



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A. A. 2021/2022

Sessione di Laurea Marzo 2022

Confronto tra applicativi “open source” per l’analisi di Life Cycle Assessment di una pavimentazione stradale flessibile

Comparison between “open source” tools for Life Cycle Assessment analysis of a
flexible road pavement

Relatori:

Prof. Ezio Santagata
Ing. Lucia Tsantilis
Ing. Pierpaolo Riviera
Ing. Leonardo Urbano

Candidato:

Edoardo Castelletto

INDICE

1. Introduzione	3
2. LCA (Life Cycle Assessment)	5
2.1 Normativa di riferimento: Serie ISO 14040	6
2.2 Ciclo di vita (LCA) di una pavimentazione stradale	7
2.2.1 Fasi di un LCA di una pavimentazione	7
2.2.2 Scelte metodologiche	9
2.3 Carbon Footprint	10
3. Definizione del caso studio	12
3.1 Materiali	12
3.1.1 Bitume	13
3.1.2 Conglomerato bituminoso.....	13
3.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali.....	15
3.2.1 Strato di usura	15
3.2.2 Strato di collegamento (binder)	15
3.2.3 Strato di base.....	16
3.2.4 Strato di fondazione	16
4. Descrizione applicativi per analisi LCA	18
4.1 PaLATE	18
4.2 asPECT.....	27
4.3 ECORCE M.....	37
4.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	44
5. Descrizione e applicazione dei modelli matematici	49
5.1 Produzione delle materie prime e delle miscele bituminose.....	49
5.1.1 PaLATE	50
5.1.2 asPECT.....	57
5.1.3 ECORCE M.....	71
5.1.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	82
5.2 Trasporto delle materie prime e delle miscele bituminose	86
5.2.1 PaLATE	87
5.2.2 asPECT.....	102
5.2.3 ECORCE M.....	121
5.2.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	130
5.3 Mezzi di cantiere	135
5.3.1 PaLATE	135

5.3.2 asPECT.....	144
5.3.3 ECORCE M.....	150
5.3.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	159
6. Inventario dei dati di input	163
6.1 Dati di input per la produzione dei materiali	163
6.1.1 PaLATE ed ECORCE M	163
6.1.2 asPECT.....	165
6.1.3 Athena Impact Estimator for Highways.....	166
6.2 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative alla produzione dei materiali	167
6.3 Dati di input per il trasporto dei materiali.....	174
6.3.1 PaLATE	175
6.3.2 ECORCE M.....	177
6.3.3 asPECT.....	178
6.3.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	180
6.4 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative al trasporto dei materiali	180
6.5 Dati di input per l'uso dei mezzi di cantiere	190
6.5.1 PaLATE	191
6.5.2 ECORCE M.....	193
6.5.3 asPECT.....	195
6.5.4 Athena Impact Estimator for Highways.....	196
6.6 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative all'uso dei mezzi di cantiere	198
7. Conclusioni	204
Bibliografia	207
Indice delle figure	210
Indice delle tabelle.....	216

1. Introduzione

Le pavimentazioni stradali presentano oneri ambientali associati alla propria costruzione, manutenzione ed utilizzo. Allo stesso tempo il concetto di sostenibilità ambientale sta assumendo sempre maggiore importanza all'interno dei contesti sociali e politici a livello mondiale. Per tale motivo è crescente la richiesta di pavimentazioni stradali che soddisfino il requisito di sostenibilità ambientale.

La metodologia del *Life Cycle Assessment* (LCA), ovvero l'analisi del ciclo di vita di una pavimentazione stradale, è in grado di fornire informazioni quantitative sulle prestazioni ambientali ed energetiche della generica pavimentazione oggetto di studio, considerando tutti i processi di produzione delle materie prime e composite, trasporto e costruzione per meglio comprendere e, di conseguenza, ridurre gli impatti ambientali di un sistema.

Esiste tuttavia una varietà di tool in grado di condurre un'analisi di LCA di una pavimentazione stradale, i quali presentano numerose differenze tra loro. Gli applicativi disponibili, infatti, coprono diverse fasi e processi del ciclo di vita di una pavimentazione, prendendo in considerazione differenti problemi ambientali e servendosi di modelli matematici con distinti livelli di precisione all'interno delle unità funzionali e dei confini di sistema scelti. Si incorre pertanto in dati di inventario derivanti da ricerche globali, nazionali o regionali/locali, che rendono l'analisi specifica ad un certo contesto temporale e spaziale e quindi non confrontabile o riconducibile ad altri contesti. Sono differenti, inoltre, i livelli di interazione con cui possono interfacciarsi gli utenti ed alcuni applicativi permettono di utilizzare solo i processi ed i dati predefiniti, mentre altri di essi consentono agli utenti di utilizzare i propri dati, scegliendo il database opportuno alle caratteristiche del caso di studio trattato o, in alternativa, consentono di modificare i database esistenti a seconda delle esigenze.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi strumenti per l'analisi di LCA, volti al computo degli impatti ambientali ed energetici relativi ad una pavimentazione stradale. Nel presente lavoro, la scelta è ricaduta sul confronto tra applicativi *open source* e *free download*, accessibili quindi alla comunità senza la necessità di particolari licenze presso gli sviluppatori. Nello specifico, gli applicativi considerati all'interno del presente studio ed utilizzati per l'analisi LCA di una pavimentazione stradale flessibile sono:

- **PaLATE** (*PAvement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and economic effects*), realizzato dal *Consortium on Green Design and Manufacturing* dell'Università della California di Berkeley;
- **asPECT** (*ASphalt Pavement Embodied Carbon Tool*), realizzato dal TRL (*Transport Research Laboratory*) in collaborazione con *Highways England, Mineral Products Association & Eurobitume UK*;
- **ECORCE M** (*ECOcompareur Route Construction Entretien*), sviluppato dall'IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux*), nella versione multilingue;
- **Athena Impact Estimator for Highways**, realizzato dall'*Athena Sustainable Materials Institute*.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di evidenziare le potenziali differenze che sussistono tra i quattro applicativi in questione nei risultati di valutazione di impatto del ciclo di vita (*LCIA, Life Cycle Impact Assessment*) di una pavimentazione flessibile con medesima configurazione. Come conseguenza del confronto tra le caratteristiche dei differenti applicativi saranno analizzati gli impatti, le differenze nei database e nell'inventario del ciclo di vita. Questo confronto è svolto nell'ottica futura di potersi appoggiare, da parte del gruppo di ricerca del Politecnico di Torino, Dipartimento di Infrastrutture e Trasporti, ad applicativi tra quelli considerati per l'analisi di LCA delle pavimentazioni stradali differenti da PaLATE, il quale è già utilizzato da diversi anni. Infatti, esiste la necessità di potervi affiancare un altro applicativo che fornisca

risultati di impatto ambientale convergenti con quelli già ottenuti, utilizzando approcci di calcolo differenti e database personalizzabili secondo necessità.

Il presente lavoro di tesi si sviluppa incentrandosi sulla descrizione dei modelli matematici alla base di ciascun applicativo, attraverso i quali sono computati gli impatti ambientali in termini di emissioni di gas serra (equivalentemente definito come cambiamento climatico), seguito da un confronto tra i vari modelli matematici e tra le emissioni ottenute con ciascun applicativo, in modo tale da poter evidenziare quali siano i punti di convergenza ed i punti di rottura e le possibilità di risolvere o meno le problematiche riscontrate.

Il caso studio prevede che la struttura della pavimentazione stradale rifletta quella generica definita per le infrastrutture autostradali e che l'analisi di LCA della pavimentazione stradale sia "*cradle-to-laid*".

Si riporta di seguito una breve descrizione riguardo la struttura del presente lavoro di tesi.

Il **Capitolo 2**, intitolato *LCA (Life Cycle Assessment)*, presenta una descrizione di quello che è il metodo di analisi del ciclo di vita di una pavimentazione stradale, la normativa di riferimento, le fasi considerate all'interno di un generico LCA e quelle considerate all'interno del presente caso studio, le scelte metodologiche ed un approfondimento riguardo al concetto di "*Carbon Footprint*", attraverso la quale si esprime il fenomeno di cambiamento climatico.

Il **Capitolo 3**, denominato *Definizione del caso di studio*, presenta una descrizione del caso di studio analizzato, con particolare attenzione a quella che è la configurazione geometrica della pavimentazione stradale, i materiali utilizzati per la propria costruzione e le caratteristiche meccaniche e volumetriche di ciascuno strato che la costituisce.

Il **Capitolo 4**, denominato *Descrizione applicativi per analisi LCA*, presenta una descrizione dei diversi applicativi utilizzati per l'analisi di LCA della pavimentazione stradale oggetto di studio, in particolare si presenta un background riguardo al funzionamento dei vari applicativi, la definizione dei dati di input per ciascuna fase considerata e la tipologia di risultati in output fornita.

Il **Capitolo 5**, intitolato *Descrizione e applicazione dei modelli matematici*, presenta un'analisi dei modelli matematici utilizzati da ciascun applicativo e per ciascuna fase considerata, con particolare attenzione alle tipologie di dati in input necessari ed all'origine dei dati stessi.

Il **Capitolo 6**, denominato *Analisi dei risultati*, presenta una descrizione di quelli che sono i dati di input a livello numerico utilizzati all'interno di ciascun applicativo, in particolare i dati oggetto di confronto, seguito dal confronto diretto delle emissioni ottenute con ciascuno strumento, sia utilizzando i dati di inventario propri di ognuno, sia utilizzando dati di inventario omogenei, riferiti a quelli utilizzati all'interno di PaLATE.

In conclusione, si presenta un paragrafo all'interno del quale sono presentate le evidenze sperimentali ottenute ed una breve discussione riguardo al conseguimento dell'obiettivo del presente lavoro di tesi.

2. LCA (Life Cycle Assessment)

La Valutazione del Ciclo di Vita (*Life Cycle Assessment – LCA*) è una tecnica di analisi che quantifica gli impatti ambientali di un prodotto durante il proprio ciclo di vita, dalla produzione delle materie prime, passando per la produzione, il trasporto, la messa in opera e lo smaltimento al termine del ciclo di vita stesso (*Huang, Parry, 2014*).

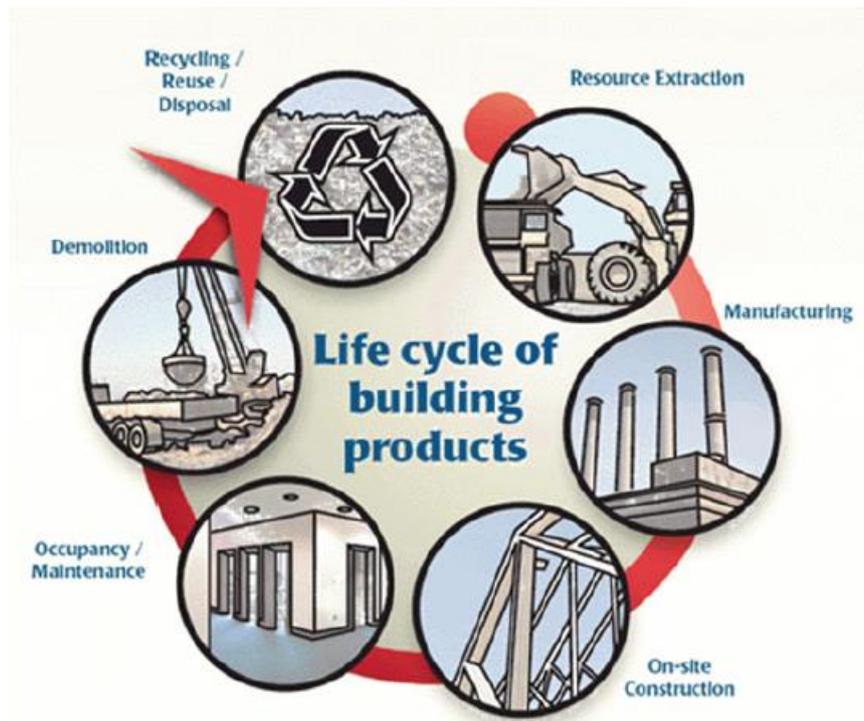


Figura 2.1 – Ciclo di vita di un prodotto da costruzione (*Athena, 2014*)

L'uso della tecnica di *Life Cycle Assessment* è rivolto all'obiettivo di una produzione sostenibile, con particolare attenzione alla valutazione dell'efficienza delle risorse, il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni (*Huang & Parry, 2014*).

La sostenibilità può definirsi secondo quanto emesso dalla Commissione Mondiale sull'Ambiente e Sviluppo (*World Commission on Environment and Development*) nel 1987: "Lo sviluppo sostenibile è lo sviluppo che soddisfa le esigenze del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie necessità". Inoltre, la sostenibilità è descritta come la qualità che riflette l'equilibrio di tre componenti primarie: economica, ambientale ed impatto sociale, che sono spesso denominate collettivamente "*triple-bottom line*". La considerazione di ciascuno di questi fattori è guidata da obiettivi, richieste, caratteristiche, posizione, materiali e vincoli di un dato progetto (*PIARC, 2019*).

A sostegno del tema della sostenibilità esistono tecniche di LCA differenti, in particolare si distinguono le analisi relative al ciclo di vita di un solo prodotto e le analisi comparative, in cui sono posti a confronto due o più prodotti con lo scopo di individuare quale tra essi risulti maggiormente sostenibile a livello di emissioni.

