEDEA Ambiente, «Eco-Profilo,» [Online]. Available: http://www.medeaambiente.it/s/glossario/eco-profilo/. [Consultato il giorno 20 Ottobre 2020].

[42] A. Farina, M. C. Zanetti, E. Santagata e G. A. Blengini, «Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement,» *Resources, Conservation and Recycling,* n. 117, pp. 204-212, 2017.

[43] G. A. Blengini e E. Garbarino, «Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix,» *Journal of Cleaner Production,* n. 18, pp. 1021-1030, 2010.

[44] European Bitumen Association, «Eurobitume,» Brussels, Belgium, 2012.

[45] M. L. Marceau, M. A. Nisbet e M. G. VanGeem, «Life cycle inventory of Portland Cement Manufacture,» Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2006.

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

[47] 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.

[48] Google, «Google Maps,» [Online]. [Consultato il giorno 22 Ottobre 2020].

[49] Google, «Google Earth,» [Online]. [Consultato il giorno 22 Ottobre 2020].

[50] DM Industries, «Mobile heavy duty screening station (crawler type),» [Online]. Available: https://xposure.pl/PRODUCT/Mobile_crusher_station/Mobile_heavy_duty_screening_station__crawler_type_.html. [Consultato il giorno 1 Novembre 2020].

[51] G. Borghi, S. Pantini e L. Rigamonti, «Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology,» *Waste Management,* vol. 80, pp. 423 - 434, 2018.

[52] Blend, «Impianti Mobili,» [Online]. [Consultato il giorno 1 Novembre 2020].

[53] C. Celauro, F. Corriere, M. Guerrieri e B. Lo Casto, «Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road,» Palermo, Italy, 2014.

[54] A. Hüseyin , C. Gürer, S. Çetin e A. Elmacı, «Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures,» *Construction and Building Materials,* vol. 36, p. 7, 2012.

Indice delle Figure

Figura 2.1 – Interfaccia utente (applicativo EIO-LCA) 9
Figura 2.2- Scelta dei modelli (applicativo EIO-LCA) 10
Figura 2.3- Lista dei settori industriali (applicativo EIO-LCA) 10
Figura 2.4- Lista dei rami d'interesse (applicativo EIO-LCA) 11
Figura 2.5 – NAICS sectors (applicativo EIO-LCA) 11
Figura 2.6- Informazioni sugli NAICS sectors (applicativo EIO-LCA) 12
Figura 2.7 – Lista delle Categorie (applicativo EIO-LCA) 13
Figura 2.8 – Tabella dei risultati (EIO-LCA) 13
Figura 2.9 – Sector Table (g/$) 14
Figura 2.10 – Sector Table (g/ton) 15
Figura 2.11 - Valori di PM10 in PaLATE 16
Figura 2.12 - Dettagli sui fattori di Emissione (applicativo WebFIRE) 17
Figura 2.13 – Valori di PM10 in kg/Mg 18
Figura 2.14 – Valori di PM10 in lb/short ton 18
Figura 2.15 – Valori aggiornati di PM10 19
Figura 2.16 - Fattori di emissione motori diesel 20
Figura 2.17 - Fattori di emissione dei motori a diesel e benzina (AP 42) 20
Figura 2.18- Fattori di emissione per gli impianti di produzione dell'HMA (PaLATE) 21
Figura 2.19- Emissioni di PM10 per un Uncontrolled Batch-mix 22
Figura 2.20 – Emissioni di CO, CO_2, Nox e SO_2 per un Uncontrolled Batch-mix 22
Figura 2.21- Concentrazione media di arsenico espressa in parti per miliardo 24
Figura 2.22 - Concentrazione media di piombo espressa in parti per miliardo 24
Figura 2.23 – Potenziali di tossicità umana legati alle operazioni di trasporto 25
Figura 2.24 –Passaggi necessari alla definizione degli impatti in PaLATE 26
Figura 2.25- Foglio di lavoro 'Initial Construction' 31
Figura 2.26 - Consumo di Acqua all'interno della Sector Table 54
Figura 2.27 - Calcolo del Consumo di Acqua in EMF Transport 54
Figura 3.1 - Vantaggi economici e ambientali del fresato bituminoso 60
Figura 3.2 - Processi di riciclaggio a freddo in impianto (a) e in sito (b) [7] 62
Figura 4.1- LCI per la produzione di 1 tonnellata di bitume [38] 72
Figura 4.2 - Eco-profilo degli Aggregati Naturali (AN) e degli Aggregati Riciclati (AR) [39] 74
Figura 4.3 - LCI per la produzione di 1 tonnellata di emulsione bituminosa [43] 76
Figura 4.4 - Emissioni generate dalla produzione di una tonnellata corta di cemento 78
Figura 4.5 - LCI per la fornitura d'acqua 79
Figura 4.6 - Strada secondaria dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia [48] 82
Figura 4.7 - Tracciato strada di servizio dell'A32 Torino-Bardonecchia [49] 82
Figura 4.8 - Stratigrafia di progetto della strada di servizio [1] 83
Figura 4.9 - Macchinari utilizzati nel processo di produzione della miscela Mix 4-S e della costruzione stradale 85
Figura 4.10 - Distanza di trasporto impianto – cantiere 92
Figura 4.11 – Risultati ambientali relativi al caso studio Mix 4 – S 110
Figura 4.12 – GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio Mix 4 – S 111
Figura 4.13 – Macchinari utilizzati per la produzione della miscela 100%RAP e della costruzione stradale 112
Figura 4.14 – Risultati ambientali relativi al caso studio 100% RAP 116
Figura 4.15 - GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio 100%RAP 116
Figura 4.16 - Macchinari utilizzati per la produzione della miscela 100% Aggregati e della costruzione stradale 117
Figura 4.17 - Risultati ambientali relativi al caso studio 100% Aggregati Vergini 121
Figura 4.18 -- GER, Consumo di Acqua e GWP per il caso studio 100%Aggregati 121
Figura 5.1 – Interpretazione dei grafici relativi al I Confronto 124
Figura 5.2 I Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE (parte 1) 124
Figura 5.3 - I Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE (parte 2) 125
Figura 5.4 - Interpretazione dei grafici relativi al II Confronto – Parte I : Maintenance 128
Figura 5.5 - II Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte I : Maintenance (parte 1) 128
Figura 5.6 - II Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte I : Maintenance (parte 2) 129