Tra le differenti tipologie di LCA si identificano (*Huang, Parry, 2014*):

- *Life Cycle Assessment basato sui processi*: si analizzano gli input e gli output dei processi individuali, per i quali è fornita una panoramica degli impatti relativi a ciascun processo, in modo tale da poter valutare e quantificare quali processi generano ciascuna emissione.
- *Life Cycle Assessment basato sul rapporto Input-Output*: si basa sulla stima degli impatti ambientali a livello aggregato, ovvero si descrivono gli impatti relativi all'insieme dei processi riguardanti un determinato settore.
- *Life Cycle Assessment comparativo*: questa tipologia di studio presenta i risultati relativi a due o più prodotti che soddisfano le stesse funzioni, in modo tale da poter confrontare gli impatti ed effettuare una scelta in conseguenza di essi. Prerogativa necessaria per questa tipologia di studio è l'uniformità nella qualità dei dati utilizzati e nelle scelte metodologiche effettuate.

A livello normativo, gli standard internazionali riguardanti l'analisi di *Life Cycle Assessment* sono stati definiti nel 1997 ed hanno permesso di monitorare la gestione ambientale da parte di qualsiasi produttore.

2.1 Normativa di riferimento: Serie ISO 14040

La normativa di riferimento per l'analisi LCA è stata redatta dall'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO), al fine di fornire una linea guida unificata per lo sviluppo della metodologia di *Life Cycle Assessment*.

Nello specifico, la normativa individua quattro fasi all'interno di uno studio di LCA, illustrate inoltre all'interno della **Figura 2.2**:

- Definizione dell'ambito e dell'obiettivo: si tratta della prima fase, la quale definisce i confini del sistema, le fonti dei dati di input, l'intervallo di tempo oggetto dell'analisi e le categorie di impatto da valutare;
- Analisi di inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory, LCI): fase nella quale sono raccolti e descritti i dati relativi agli input ambientali (come, ad esempio, materie prime, consumi di energia, indicatori di emissione) ed i dati relativi agli output ambientali (in particolare, inerenti alle emissioni) all'interno del sistema definito in precedenza;
- Analisi degli impatti del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): si valutano i risultati relativi all'analisi di LCI, all'interno della quale si evidenziano un indicatore ed un modello matematico che caratterizzano ciascuna categoria di impatto ambientale;
- Interpretazione: fase finale all'interno della quale espone le conclusioni relative alle analisi di LCI ed LCIA effettuate in precedenza, quali modifiche da poter apportare all'interno di un processo per migliorarne le prestazioni ambientali, oppure le evidenze emerse da un'analisi comparativa.

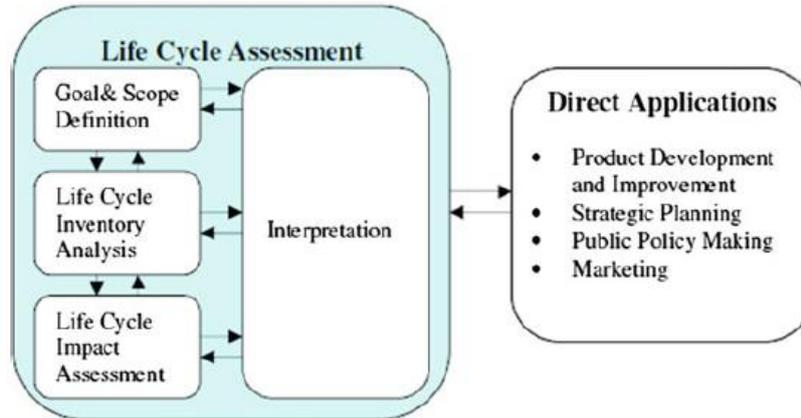


Figura 2.2 – Fasi di LCA (BSI, 2006)

2.2 Ciclo di vita (LCA) di una pavimentazione stradale

Come riportato all'interno di (Huang, Parry, 2014), nel 2005 sono state individuate sei aree di impatto nel contesto della produzione di miscele bituminose all'interno del Regno Unito, sulla base della revisione di alcuni risultati ambientali da parte della *Refined Bitumen Association (RBA)*, della *Quarry Products Association (QPA)* e della *Highway Agency*. In un rapporto pubblicato dal *Transport Research Laboratory (TRL)*, le aree di impatto valutate sono le seguenti:

- Progettazione di pavimentazioni stradali di lunga durata, adottando materiali di qualità e tecniche di manutenzione innovative;
- Favorire il riutilizzo ed il riciclaggio all'interno dei lavori in ambito infrastrutturale;
- Effettuare un'analisi di costo dell'intero ciclo di vita, focalizzandosi sull'intero tempo di vita della pavimentazione, piuttosto che una valutazione dei costi a breve termine. Tale analisi deve riguardare sia la scelta delle materie prime, sia le scelte geometriche relative agli strati strati della pavimentazione, sia il piano di manutenzione ed il livello di servizio da ripristinare, che le operazioni effettuate al termine della vita della pavimentazione;
- Implementare un efficace sistema di gestione ambientale, volto alla riduzione delle emissioni in sito, alla riduzione delle fonti inquinanti ed il volume dei rifiuti, alla riduzione del consumo di acqua ed energia;
- Favorire la salute e la sicurezza all'interno del luogo di lavoro.

In base a tali aree di impatto, nel corso degli anni sta crescendo sensibilmente la scelta nei confronti di materiale riciclato o materiale secondario come materiale per la costruzione di nuove pavimentazioni stradali, affiancata dall'obiettivo di ridurre il "*Carbon Footprint*" (emissioni di anidride carbonica in primis) nella fase di costruzione di una pavimentazione ed il conseguente non aumento della stessa dovuta alle tecniche di riciclaggio e smaltimento dei materiali.

2.2.1 Fasi di un LCA di una pavimentazione

La costruzione di una pavimentazione stradale è caratterizzata dai seguenti processi (Huang, 2007), come altresì illustrato in **Figura 2.3**:

- Approvvigionamento delle materie prime (ad esempio, nel caso di pavimentazioni stradali flessibili, aggregati e bitume) e produzione dei prodotti finiti (ad esempio, nel caso di pavimentazioni stradali flessibili, conglomerati bituminosi);
- Trasporto delle materie prime all’impianto di miscelazione (o, equivalentemente, impianto di produzione) e trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione;
- Costruzione della pavimentazione, compreso l’utilizzo dei mezzi di cantiere;
- Manutenzione e riabilitazione della pavimentazione, compreso il riciclaggio o lo smaltimento dei materiali rimossi.

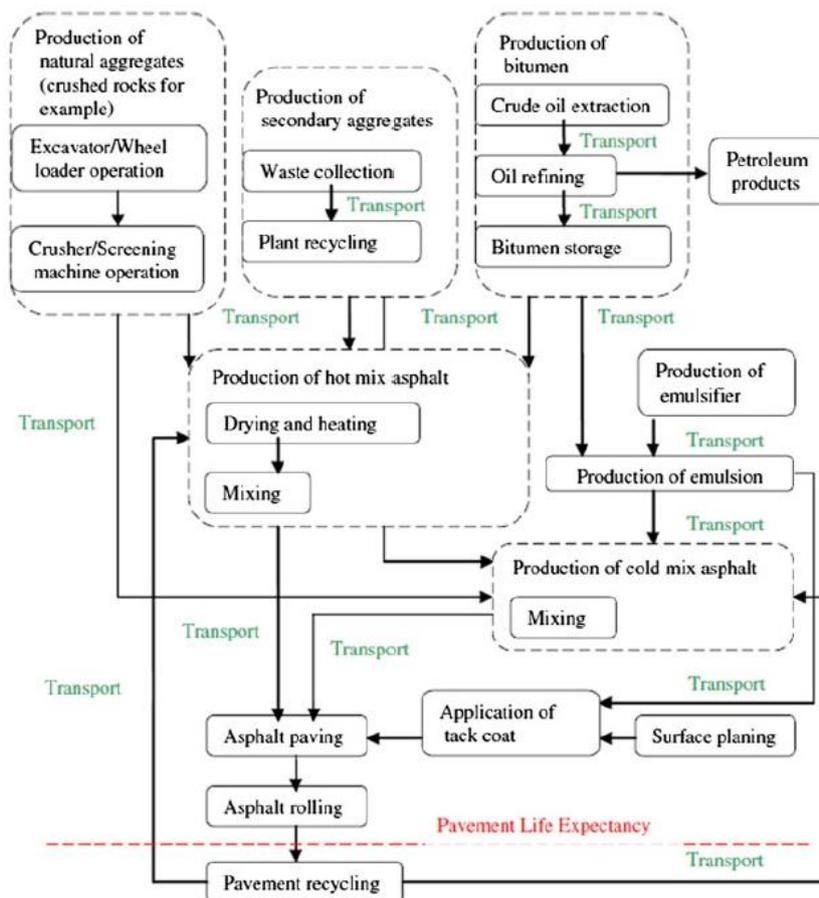


Figura 2.3 – Processi all’interno del ciclo di vita di una pavimentazione stradale (Huang, 2007)

Per ciascuno dei processi riportati in figura, l’analisi di LCA ha l’obiettivo di quantificare gli input ambientali ed i risultati di output, coincidenti con le emissioni relative alle categorie di impatto ambientale considerate. I dati raccolti per ciascuno dei processi costituiscono l’inventario (LCI) alla base della valutazione di impatto ambientale (LCIA), in cui i risultati dell’inventario sono classificati ed in seguito elaborati. Gli output sono descritti dai valori relativi agli indicatori delle categorie di impatto ambientale considerate all’interno dell’analisi del ciclo di vita della pavimentazione.

In funzione delle fasi considerate all’interno di un’analisi di LCA relativa ad una pavimentazione stradale, si possono distinguere differenti approcci (Li, et al., 2019):

- Cradle-to-gate (“dalla culla al cancello”): sono oggetto di analisi le fasi di acquisizione e produzione dei materiali, trasporto di essi e la costruzione della pavimentazione;

- *Cradle-to-grave* (“dalla culla alla tomba”): sono oggetto di analisi tutte le fasi del ciclo di vita di una pavimentazione, dall’acquisizione e produzione dei materiali alla manutenzione e successiva rimozione della pavimentazione;
- *Cradle-to-cradle* (“dalla culla alla culla”): si tratta di un’analisi circolare in cui la rimozione dei materiali converge nella prima fase di un nuovo ciclo di vita, ovvero tutti i materiali rimossi dalla vecchia pavimentazione sono considerati come materiali acquisiti e prodotti per una nuova pavimentazione.

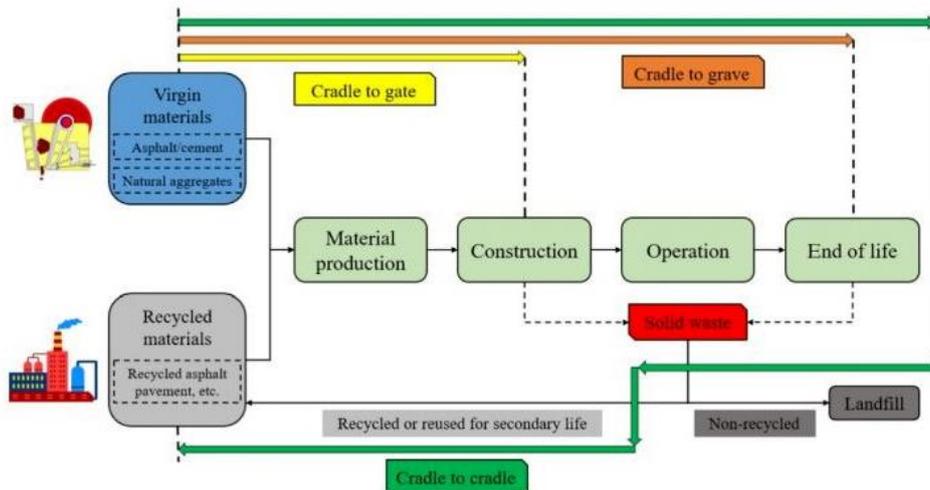


Figura 2.4 – Tipologie di analisi LCA di una pavimentazione stradale (Li et al., 2019)

2.2.2 Scelte metodologiche

Le scelte metodologiche definiscono in modo univoco i risultati di un LCA e riguardano la scelta del confine di sistema, le origini dei dati d’inventario, l’unità funzionale (Huang, Parry, 2014).

La scelta dei confini di sistema richiama le differenti tipologie di analisi LCA conducibili su una pavimentazione stradale, ovvero si può condurre un’analisi considerando l’acquisizione e la produzione dei materiali, considerando in aggiunta la costruzione della pavimentazione (*cradle-to-gate*) o considerando l’intero ciclo di vita della pavimentazione (*cradle-to-grave*). Nella seguente figura si illustrano i confini di sistema di uno studio di LCA:

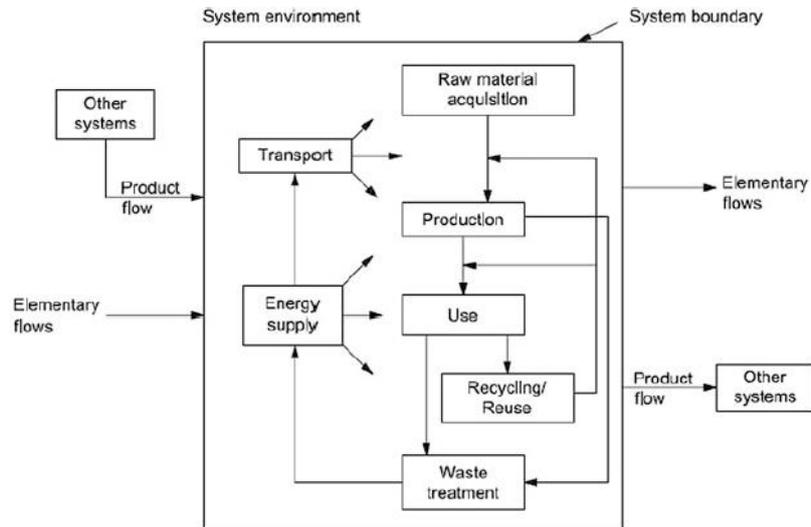


Figura 2.5 – Scelte metodologiche (BSI, 2006)

L'unità funzionale è definita all'interno della *Serie ISO 14040* come "prestazione quantificata di un sistema di produzione da utilizzare come unità di riferimento". L'unità funzionale relativa ad una pavimentazione stradale può essere definita come una misura geometrica, quale la larghezza o la lunghezza. Altri elementi utili alla scelta dell'unità funzionale sono la vita utile della pavimentazione od il livello di traffico (Huang, Parry, 2014).

2.3 Carbon Footprint

L'impronta di carbonio è un termine generico che si riferisce alle emissioni di gas serra (GHG, acronimo inglese per *Green House Gases*) e rappresenta una delle categorie di impatto ambientale attraverso le quali valutare la sostenibilità delle pavimentazioni stradali, in termini di riscaldamento globale e cambiamento climatico. Un inventario del ciclo di vita (LCI), od una valutazione del ciclo di vita (LCA) includono tipicamente diversi indicatori di impatto ambientale, dei quali all'interno del presente lavoro il focus riguarda la sostenibilità di una pavimentazione a livello di emissioni di gas serra. Quando si considera l'impatto ambientale dovuto all'emissione dei gas serra, esistono differenti gas che contribuiscono a tale fenomeno, tra cui l'anidride carbonica (CO₂) ed altri gas non necessariamente a base di carbonio, come ad esempio l'acqua (allo stato gassoso di vapore acqueo), ossidi di azoto (NO_x), ozono (O₃). È pratica comune citare le emissioni di gas serra come CO₂ equivalente (CO₂e), in cui si trovano tutti i gas citati convertiti in una concentrazione di CO₂ che fornirebbe la stessa quantità di forza radiativa (PIARC, 2019).

L'impronta di carbonio viene quantificata utilizzando indicatori come il potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential, GWP*). Esso è definito dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* come indicatore che riflette l'effetto relativo di un gas serra in termini di cambiamento climatico considerando un periodo di tempo fisso.

Le fonti di dati per l'impronta di carbonio sono disponibili all'interno dei database LCA esistenti, i quali contengono informazioni utili alla valutazione del ciclo di vita di beni e di servizi, di molti materiali grezzi, fonti di energia e trasporti.

La costruzione di pavimentazioni durevoli può considerarsi tra le soluzioni per ridurre l'impronta di carbonio di una data costruzione e massimizzarne la sostenibilità.

3. Definizione del caso studio

Il caso studio trattato nel presente lavoro riguarda la costruzione di una pavimentazione stradale flessibile, la quale si ipotizza interessare un tratto dell'Autostrada A32 *Torino-Bardonecchia*, in corrispondenza del casello autostradale di Avigliana (*Del Frari, 2021*).

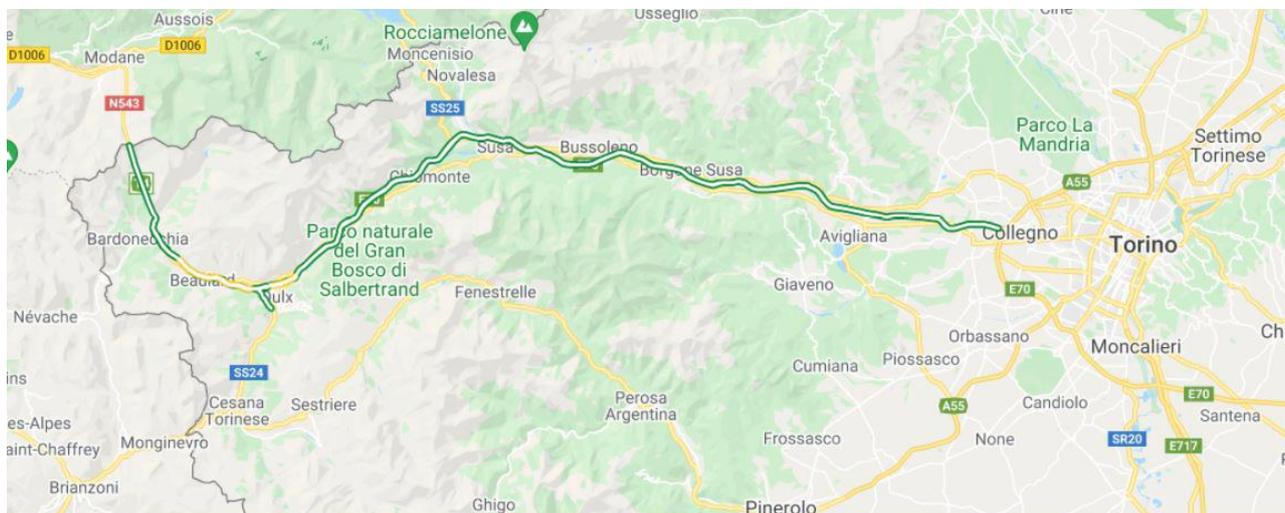


Figura 3.1 – Inquadramento geografico A32

La trattazione di tale caso studio si basa su un'unica configurazione di pavimentazione stradale, detta *full-depth*, ovvero costituita da uno strato superficiale di usura, da uno strato di collegamento (binder), da uno strato di base e da uno strato di fondazione. Nel dettaglio, la pavimentazione stradale presenta le seguenti caratteristiche geometriche:

- Larghezza: 3,75 m, pari alla larghezza di una corsia autostradale, secondo quanto riportato all'interno delle *Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Stradale*, per una corsia relativa ad una strada di Categoria A (Autostrada);
- Spessore dello strato di usura pari a 5 cm;
- Spessore dello strato di collegamento pari a 6 cm;
- Spessore dello strato di base pari a 22 cm;
- Spessore dello strato di fondazione pari a 15 cm.

A tali caratteristiche geometriche si accompagna la scelta di considerare, come unità funzionale, un tratto di pavimentazione che si sviluppi per 1 km di lunghezza.

Sulla base di questa configurazione si conduce un'analisi di LCA "*cradle-to-laid*" ("dalla culla alla posa"), attraverso l'utilizzo di quattro diversi applicativi: *PaLATE*, *ECORCE M*, *asPECT* ed *Athena Impact Estimator*.

3.1 Materiali

Si presenta una descrizione dei materiali utilizzati per la produzione delle miscele di conglomerato bituminoso utilizzate all'interno della progettazione della pavimentazione stradale oggetto del presente lavoro e la definizione delle caratteristiche volumetriche delle miscele bituminose stesse.

3.1.1 Bitume

Il bitume rappresenta una delle componenti costituenti le miscele bituminose utilizzate per la costruzione delle pavimentazioni stradali flessibili. La propria funzione è quella di legare gli aggregati, che costituiscono con importanza equivalente le miscele bituminose, tra loro in modo tale da ottenere un composto caratterizzato da proprietà meccaniche adeguate a sostenere i carichi derivanti dal traffico veicolare che interessa la pavimentazione di progetto.

Come definito all'interno della norma UNI EN 12597 "*Bitumen and bituminous binders*", il bitume è "un materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio". Il bitume deriva da processi di raffinazione del petrolio greggio, tra i quali il più comune è rappresentato dalla distillazione frazionata con la quale si ottiene il frazionamento del grezzo. Esso è un materiale viscoelastico che presenta due comportamenti peculiari:

- *Termo-dipendenza*: ciò significa che le proprietà variano al variare della temperatura a cui è sottoposto, consentendo così di ottenere un materiale semiliquido alle temperature di miscelazione e compattazione, rendendolo un composto facilmente lavorabile, ed un materiale semisolido alle temperature di esercizio, rendendolo un materiale compatto e resistente.
- *Tempo-dipendenza*: ciò significa che le proprietà variano nel tempo, in particolare a seconda della frequenza di carico.

Per il presente lavoro si è scelto di utilizzare un bitume appartenente alla classe di penetrazione 70/100, come riportato all'interno di (Miglietta et al., 2016) e (Santagata, 2019), al quale corrisponde un Performance Grade (PG) PG 58-22.

3.1.2 Conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso è una miscela composta da aggregati con frazione eterogenea (grossi e fini), i quali rappresentano lo scheletro litico, legati tra loro per mezzo di una matrice legante, rappresentata dal mastice bituminoso. Le caratteristiche di una miscela bituminosa variano a seconda della propria composizione, delle proprie caratteristiche volumetriche ed anch'essa, come il bitume, è influenzata nel proprio comportamento dalla dipendenza dal tempo e dalla temperatura. All'interno della progettazione di una pavimentazione flessibile, il conglomerato bituminoso è utilizzato per la costruzione degli strati legati e ciascuno presenta solitamente caratteristiche differenti per quanto riguarda la miscela da impiegare, a seconda della funzione che lo strato stesso deve assolvere. La progettazione delle miscele bituminose segue la procedura del *mix design*, il cui scopo è quello di definire la quantità di bitume ed aggregati in percentuale rispetto alla massa totale del composto, in modo tale da garantire le prestazioni richieste.

Le miscele bituminose considerate all'interno del presente studio, per la costruzione degli strati legati, sono tre miscele 100% vergini e sono state definite all'interno del lavoro di (Del Frari, 2021), le quali si riferiscono ad una tipologia di miscela definita all'interno di (Miglietta et al., 2016) e (Santagata et al., 2019) con la seguente nomenclatura:

- *Miscela TAL QUALE*: conglomerato bituminoso di tipo tradizionale, costituito da bitume tal quale 70/100 ed aggregati.

3.1.2.1 Scheletro litico

La composizione di aggregati che costituisce la matrice solida del conglomerato bituminoso è progettata in modo tale da garantire i requisiti prestazionali richiesti per ciascuno strato di pavimentazione. Le miscele bituminose considerate all'interno del presente lavoro sono state progettate secondo quanto riportato all'interno del *Capitolato ANAS*, il quale definisce i criteri per la corretta progettazione, costruzione e gestione delle pavimentazioni stradali. Il Capitolato ANAS prescrive per ciascuno strato di pavimentazione stradale un fuso granulometrico all'interno del quale deve essere progettata la curva granulometrica, al fine di rispettare i requisiti richiesti.

CSA 2017	Base	Basebinder	Binder	Usura A	Usura B	Drenante	Dren.AE
Apertura setacci (mm)				Paccante %			
31.5	100	100	---	---	---	---	---
20	68-88	78-100	100	---	---	100	---
16	55-78	66-86	90-100	100	---	---	---
14	---	---	---	---	---	90-100	100
12.5	---	---	66-86	90-100	100	---	94-100
10	---	---	---	---	---	---	75-85
8	36-60	42-62	52-72	70-88	90-100	12-35	---
6.3	---	---	---	---	---	---	20-32
4	25-48	35-50	34-54	40-58	44-64	7-18	8-14
2	18-38	20-38	25-40	25-38	28-42	6-12	6-12
0.5	8-21	8-21	10-22	10-20	12-24	5-11	5-11
0.25	5-16	5-16	6-16	8-16	8-18	5-10	5-10
0.063	4-8	4-8	4-8	6-10	6-10	4-8	4-8
% legante	3,8-5,2	4,0-5,3	4,1-5,5	4,5-6,1	4,5-6,1	4,8-5,8	5,3-6,3
Vuoti a N ₁ *			11-15%				≥28
Vuoti a N ₂ *			3-6%				≥22
Vuoti a N ₃ *			≥2%				≥20
Rt CTI (GPa*10 ⁻³)		0,72-1,40 ≥65 (bitume tal quale)		0,72-1,60 ≥65 (bitume tal quale)			---
Rt CTI (GPa*10 ⁻³)		0,95-1,70 ≥75 (bitume soft e hard)		0,95-1,90 ≥75 (bitume soft e hard)		0,36-0,70 ≥30	0,34-0,68 ≥25

Figura 3.2 – Prescrizioni volumetriche e meccaniche per conglomerati bituminosi (*Capitolato ANAS*)

3.1.2.2 Caratteristiche volumetriche

Le caratteristiche volumetriche delle miscele bituminose sono definite in modo tale da garantire un adeguato comportamento strutturale della pavimentazione stradale.

Il *mix design* condotto all'interno dei lavori di (*Santagata et al., 2019*) e (*Miglietta et al., 2016*) per la miscela bituminosa di binder considerata all'interno di questo lavoro si riferisce a quanto prescritto all'interno del capitolato ANAS, il quale prevede un range di valori relativi alla percentuale di bitume sulla miscela e alla percentuale di vuoti, all'interno dei quali devono essere definiti i valori di progetto delle miscele bituminose.

Con riferimento alla Figura 3.2, si riporta l'estratto della tabella relativo alle prescrizioni sopra citate:

CSA 2017	Base	Basebinder	Binder	Usura A	Usura B	Drenante	Dren.AE
% legante	3,8-5,2	4,0-5,3	4,1-5,5	4,5-6,1	4,5-6,1	4,8-5,8	5,3-6,3
Vuoti a N ₁ *			11-15%				≥28
Vuoti a N ₂ *			3-6%				≥22
Vuoti a N ₃ *			≥2%				≥20

Figura 3.3 – Estratto tabella 4.10 Capitolato ANAS

3.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali

In questa sezione si procede alla definizione delle caratteristiche meccaniche e volumetriche di ciascuno strato costituente la pavimentazione stradale oggetto di studio. Le miscele bituminose costituenti gli strati legati della pavimentazione stradale sono state definite in accordo con quanto prescritto all'interno del *Capitolato ANAS*.

3.2.1 Strato di usura

Lo strato di usura rappresenta lo strato superficiale della pavimentazione stradale, il quale sopporta le sollecitazioni provenienti dal traffico veicolare e trasferisce i carichi verticali agli strati sottostanti. Esso consente inoltre l'aderenza degli pneumatici e protegge gli strati sottostanti dall'azione degli agenti atmosferici.

Come riportato nei precedenti paragrafi, lo strato di usura in questione presenta uno spessore di 5 cm ed è costituito da conglomerato bituminoso *TAL QUALE*, come definito all'interno di (*Santagata et al., 2019*) e (*Miglietta et al., 2016*).