Figura 5.7 - Interpretazione dei grafici relativi al II Confronto – Parte II : Initial Construction & Maintenance _____ 130
Figura 5.8 - II Confronto tra gli inquinanti forniti da PaLATE – Parte II : Initial Construction & Maintenance_____ 131

Indice delle Tabelle

Tabella 2.1 - Confronto tra gli impatti forniti da PaLATE e SimaPRO 7
Tabella 2.2 -Valori corretti di PM10 18
Tabella 2.3 - Caratteristiche geometriche della strada 27
Tabella 2.4 - Composizione delle miscele e quantità di materiali impiegati 28
Tabella 2.5 - Quantità e distanze di trasporto dei materiali utilizzati 28
Tabella 2.6 – Masse volumiche e volumi dei materiali costituenti gli strati della sovrastruttura stradale 30
Tabella 2.7 - Distanze di trasporto dei materiali 31
Tabella 2.8 – Consumo di carburante e macchinari impiegati per la costruzione 32
Tabella 2.9 - Macchinari selezionati in PaLATE 32
Tabella 2.10 - Confronto tra i valori corretti di PaLATE e SimaPRO 57
Tabella 4.1- Dosaggi relativi di RAP, Sludge e Sabbia nelle miscele 84
Tabella 4.2 - Caratteristiche geometriche della strada di servizio 86
Tabella 4.3 - Massa volumica delle miscele innovative 87
Tabella 4.4 - MVA di RAP, Sludge e Sabbia 88
Tabella 4.5 - Percentuali di RAP, Sludge e Sabbia 88
Tabella 4.6- Percentuali di acqua ed emulsione sul peso di aggregato 89
Tabella 4.7 – Umidità per ogni frazione determinata in laboratorio 90
Tabella 4.8 -Masse volumiche del misto granulare non legato 91
Tabella 4.9 - Distanze di trasporto relative ai singoli materiali 92
Tabella 4.10 - Inventario macchinari 93
Tabella 4.11 - Inventario mezzi di trasporto 93
Tabella 4.12 – Caratteristiche geometriche della strada di servizio 113
Tabella 4.13 – Masse volumiche del fresato bituminoso 114
Tabella 4.14 – Masse volumiche degli inerti 118
Tabella 5.1 Volumi di RAP necessari per i cicli di manutenzione 127