In accordo con il *Capitolato ANAS* (vedasi **Figura 3.3**), la percentuale in massa di bitume rispetto alla massa totale del conglomerato bituminoso e la percentuale dei vuoti sono state definite all'interno di (*Miglietta et al., 2016*) come segue:

Strato di usura	% B _{mix} [%]	v [%]
	5,3	3,5

Tabella 3.1 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di usura

La densità del bitume utilizzato per la composizione della miscela è pari a 998 kg/m³.

La densità degli aggregati utilizzati per la composizione della miscela è pari a 2786 kg/m³.

La densità della miscela bituminosa ottenuta secondo il mix design, relativa al campione compattato, è pari a 2544 kg/m³.

3.2.2 Strato di collegamento (binder)

Lo strato di collegamento rappresenta lo strato che si interpone tra lo strato di usura e lo strato base. Esso ha la funzione di trasferire i carichi provenienti dallo strato superficiale allo strato di base.

Come riportato precedentemente, lo strato di collegamento presenta uno spessore di 6 cm ed è costituito da conglomerato bituminoso *TAL QUALE*, come definito all'interno di (*Santagata et al., 2019*) e (*Miglietta et al., 2016*).

In accordo con il *Capitolato ANAS* (vedasi **Figura 3.3**), la percentuale in massa di bitume rispetto alla massa totale del conglomerato bituminoso e la percentuale dei vuoti sono state definite all'interno di (*Miglietta et al., 2016*) come segue:

Strato di collegamento	% B _{mix} [%]	v [%]
	4,5	4,0

Tabella 3.2 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di collegamento

La densità del bitume utilizzato per la composizione della miscela è pari a 998 kg/m³.

La densità degli aggregati utilizzati per la composizione della miscela è pari a 2786 kg/m³.

La densità della miscela bituminosa ottenuta secondo il mix design, relativa al campione compattato, è pari a 2578 kg/m³.

3.2.3 Strato di base

Lo strato di base rappresenta lo strato inferiore del pacchetto di strati legati di una pavimentazione flessibile. Esso è soggetto ad un'azione flessionale maggiore rispetto agli strati superficiali ed ha la funzione di trasferire i carichi provenienti dallo strato di collegamento alla fondazione.

Lo strato di base presenta uno spessore di 22 cm (come riportato all'inizio di questo capitolo) ed è costituito da conglomerato bituminoso *TAL QUALE*, come definito all'interno di (*Santagata et al., 2019*) e (*Miglietta et al., 2016*).

In accordo con il *Capitolato ANAS* (vedasi **Figura 3.3**), la percentuale in massa di bitume rispetto alla massa totale del conglomerato bituminoso e la percentuale dei vuoti sono state definite all'interno di (*Miglietta et al., 2016*) come segue:

Strato di base	% B _{mix} [%]	v [%]
	4,5	4,5

Tabella 3.3 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di base

La densità del bitume utilizzato per la composizione della miscela è pari a 998 kg/m³.

La densità degli aggregati utilizzati per la composizione della miscela è pari a 2786 kg/m³.

La densità della miscela bituminosa ottenuta secondo il mix design, relativa al campione compattato, è pari a 2578 kg/m³.

3.2.4 Strato di fondazione

Lo strato di fondazione rappresenta lo strato inferiore della pavimentazione stradale ed è a diretto contatto con il sottofondo. Esso ha la funzione di trasferire i carichi provenienti dallo strato di base al sottofondo, in modo tale che non eccedano la capacità portante dello stesso.

Uguualmente a quanto riportato all'inizio di questo capitolo, lo strato di fondazione presenta uno spessore di 15 cm ed è costituito da una miscela di aggregati lapidei, di diverse dimensioni, all'interno della quale è stato inserito un quantitativo di acqua pari al 6,5% della massa degli aggregati stessi, in modo tale da garantire un'ottimale compattazione del materiale in fase di posa.

In accordo la scheda tecnica fornita da *Sitalfa*, le caratteristiche volumetriche del misto granulare costituente lo strato di fondazione sono le seguenti:

Strato di fondazione	MV _{agg.} [kg/m ³]	MV _{agg.compattato} [kg/m ³]	v [%]
	2700	2170	19,63

Tabella 3.4 – Caratteristiche volumetriche strato di fondazione

4. Descrizione applicativi per analisi LCA

L'analisi di LCA condotta sulla pavimentazione stradale flessibile oggetto di questo elaborato è stata condotta attraverso l'utilizzo di quattro applicativi *open source* e *free download*. La scelta è stata orientata ad applicativi chiari e facilmente utilizzabili, senza la necessità di licenze specifiche. Di seguito si riporta l'elenco degli applicativi utilizzati:

- PaLATE (**PA**vement **L**ife-cycle **A**ssessment **T**ool for **E**nvironmental and economic effects), realizzato dal Consortium on Green Design and Manufacturing dell'Università della California di Barkley;
- asPECT (**AS**phalt **P**avement **E**mbodied **C**arbon **T**ool), realizzato dal TRL (*Transport Research Laboratory*) in collaborazione con *Highways England, Mineral Products Association & Eurobitume UK*;
- ECORCE M (**ECO**compareur **R**oute **C**onstruction **E**ntretien), sviluppato dall'IFSTTAR (*Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux*), nella versione multilingue;
- Athena Impact Estimator for Highways, realizzato dall'Athena Sustainable Materials Institute.

4.1 PaLATE

Esso è un applicativo Excel che consente la valutazione di impatto ambientale relativa alla costruzione di pavimentazioni stradali, sia esse flessibili che rigide. In particolare, esso consente di effettuare un'analisi di LCA (*Life Cycle Assessment*), oltre ad un'analisi di LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*), la quale non viene trattata all'interno di questo elaborato.

L'applicativo si costituisce di differenti fogli di calcolo, parte dei quali relativi ai dati di inventario (dati di input) da utilizzare all'interno dell'analisi, altri relativi ai valori di output seguenti l'analisi di LCA effettuata. Nel dettaglio, i fogli di calcolo utilizzati all'interno della presente analisi di LCA, inerenti ai dati di input, sono così organizzati:

DESIGN

Il presente foglio di calcolo consente di inserire:

- caratteristiche geometriche della pavimentazione stradale, in particolare lunghezza del tratto considerato, larghezza della pavimentazione e spessore degli strati che la compongono;
- caratteristiche dei materiali che costituiscono gli strati della pavimentazione stradale, in particolare i valori di densità.

Si riporta un estratto del foglio di calcolo per una maggiore comprensione (per i dettagli riguardo al caso studio in esame si rimanda al **Capitolo 3** del presente elaborato):

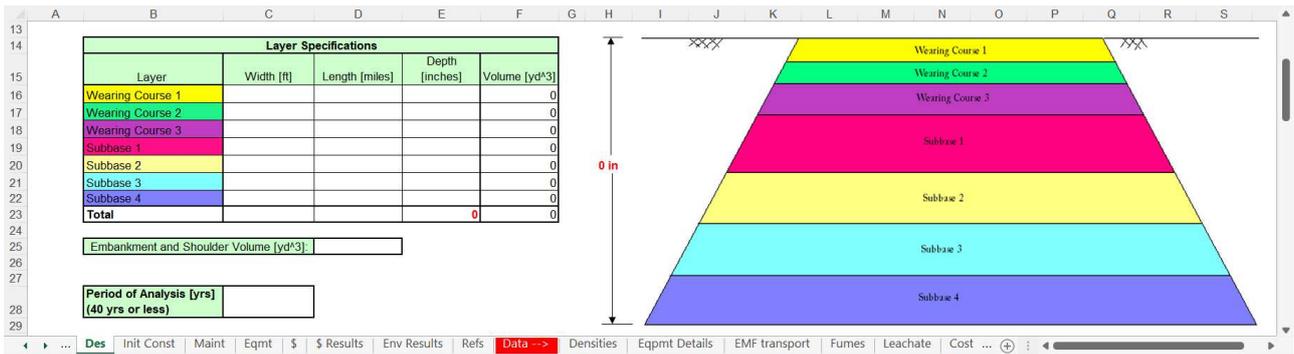


Figura 4.1 – Estratto foglio di calcolo Design, caratteristiche geometriche della pavimentazione stradale

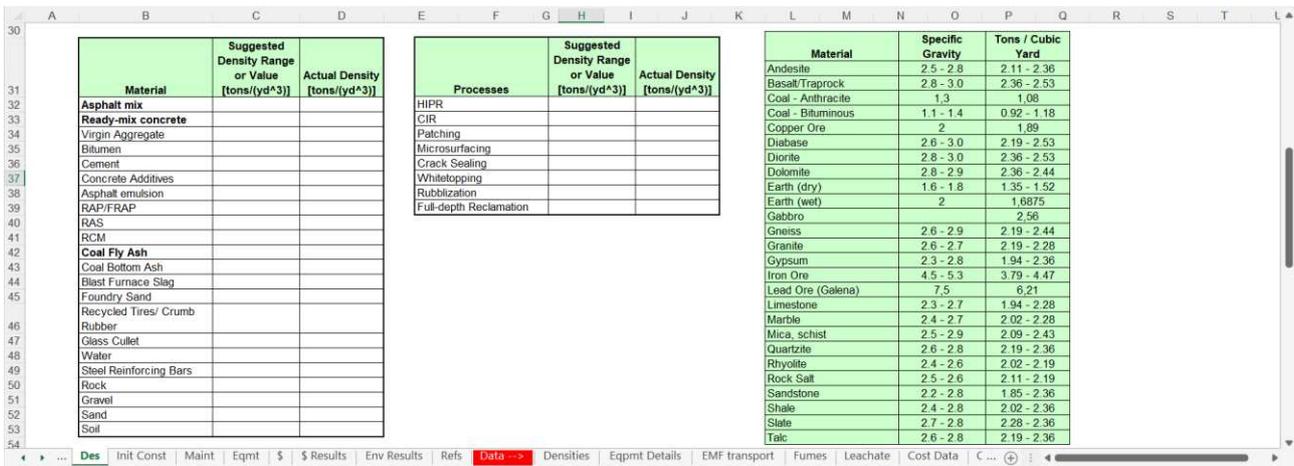


Figura 4.2 – Estratto foglio di calcolo Design, caratteristiche materiali costituenti la pavimentazione stradale

INITIAL CONSTRUCTION

Il foglio di calcolo in questione consente di inserire:

- volumi dei materiali utilizzati per la costituzione degli strati della pavimentazione considerata, i quali combinati con i valori precedentemente inseriti di densità forniscono la massa dei materiali stessi;
- distanze necessarie al trasporto degli stessi materiali;
- mezzo di trasporto relativo a ciascuna fase di trasporto, ad ognuno dei quali è associata una tabella di input in cui vengono riportate le seguenti caratteristiche di ogni mezzo di trasporto:
 - Consumo di carburante [l/km];
 - Capacità [Mg¹];
 - Consumo di energia [MJ/l];
 - Fattori di emissione relativi a diverse sostanze, tra i quali nel presente caso di studio si considera solo quello relativo alla CO₂ [g/l].

Si riporta un estratto del foglio di calcolo per una maggiore comprensione (per i dettagli riguardo al caso studio in esame si rimanda al **Capitolo 3** del presente elaborato):

¹ 1 Mg = 1 tonnellata.

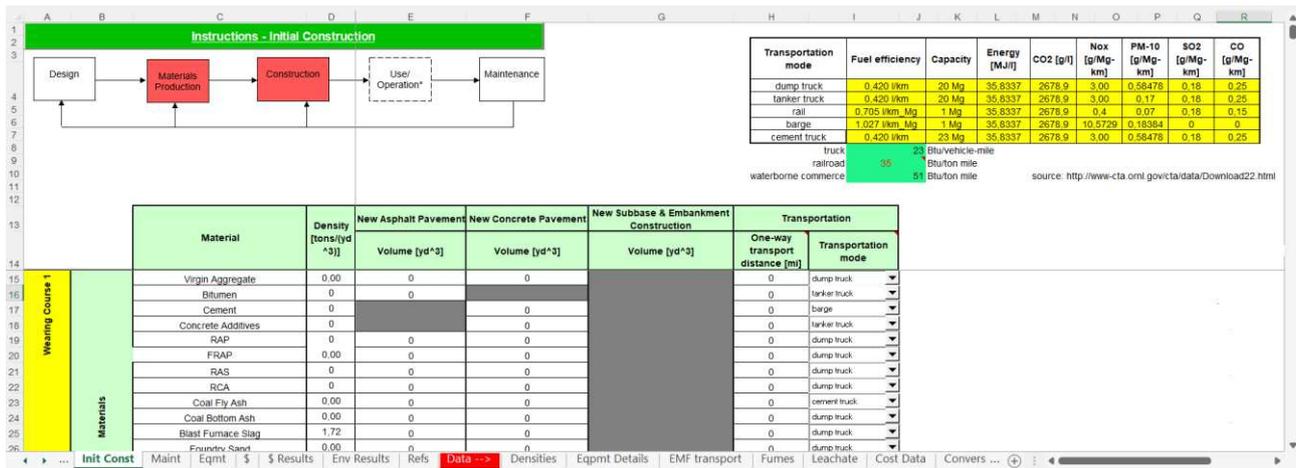


Figura 4.3 – Estratto foglio di calcolo Initial construction²

EQUIPMENT

Esso consente di scegliere i mezzi ed i macchinari necessari durante le fasi di produzione dei materiali e costruzione degli strati di pavimentazione, tra quelli disponibili all'interno dell'inventario dell'applicativo. In particolare, a ciascuna operazione corrisponde la scelta del modello di mezzo o macchinario che si intende adoperare, a ciascuno dei quali è associato un valore di:

- Potenza meccanica [hp³];
- Produttività [tons/h];
- Consumo di carburante [l/h];
- Tipologia di carburante.

E' possibile inoltre definire la tipologia di impianto di produzione di conglomerato bituminoso, anche in questo caso tra le opzioni fornite da PaLATE attraverso il proprio inventario. Ugualmente a quanto enunciato per mezzi e macchinari, per ogni tipologia di impianto di produzione l'applicativo fornisce di default un valore di produttività, mentre è lasciato all'utente la scelta dei valori numerici degli altri parametri.

Si riporta un estratto del foglio di calcolo per una maggiore comprensione (per i dettagli riguardo al caso studio in esame si rimanda al **Capitolo 3** del presente elaborato):

² I dati presenti sono quelli di default assunti dal foglio di calcolo scaricabile online, i quali si riferiscono al *Transport Energy Data Book, edizione 39*, redatto da Stacy C. Davis e Robert G. Boundy per conto di Oak Ridge National Laboratory; ciascun dato presente può essere personalizzato dall'utente.

³ 1 hp = 0,75 kW

Instructions - Equipment								
Design	Materials Production	Construction	Use/ Operation*	Maintenance				
ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type	Additional Fuel Consumption	Fuel Type
Concrete Paving	Slipform paver	Wirtgen SP 250	106 hp	564 tons/h	19.7 l/h	diesel		
	Texture curing machine	Gomaco T/C 400	70 hp	187 tons/h	20.2 l/h	diesel		
Asphalt Paving	Paver	Dynapac F30C	196 hp	2.400 tons/h	49.1 l/h	diesel		
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26.1 l/h	diesel		
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel		
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Wirtgen 2200 CR	800 hp	1.713 tons/h	150.00 l/h	diesel		
	Pneumatic roller	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25.1 l/h	diesel		
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel		
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	Wirtgen WR 2500 S	670 hp	4.800 tons/h	120.0 l/h	diesel		

Figura 4.4 – Estratto foglio di calcolo Equipment⁴

EMF TRANSPORT

Il foglio di calcolo presenta i fattori di emissione [g/ton] legati alla produzione di ciascun materiale, all'interno della *Sector Table*, i quali possono essere personalizzati dall'utente a seconda del database di riferimento adottato. Di default PaLATE ricava tali fattori di emissione attraverso l'applicazione del metodo EIO-LCA (*Economic Input-Output Life Cycle Assessment*), fornito dalla *Carnegie Mellon University*, il quale combina dei vettori ambientali ad un fattore di costo di un certo settore economico, in modo tale da ottenere un fattore di emissione (*"Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision-Making Toolbox"*, Nathaman, McNeil, Vab Dam – *Transportation Research Board vol.2628, 2017*).

Tale metodo non viene assunto all'interno del presente lavoro, per il quale si è scelto di adottare i fattori di emissione utilizzati all'interno del lavoro di (Del Frari, 2021).

L'inventario è completato dalla presenza di altri dati di inventario, i quali fanno riferimento al database gestito ed aggiornato dall'EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*)⁵. Tra di essi, risultano di interesse per lo studio di LCA condotto all'interno di questo elaborato i seguenti dati:

- Contenuto di carbonio all'interno del diesel, il quale è il carburante di riferimento assunto all'interno della presente analisi di LCA, necessario a definire il fattore di emissione relativo al consumo di carburante da parte dei mezzi e macchinari (*Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996*);
- Fattori di emissione relativi ai motori industriali alimentati unicamente a diesel, utilizzati all'interno del cantiere (*Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996*).

⁴ I dati presenti si riferiscono alla versione standard del foglio di calcolo scaricabile online.

⁵ Agenzia statunitense che si occupa del controllo dell'inquinamento e delle responsabilità ambientali nazionali.

Si riportano di seguito alcuni estratti del foglio di calcolo per una maggiore comprensione (per i dettagli riguardo al caso studio in esame si rimanda al **Capitolo 3** del presente elaborato):

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3								
4	DIESEL CARBON CONTENT							
5								
6	REFERENCE: Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996;							
7	http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf; Accessed 03/20/02 at 12PM							
8								
9								
10		Density	7,1 lb/gal		3223,4 g/gal		848,3 g/l	
11		Weight Percent of Carbon Content	87%		0,0032234 Mg/gal		0,00084826 Mg/l	
12		CO ₂ Efficiency Factor	99%					
13								
14								
15								

Figura 4.5 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, Diesel Carbon Content

	A	B	C	D	E	F	G	H
51								
52	In the calculations, we use the following emission factors (USEPA AP-42 Section 3.3), that you can adjust:							
53								
54								
55								
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
60								
61								

Figura 4.6 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, fattori di emissione motori a diesel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
121														
122														
123		Sector	CO ₂	CO	NO ₂	SO ₂	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption	
124		units	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	
125		Asphalt paving mixtures and blocks	183,016	42	44	27	48	1,968	18	1,E-03	5,E-02	3,580	96	
126		Ready-mixed concrete	37,099	337	551	484	172	536	19	1,E-03	6,E-02	932	169	
127		Blast furnaces and steel mills	544,446	1,828	969	766	338	8,569	342	1,E+01	4,E+00	13,473	18,037	
128		Sand and Gravel	10,922	14	22	11	157	154	10	4,E-07	3,E-03	179	21	
129		Bitumen	1,121,978	4,736	6,239	5,653	1,057	19,757	784	4,E-02	2,E+00	350,942	8,292	
130		cement	264,925	1,132	3,186	3,158	597	3,775	165	3,E-03	3,E-01	1,636	1,871	
131		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	
132		asphalt emulsion	969,318	4,092	5,390	4,884	914	17,069	678	3,E-02	1,E+00	303,191	7,164	
133		water	0,497	0,002	0,003	0,003	0,001	0,006	0,000	4,E-10	9,E-07	0	0	
134		units	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	MJ/kWh	kWh/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	
135		Electric services (utilities)	1243,97	0,37	3,56	6,97	0,24	12,90	0,02	4,67E-08	1,89E-04	1,52	0,08	
136														
137		Notice of Public Meeting to Consider Approval of California's Emissions Inventory for Off-Road Large Compression-Ignited Engines (>25HP) Using New Offroad Emissions Model. Meeting is												
138														
139														

Figura 4.7 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, Sector Table⁶

⁶ I dati presenti sono quelli di default assunti dal foglio di calcolo scaricabile online, definiti in base all'applicazione del metodo EIO-LCA, i quali possono essere personalizzati dall'utente a seconda del metodo considerato. Nel presente lavoro si considera la sola colonna relativa ai fattori di emissione della CO₂.

EQUIPMENT DETAILS

Il presente foglio di calcolo elenca le emissioni ed i consumi relativi a ciascun mezzo o macchinario impiegabile all'interno delle fasi di produzione dei materiali e di costruzione degli strati di pavimentazione. Tali specifiche sono riportate, in parte, all'interno del foglio di calcolo *Equipment*, come spiegato precedentemente.

Ad esse si aggiungono le emissioni ed i consumi relativi agli impianti di produzione presenti all'interno dell'inventario, suddivisi per tipologia.

Si riportano alcuni estratti del foglio di calcolo per una maggiore comprensione (per i dettagli riguardo al caso studio in esame si rimanda al **Capitolo 3** del presente elaborato):

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
type	brand/model	engine model	hp	Productivity (non-standard units)	Conversion Factors	Productivity	fuel consumption	capacity	fuel type		fuel type II	max operational speed	heating per			
1																
2																
3	Air Compressor	Sullair 425	124 hp	0		?	32.4 l/h		diesel							
4		none	0			0	0									
5																
6	Dozer with ripper	Caterpillar D8H	285 hp	?		?	71.4 l/h		diesel							
7		none	0			1	0		diesel							
8		other	0			1	0		diesel							
9																
10	Dump Truck	GMC 8500	275 hp			22 tons/trip	0.3 l/h		diesel	Lkm						
11		Sterling L8500	250 hp			22 tons/trip	?		diesel							
12		none	0			0	0									
13																
14	Excavator	John Deere 690E	131 hp			315 tons/h	34.2 l/h		diesel							
15		none	0			1	0		diesel							
16		other	0			1	0		diesel							
17																
18	Generator	Caterpillar 3406C TA	519 hp			?	98.4 l/h		diesel	26.0 gal/h						
19		none	0			1	0		diesel							
20		other	0			1	0		diesel							
21		Detroit Diesel 671					36.3 l/h	50 kW	diesel	5.6 gal/h						
22		Detroit Diesel series 40					32.9 l/h	85-140 kW	diesel	8.7 gal/h						
23																
24	Heating Machine	Wagner HM500	49 hp	100 m ³ /h	0.39	256 tons/h	9.1 l/h		diesel	l/h	420.0 l/h LPG	5	m/min			
25		none	0			1	0									
26		other	1			1	1									
27																
28	Impact Crusher and Screen	Excel Machinery 1500 5x16H	168 hp			225 tons/h										
29																
30	Jaw Crusher	CEC 30x42-in	150 hp						electric							
31																
32	MTV	Cedarapids MS-1	100 hp			1.440 tons/h			diesel					1440	tonnes/h	
33	MTV	Cedarapids MS-2	100 hp			1.199 tons/h			diesel					1199	tonnes/h	
34	MTV	Blaw-Knox MC-330	184 hp						diesel					234	lb/hp	
35																
36	Macamat (iCrosswalk)	Dinac 5AT														

Figura 4.8 – Estratto foglio di calcolo *Equipment Details*, mezzi e macchinari⁷

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
type	brand/model	engine model	hp	Productivity (non-standard units)	Conversion Factors	Productivity	fuel consumption	capacity	fuel type	
1										
2										
169										
170	source [EPA 2000]		Production rate	energy		PM10	CO	CO ₂	NOx	SO ₂
171	HMA Production	Uncontrolled Batch-mix	214 tons/h	227 MJ/ton		2,043 kg/ton	0,18 kg/ton	16,798 kg/ton	0,054 kg/ton	0,040 kg/ton
172		Fabric Filter-Controlled Batch-mix	214 tons/h	227 MJ/ton		0,004 kg/ton	0,18 kg/ton	16,798 kg/ton	0,054 kg/ton	0,040 kg/ton
173		Uncontrolled Drum-mix	272 tons/h	202 MJ/ton		2,951 kg/ton	0,06 kg/ton	14,982 kg/ton	0,025 kg/ton	0,026 kg/ton
174		Fabric Filter-controlled Drum-mix	272 tons/h	202 MJ/ton		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	0	0	0	0
176	other	0	0		0	0	0	0	0	
177										

Figura 4.9 – Estratto foglio di calcolo *Equipment Details*, impianti di produzione⁸

⁷ I dati presenti si riferiscono alla versione standard del foglio di calcolo scaricabile online.

⁸ I dati presenti si riferiscono alle tipologie di impianti descritti all'interno di (*Environmental Protection Agency, «Hot Mix Asphalt Plants,» in AP42 - Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition a cura di, vol. Section 11.1, 2004*).

I fogli di calcolo utilizzati all'interno della presente analisi di LCA, inerenti ai valori di output, sono due, di cui uno riguarda le emissioni risultanti dell'analisi di LCA, l'altro riguarda i risultati dell'analisi di LCCA. Nel presente lavoro si considera solo il primo foglio di calcolo, in quanto non è stata condotta un'analisi di costo. Il foglio di calcolo interessato dalla presente analisi è così organizzato:

ENVIRONMENTAL RESULTS

Il foglio di calcolo fornisce i risultati in termini di impatti ambientali riguardo alla pavimentazione definita in fase di progettazione. Le categorie di impatto ambientale di cui l'applicativo fornisce un risultato in output sono le seguenti:

- **GWP (Global Warming Potential) [kg CO₂eq]**, il quale descrive il cambiamento climatico in termini di emissioni in aria di CO₂ equivalente;
- **GER (Gross Energy Requirement) [MJ]**, il quale descrive il consumo di energia durante le fasi di produzione dei materiali, trasporto degli stessi e costruzione della pavimentazione stradale;
- **Consumo di acqua [kg]** durante le fasi di produzione dei materiali, trasporto degli stessi e costruzione della pavimentazione stradale;
- **NO_x [kg]**, il quale descrive l'inquinamento dovuto alle emissioni di ossidi di azoto, in particolare il monossido di azoto (NO) ed il biossido di azoto (NO₂). "La principale fonte di emissione degli ossidi di azoto è il traffico veicolare; altre fonti sono gli impianti di riscaldamento civili e industriali, le centrali per la produzione di energia e un ampio spettro di processi industriali. Il biossido di azoto è un inquinante ad ampia diffusione che ha effetti negativi sulla salute umana e insieme al monossido di azoto contribuisce ai fenomeni di smog fotochimico (è precursore per la formazione di inquinanti secondari come ozono troposferico e particolato fine secondario), di eutrofizzazione e delle piogge acide" (*Concentrazione atmosferica degli inquinanti, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015*);
- **PM₁₀ [kg]**, il quale si riferisce alla dispersione in aria del particolato molecolare "con frazione di particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10 µm. [...] Tra le sorgenti antropiche un importante ruolo è rappresentato dal traffico veicolare" (*Concentrazione atmosferica degli inquinanti, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015*);
- **SO₂ [kg]**, il quale "contribuisce sia al fenomeno dell'inquinamento transfrontaliero, sia alla formazione di deposizioni acide, secche e umide e alla formazione di PM secondario. Le principali sorgenti sono gli impianti di produzione di energia, gli impianti termici di riscaldamento, alcuni processi industriali e in minor misura, il traffico veicolare, con particolare riferimento ai motori diesel" (*Concentrazione atmosferica degli inquinanti, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015*);
- **CO [kg]**, il quale "assume particolare rilevanza tra gli inquinanti prodotti dalla combustione. E' un gas tossico, incolore, inodore, insapore e non irritante che, senza ventilazione adeguata, può raggiungere concentrazioni elevate. Si produce per combustione incompleta di qualsiasi materiale organico, in presenza di scarso contenuto di ossigeno nell'ambiente. Per le sue caratteristiche può essere inalato fino a raggiungere nell'organismo concentrazioni letali. Il monossido di carbonio presente nell'aria proviene principalmente da fonti di combustione" (*Direzione generale della prevenzione sanitaria, Ministero della Salute, 2015*);
- **Hg [g]**, il quale si riferisce all'inquinamento dovuto alle emissioni di mercurio. "E' un metallo pesante altamente tossico ed è stato riconosciuto come inquinante globale in grado di produrre rilevanti

effetti negativi sulla salute umana e sull'ambiente. [...] Oltre ad essere presente come elemento in ambiente ed emesso in atmosfera per effetto di fenomeni naturali [...], viene emesso e rilasciato da alcune attività antropiche, che si stima siano diventate la principale causa di emissioni (in aria) e rilasci (in acqua e nel suolo) di mercurio. Tra le attività antropiche rientrano la combustione di carbone fossile, alcuni processi industriali che fanno uso di mercurio e di suoi composti [...]” (Inquinamento da mercurio, *Ministero della Transizione Ecologica, 2022*). Le emissioni di mercurio calcolate dall'applicativo sono associate alla produzione di diesel;

- **Pb [g]**, il quale si riferisce all'inquinamento dovuto alle emissioni di piombo. Le principali fonti di emissione riguardano il trattamento di minerali, metalli ed i processi di combustione, in particolar modo associati al traffico veicolare (*Environmental topics, EPA*);
- **RCRA Hazardous Waste Generated [kg]**, il quale fa riferimento alla quantità di rifiuti solidi “pericolosi” (*Hazardous Waste*) riciclabili, ovvero quei rifiuti solidi classificati come radioattivi, infiammabili, corrosivi o tossici;
- **Human Toxicity Potential (HTP) [kg]**, il quale è definito come “un indice che riflette il potenziale danno di un'unità di sostanza chimica rilasciata nell'ambiente, che si basa sia sulla tossicità intrinseca di un composto che sulla sua dose potenziale. [...] Le emissioni totali possono essere valutate in termini di equivalenza del benzene (cancerogene) e di toluene equivalenti (non cancerogeni)” (*Human Toxicity Potentials for Life-Cycle Assessment and Toxics Release Inventory Risk Screening – Edgar G. Hertwich, Sarah F. Mateles, William S. Pease, Thomas E. McKone*).

Per le categorie di impatto ambientale sopra descritte, PaLATE fornisce dei risultati suddividendo i contributi in tre fasi:

- *Material Production*, all'interno della quale sono espresse le emissioni dovute alle operazioni di produzione dei materiali da costruzione;
- *Material Transportation*, all'interno della quale sono espresse le emissioni relative alle operazioni di trasporto dei materiali da costruzione;
- *Processes (Equipment)*, all'interno della quale sono espresse le emissioni relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere durante la costituzione degli strati di pavimentazione.

		Energy [MJ]	Water Consumption [kg]	CO ₂ [kg] - GWP	NO _x [kg]	PM ₁₀ [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	RCRA Hazardous Waste Generated [kg]	Human Toxicity Potential (Cancer)	Human Toxicity Potential (Non-Cancer)
Initial Construction	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maintenance	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	Materials Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Materials Transportation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Processes (Equipment)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.10 – Estratto foglio di calcolo *Environmental Results*, valori totali di emissione

Per ciascuna di queste fasi, l'applicativo fornisce a sua volta i valori di emissione relativi a ciascuno strato di pavimentazione stradale, in modo tale da poter evidenziare quali siano i contributi particolari, come mostrato nella seguente figura:

Phase	Layer	Energy (MJ)	Water Consumption (kg)	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	PM ₁₀ (g)	SO ₂ (g)	CO (g)	Hg (g)	Pb (g)	PCRA Hazardous Waste Generated (g)	Aldehydes (g)	Benz(a)pyrene (g)	CO2eCDF (g TEQ)
Initial Construction Material Production	Wearing Course 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Initial Construction Material Transportation	Wearing Course 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Initial Construction Process (Equipment)	Wearing Course 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wearing Course 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subbase 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.11 – Estratto foglio di calcolo Environmental Results, valori di emissione singoli strati pavimentazione

Per ciascuno strato di pavimentazione, l'applicativo fornisce inoltre dei valori di emissione ancora più specifici, relativi a ciascun materiale utilizzato per la costruzione del singolo strato di pavimentazione stradale. Anche in questo caso le emissioni relative a ciascun materiale, del singolo strato di pavimentazione, sono suddivise tra le tre macro-fasi descritte inizialmente, come mostrato di seguito:

Material	Energy (MJ)	Water Consumption (kg)	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	PM-10 (g)	SO ₂ (g)	CO (g)	Hg (g)	Pb (g)	PCRA Hazardous Waste Generated (g)	HTP cancer (g)	HTP non cancer (g)
Virgin Aggregates	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asphalt Bitumen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Concrete Admixtures	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RAP millings	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FRAP millings & grinding	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RAS Grinding	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RCM demolition	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RCM crushing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Water	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Steel Reinforcing Bars	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coal Fly Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coal Bottom Ash	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Blast Furnace Slag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Foundry Sand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recycled Tire Crumb Rubber	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glass Cullet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hot-mix Asphalt Plant Process	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ready-mix Concrete	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.12 – Estratto foglio di calcolo Environmental Results, valori di emissione singoli materiali⁹

Tra le categorie di impatto ambientale così descritte, all'interno dello studio di LCA del presente elaborato si considera la sola categoria di impatto ambientale del cambiamento climatico GWP [kg CO₂e].

Le schede di calcolo descritte all'interno di questo paragrafo sono le uniche utilizzate per l'analisi di LCA in questione, non considerando i contributi relativi a quelle non menzionate.

⁹ Si riporta a titolo esemplificativo la tabella relativa alla fase di Initial Construction per il generico strato superficiale di pavimentazione.

4.2 asPECT

L'applicativo è stato sviluppato dal TRL (*Transport Research Laboratory*) in collaborazione con *Highways England, Mineral Products Association & Eurobitume UK* e fornisce uno strumento di analisi per il calcolo di emissioni di GHG (*GreenHouse Gases*) relative a miscele di conglomerato bituminoso in conformità alle clausole inserite all'interno del *Protocol for the Calculation of Whole Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Generated by Asphalt (v4.2)* (Wayman et al., 2020). Tale protocollo è stato elaborato seguendo quanto definito all'interno del *Publicly Available Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services* (PAS 2050:2011, British Standards Institution, 2011) ed in riferimento alla normativa BS EN ISO 14044:2006 (*Environmental Management - Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*).

Le valutazioni delle emissioni di gas serra sono svolte in termini di CO₂ equivalente per tonnellata di miscela bituminosa all'anno, la quale rappresenta l'unità funzionale scelta all'interno del protocollo. Il ciclo di vita della pavimentazione così definita comprende dieci fasi, le quali esprimono un'analisi di LCA relativa ad un processo "cradle-to-grave" ("dalla culla alla tomba"), riassunte all'interno della seguente figura:

Life-cycle stage		Description
1	Raw Material Acquisition	Acquiring raw materials from the natural environment with the input of energy
2	Raw Material Transport	Transporting acquired raw materials to processing
3	Raw Material Processing	Crude oil refining, rock crushing and grading, recycled and secondary material reprocessing
4	Processed Material Transport	Transporting processed raw materials to site of manufacture of bitumen bound highway components
5	Road Component Production	Production of bitumen bound mixtures
6	Material Transport to Site	Delivery of materials to site
7	Installation	Placing materials at the construction site, mobilisation of plant and labour
8	Scheme Specific Works	Installation of other specified materials direct to site (e.g. aggregates and geosystems)
9	Maintenance	Interventions to maintain the road: overlay, surface dressing works, patching, haunching etc.
10	End of Life	Excavation and material management, mobilisation of plant and labour

Figura 4.13 – Fasi LCA analizzate all'interno di asPECT

All'interno dell'analisi di LCA effettuata per il caso studio tratto all'interno del presente lavoro, si considerano le prime 7 fasi riportate nella precedente figura, le quali rappresentano un processo "cradle-to-laid"¹⁰.

Definendo così le fasi oggetto di analisi LCA, per ogni miscela bituminosa definita il contributo di CO₂eq viene calcolato come somma dei seguenti contributi:

¹⁰ Si omettono le valutazioni riguardanti alle fasi di manutenzione della pavimentazione ed alla fase di rimozione degli strati di pavimentazione al termine del ciclo di vita.

- contenuto di CO₂eq relativo al processo “*cradle-to-gate*” (“dalla culla al cancello”), riferito alla produzione di ciascun materiale costituente le miscele bituminose di progetto;
- quantità di CO₂eq relativa alla fase di trasporto di ciascun materiale all’impianto di produzione di conglomerato bituminoso;
- quantità di CO₂eq derivante dalle forme di energia coinvolte nella produzione all’interno dell’impianto di miscelazione;
- quantità di CO₂eq derivante dal processo di riscaldamento ed essiccamento della miscela bituminosa e dei suoi materiali costituenti;
- quantità di CO₂eq relativa al trasporto delle miscele bituminose al sito di costruzione (cantiere);
- quantità di CO₂eq associata alla posa ed alla compattazione del materiale in cantiere.

Per quanto riguarda l’interfaccia grafica che si presenta all’utente, asPECT presenta 4 sezioni principali, come indicato nella seguente **Figura 4.14**:

- *Materiali*, all’interno della quale è possibile consultare una lista di elementi inseriti di default dall’applicativo, modificarli, oppure inserire materiali creati ex novo dall’utente;
- *Impianti*, all’interno della quale è possibile creare degli impianti di produzione di miscele bituminose e definirne i dettagli richiesti in input dall’applicativo;
- *Progetto*, all’interno della quale è possibile definire la pavimentazione oggetto dell’analisi LCA che verrà condotta dall’applicativo e consultarne le emissioni relative alle fasi di LCA considerate dall’utente;
- *Costanti*, all’interno della quale è possibile consultare o inserire i valori delle costanti utilizzate all’interno del progetto precedentemente definito.



Figura 4.14 – Interfaccia grafica iniziale asPECT

Si riporta di seguito una breve descrizione del funzionamento di ciascuna sezione precedentemente esposta, per ognuna della quali si rimanda al **Paragrafo 3** per la consultazione dettagliata dei parametri inseriti relativi al caso studio oggetto di questo lavoro.

MATERIALI

All'interno della presente sezione è presente una lista di materiali già fornita dall'applicativo, alla quale è possibile aggiungere nuovi materiali definiti direttamente dall'utente: la definizione di nuovi materiali è stata effettuata in base al valore di indicatore di emissione associato (espresso in kgCO₂eq/t).

All'interno del caso studio in esame, per la definizione delle miscele bituminose relative agli strati di pavimentazione sono stati definiti una tipologia di bitume e di aggregati differente da quelle già presenti all'interno dell'inventario:

- Per il bitume è stato definito un indicatore di emissione secondo quanto riportato all'interno dell'Eurobitume 2020;
- Per gli aggregati utilizzati per la produzione di conglomerato bituminoso e per gli aggregati utilizzati come misto granulare per lo strato di fondazione si è definito un indicatore di emissione secondo quanto definito all'interno del lavoro di (Blengini et al, 2010).

Name	Category	Data Source	Source	Input Date	Input Mode	Valid Date	kg CO2e / t
Adhesion Agents	Adhesion Agents	Industry average, 2009		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	1.200,0
Bitumen	Bitumen	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	150,0
Bitumen Emulsion (re...	Bitumen Emulsions	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	180,0
Cement (Portland Ce...	Cement	BCA, CSMA, UKQAA...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	860,0
Fibres	Fibres	Industry average, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,2
Fluxes (kerosene bas...	Fluxes	European Commissio...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	370,0
GGBS	Ground Granulated Bl...	mpa,csma and UK Q...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	79,6
Hydrated Lime	Hydrated Lime	Hammond & Jones, 2...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	780,0
PFA	Pulverised Fuel Ash (...)	BCA, CSMA,UKQAA,...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,1
Polymer Modified Bitu...	Bitumen - Polymer Mo...	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	340,0
Polymer Modified Bitu...	Bitumen Emulsions - ...	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	300,0
Water	Other	BEIS, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,3
Wax (Fischer-Tropsch...	Waxes	Industry average, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	2.010,0
Wax (Crude derived ...)	Waxes	European Commissio...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	370,0
BITUME	Bitumen	Eurobitume, 2020	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	202,7
AGGREGATI	Crushed Rock	Blengini et al. (2010)	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	2,7

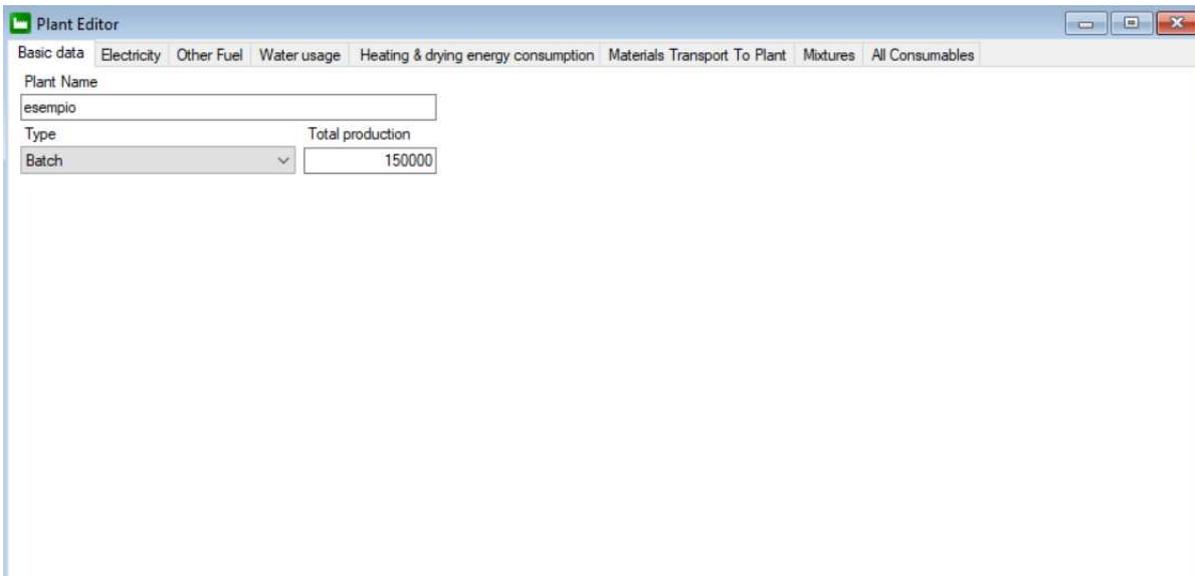
Figura 4.15 – Sezione Materiali

IMPIANTI

In tale sezione si procede con la creazione di un impianto di produzione di conglomerato bituminoso, la quale comporta la definizione dei materiali, del trasporto degli stessi all'impianto, dell'energia utilizzata nella lavorazione e nei processi di riscaldamento ed essiccazione, oltre alla definizione delle miscele di progetto.

La prima scheda di input, denominata *Basic data*, riguarda la definizione della tipologia di impianto di produzione considerato, per il quale si è scelto un impianto di produzione discontinuo (*batch plant*); in

seguito si definisce la produzione annua garantita dall'impianto stesso, posta pari a 150000 tonnellate/anno per il caso studio trattato¹¹.



The image shows a screenshot of a software window titled "Plant Editor". The window has a menu bar with the following options: "Basic data", "Electricity", "Other Fuel", "Water usage", "Heating & drying energy consumption", "Materials Transport To Plant", "Mixtures", and "All Consumables". The "Basic data" tab is currently selected. Below the menu bar, there are several input fields and a dropdown menu. The "Plant Name" field contains the text "esempio". Below it, there is a "Type" dropdown menu with "Batch" selected. To the right of the dropdown menu, there is a "Total production" field containing the value "150000".

Figura 4.16 – Scheda Basic data

Le schede successive *Electricity*, *Other Fuel*, *Water usage* non sono prese in considerazione in quanto la scelta progettuale non si considerano le emissioni relative alla produzione di elettricità, all'utilizzo di acqua ed al consumo di carburanti differenti rispetto a quello utilizzato all'interno dell'impianto di produzione.

All'interno della scheda *Heating & drying energy consumption* si definisce l'energia utilizzata all'interno dell'impianto per le operazioni di riscaldamento ed essiccazione dei materiali che compongono la miscela bituminosa (aggregati e bitume). In particolare, si sceglie la tipologia di carburante adottata all'interno dell'impianto considerato e ne si associa un consumo di energia annuo, dal quale l'applicativo genera il valore equivalente di emissioni di GHG¹².

¹¹ La tipologia di impianto ed il valore di produzione annua sono stati ricavati dalla Relazione Tecnica dell'impianto di produzione di Caprie (TO), di proprietà della Bernardi Impianti International SPA, redatta dall'Ing. Vito Rotunno.

¹² Per il caso studio analizzato si è adottato un impianto alimentato ad olio combustibile ed il valore di consumo di energia annuo è stato espresso in kWh.

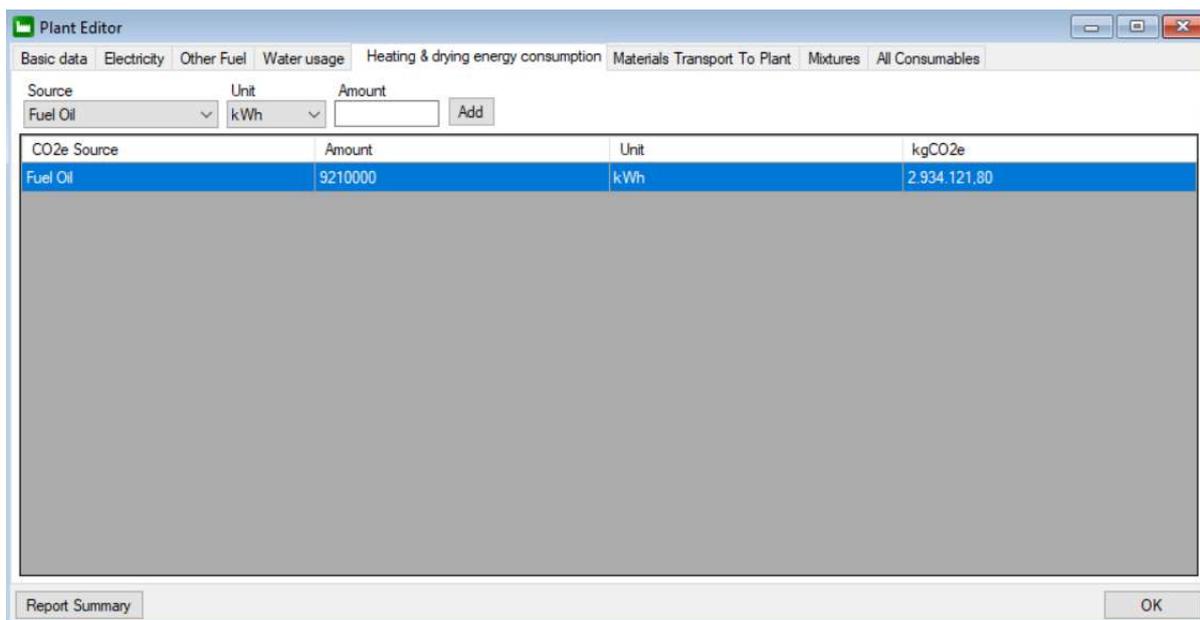


Figura 4.17 – Scheda Heating & drying energy consumption

La scheda *Materials Transport To Plant* consente di definire il trasporto all’impianto di produzione dei materiali utilizzati per la composizione delle miscele bituminose di progetto. In particolare, si tratta di aggregati fini e bitume, ai quali si associa la tipologia di mezzo di trasporto¹³, la distanza di trasporto dal sito di produzione all’impianto ed il coefficiente di utilizzazione del mezzo, il quale esprime la percentuale di capacità del mezzo sfruttata per il trasporto del materiale.

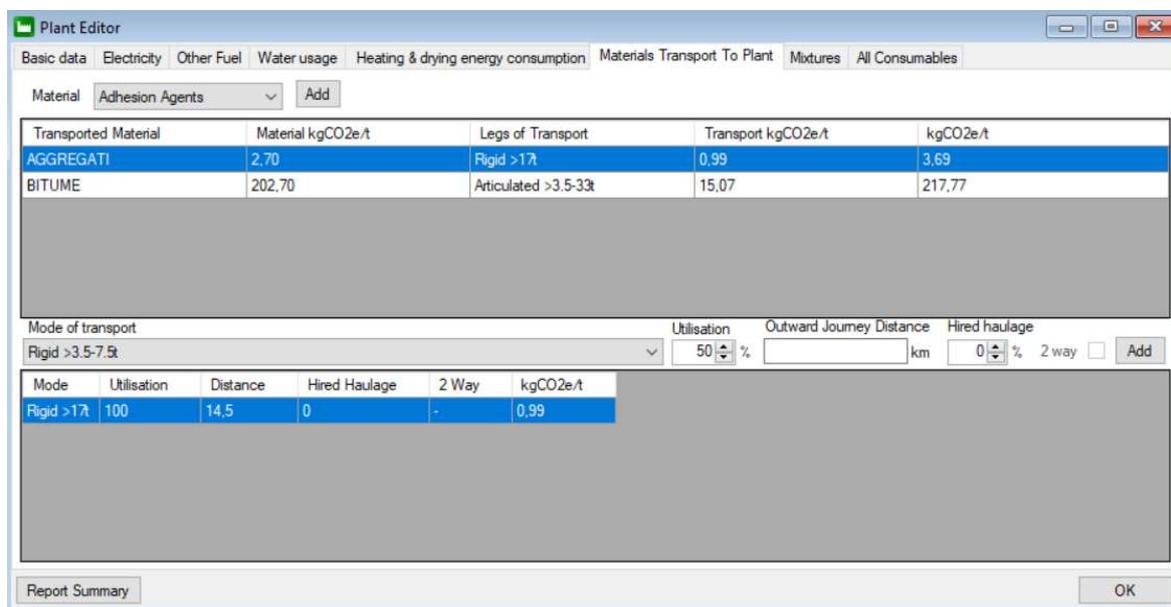


Figura 4.18 – Scheda Materials Transportation To Plant

¹³ Per il trasporto degli aggregati si è scelto un mezzo rigido, assimilabile ad un *dumper*, mentre per il trasporto di bitume si è scelto un mezzo articolato, assimilabile ad un *tanker truck*.

All'interno della scheda *Mixtures* sono definite le miscele bituminose di progetto, per le quali si inseriscono i dati di mix design (percentuale di aggregati e di bitume all'interno della miscela) e la quantità annuale prodotta in relazione al valore totale di produzione annuale dell'impianto considerato¹⁴.

The screenshot shows the 'Plant Editor' software interface, specifically the 'Mixture' configuration screen. The main window contains a table with the following data:

Mixture Name	Virgin Mix kg CO2e/t	RAP Saving kg CO2e/t	Transport kg CO2e/t	Heating kg CO2e/t	NonHeating kgCO2e/t	Total kgCO2e/t
esempio	11,81	0,03	3,03	2,17	0,14	17,12

Additional fields on the right side of the interface include:

- Mixture: esempio
- Annual Production (t): 45000
- Heating Time (s): 30

Below these fields is a table for material composition:

Material	Percent
misto granulare	95,0
Bitumen	5,0

At the bottom of the interface, there are summary fields:

- Total Production (t): 150000
- Unallocated Production (t): 105000

Figura 4.19 – Scheda *Mixtures* (valori di esempio)

PROGETTO

La sezione in oggetto consente la creazione del progetto di costruzione di una pavimentazione, con la possibilità di definire solamente strati legati a bitume. Si associano quindi le miscele bituminose definite all'interno dell'impianto di produzione a ciascuno strato della pavimentazione, si definisce la distanza ed il mezzo di trasporto per le miscele verso il sito di costruzione, si definisce l'energia impiegata nelle fasi di posa e compattazione, si definiscono eventuali interventi di manutenzione ed infine è possibile definire anche le operazioni di rimozione e smaltimento dei materiali della pavimentazione raggiunto il fine vita.

Per il caso di studio trattato all'interno del presente elaborato, le fasi di manutenzione e di rimozione degli strati della pavimentazione al raggiungimento del tempo di vita non vengono considerate, limitando i confini di sistema alla produzione dei materiali, loro trasporto e costruzione della pavimentazione.

Di seguito si riporta una breve descrizione di ciascuna scheda costituente la sezione *Progetto*.

La prima scheda, ugualmente a quanto riportato nella sezione *Impianti*, prende il nome di *Basic data*, all'interno della quale è possibile definire la tipologia di strada tra due opzioni:

- Designed;
- Evolved.

Ciò che varia a seconda della precedente scelta è il tempo di vita degli strati legati a bitume, valutato dalla posa del materiale in situ sino alla manutenzione o definitiva rimozione. Per il caso studio in esame questa scelta risulta essere influente in quanto non si considerano le operazioni di manutenzione e rimozione degli

¹⁴ Avendo analizzato separatamente i singoli strati di pavimentazione, la produzione annuale della singola miscela coincide con la produzione annuale dell'intero impianto.

strati di pavimentazione, come riportato in precedenza. Per completezza, si riporta la seguente figura in cui si evidenziano le differenze di tempo di vita tra una “designed road” ed una “evolved road”.

Course	Asphalt Material	Design Lifetime	
		Designed Road	Evolved Road
<i>Surface</i>	<i>Thin Surface Course Systems</i>	15	10
	<i>Paver Laid Surface Dressing</i>	10	10
	<i>Micro-surfacing</i>	6	6
	<i>Hot Rolled Asphalt (high stability)</i>	20	20
	<i>Hot Rolled Asphalt (low stability)</i>	-	25
	<i>Close Graded Macadam</i>	8	6
	<i>Surface Dressing (racked in)</i>	10	12
	<i>Surface Dressing (single)</i>	6	10
<i>Binder</i>	<i>Hot Rolled Asphalt</i>	30	20
	<i>Stone Mastic Asphalt</i>	30	20
	<i>Dense Bituminous Macadam / Heavy Duty Macadam</i>	30	20
	<i>Enrobés à Module Élevé (EME)</i>	50 ¹⁵	20
<i>Base</i>	<i>Dense Bituminous Macadam / Heavy Duty Macadam</i>	40	-
	<i>Enrobés à Module Élevé (EME)</i>	50 ¹⁵	-

Figura 4.20 – Tempo di vita degli strati della pavimentazione in funzione del tipo di strada

La scheda *Material Transport To Site* consente di introdurre le informazioni relative al trasporto delle miscele bituminose con le quali saranno costruiti gli strati della pavimentazione. Allo stesso modo di quanto effettuato per il trasporto dei materiali all’impianto di produzione, anche in questo caso per ciascuna miscela si definiscono un mezzo di trasporto¹⁵, il proprio coefficiente di utilizzazione e la distanza da percorrere, tra l’impianto di produzione ed il sito di costruzione.

¹⁵ Il mezzo considerato per il trasporto delle miscele bituminose è un mezzo rigido, assimilabile ad un *dumper*.

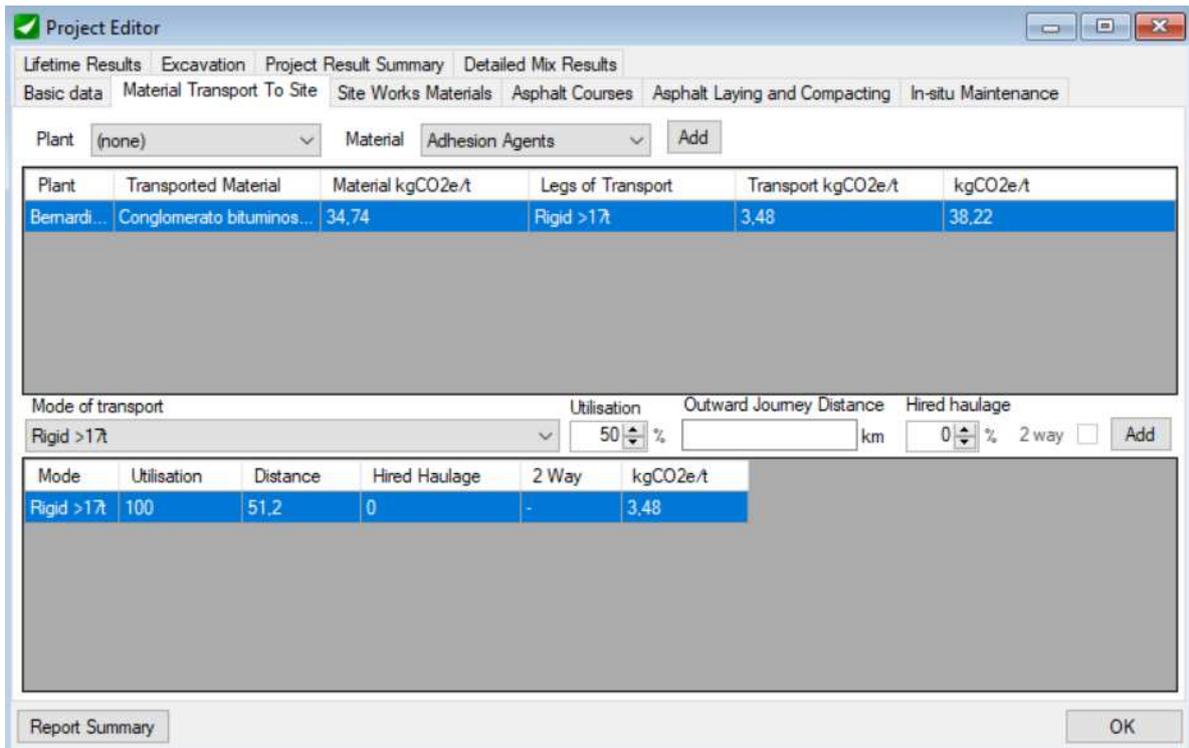


Figura 4.21 – Scheda Material Transport To Site

La scheda *Site Works Materials* permette di inserire i materiali che vengono trasportati direttamente in sito, senza passare per l’impianto di produzione precedentemente definito. Nel caso in esame non è previsto l’impiego di materiali di questo tipo.

All’interno della scheda *Asphalt Courses* si inseriscono le quantità di miscele bituminose impiegate per la costituzione di ciascuno strato di pavimentazione, espresse in tonnellate, e ricavate attraverso la seguente formula:

$$tonnellate_{asphalt\ course} = \frac{densità_{miscela\ bituminosa} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot volume_{strato} [m^3]}{1000}$$

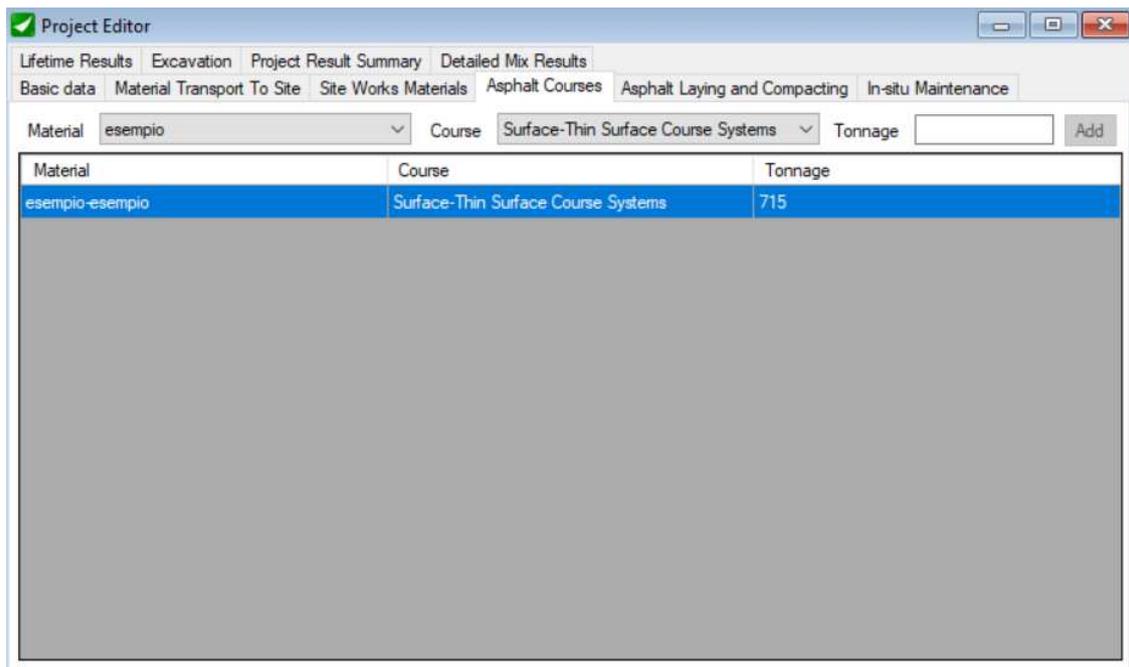


Figura 4.22 – Scheda Asphalt Courses

All'interno della scheda *Asphalt Laying and Compacting* si inserisce il valore dell'indicatore di emissione relativo alle operazioni di posa e compattazione del materiale bituminoso costituente gli strati di pavimentazione. A tal proposito, l'applicativo fornisce un valore standard pari a 4,7 kg CO₂eq per tonnellata di conglomerato bituminoso, ma è possibile inserire un valore differente a seconda delle valutazioni effettuate dall'utente. In questo caso, tale indicatore di emissione può essere ricavato considerando:

- Il consumo di carburante per ciascun mezzo di cantiere utilizzato durante le operazioni di posa e compattazione;
- La quantità di materiale sottoposto a tali operazioni, espressa in tonnellate.

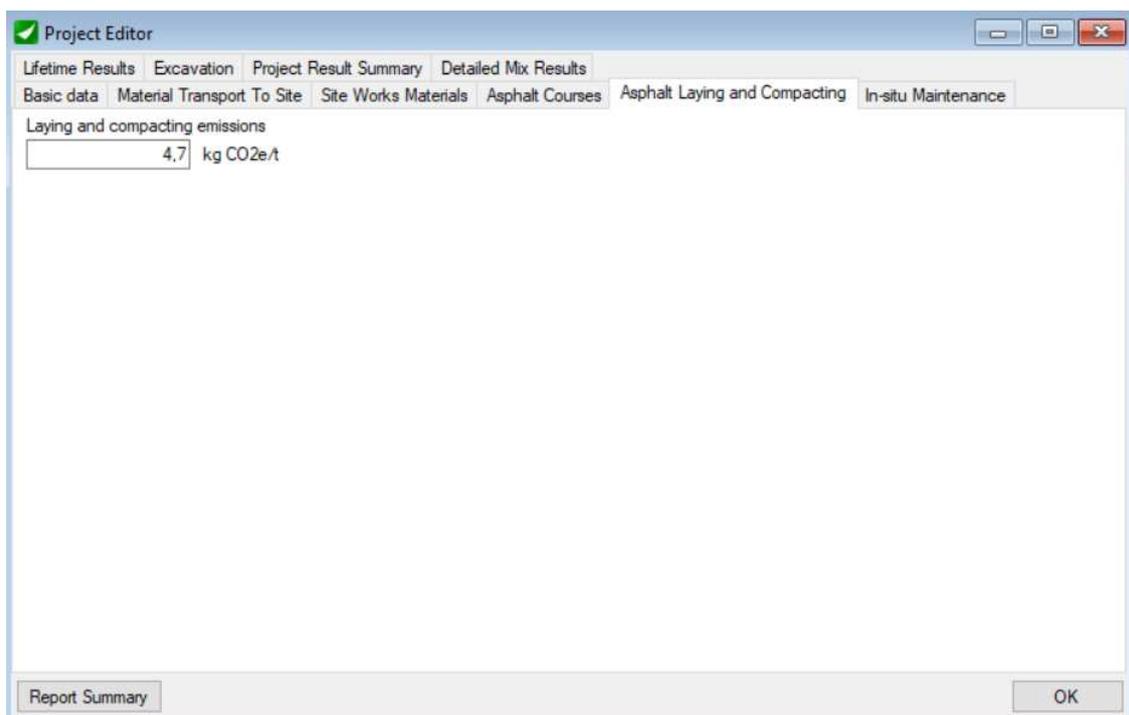


Figura 4.23 – Scheda Asphalt Laying and Compacting

Le schede *In-situ Maintenance* ed *Excavation* consentono rispettivamente di descrivere le operazioni di manutenzione degli strati di pavimentazione interessati e le operazioni di rimozione degli strati di pavimentazione dopo aver raggiunto il tempo di vita previsto. Nello studio in esame, queste operazioni non sono considerate all'interno dei confini di sistema, ma se ne riporta una breve descrizione per completezza di informazione. Per la fase di manutenzione, indipendentemente dall'operazione considerata, si definiscono un valore di emissione espresso in kgCO₂eq/t, la quantità di pavimentazione soggetta agli interventi di manutenzione e la durata aggiuntiva che tali interventi garantiscono alla pavimentazione stessa. Per quanto riguarda la rimozione del materiale a fine vita, si può scegliere la quantità di materiale da rimuovere, la destinazione del materiale rimosso, che può essere la discarica od il riciclaggio, espressa in percentuale sulla quantità di materiale rimosso ed i mezzi di trasporto utilizzati per il trasporto di suddetti materiali dal sito di costruzione al sito di destinazione.

Le schede *Lifetime Results* e *Project Result* riportano le emissioni relative alle fasi di LCA considerate, nella fattispecie le fasi di produzione dei materiali e costruzione della pavimentazione. In particolare, la scheda *Project Result* fornisce una valutazione delle emissioni suddivise in differenti operazioni, come segue:

- Steps 1-3: *Material extraction and processing* (produzione dei materiali da trasportare all'impianto di produzione);
- Step 4: *Transport to plant* (trasporto dei materiali all'impianto di produzione);
- Step 5: *Asphalt production* (produzione delle miscele bituminose all'interno dell'impianto);
- Step 6: *Transport to site* (trasporto delle miscele bituminose dall'impianto di produzione al sito di costruzione);
- Step 7: *Laying and compacting* (operazioni di posa e compattazione delle miscele bituminose);
- Step 8: *Project works* (emissioni relative ai materiali trasportati direttamente in cantiere);
- Step 9: *Maintenance* (fase di manutenzione);
- Step 10: *End of life* (operazioni di rimozione della pavimentazione o parte di essa una volta raggiunta la fine del tempo di vita).

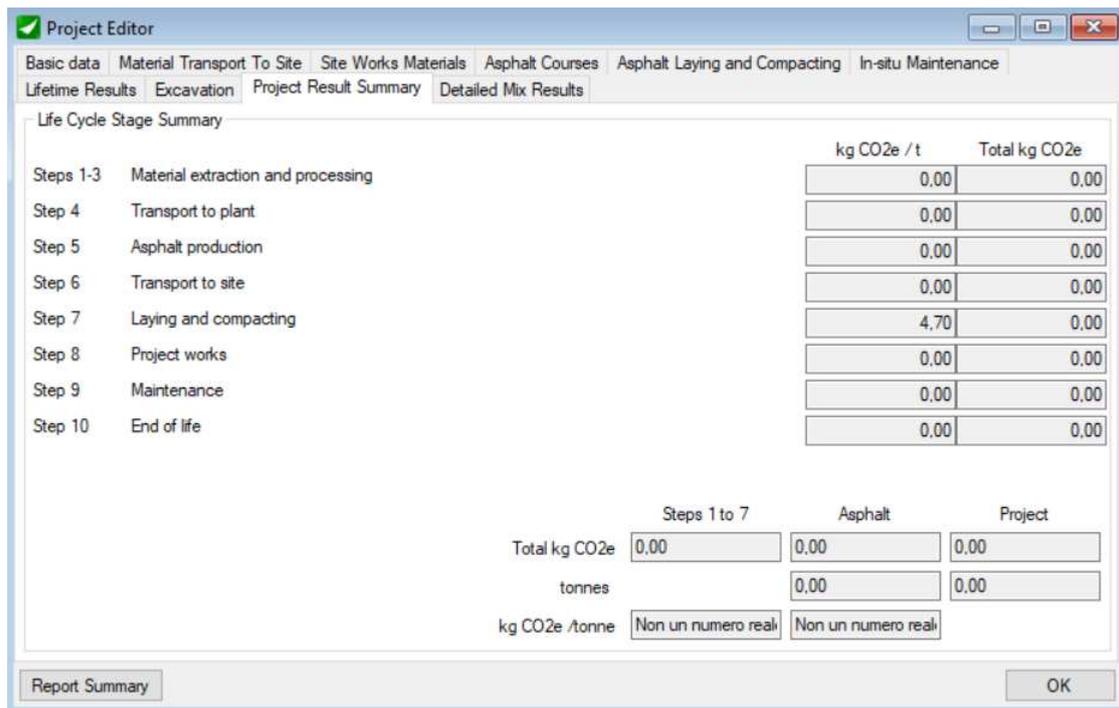


Figura 4.24 – Scheda Project Result Summary

4.3 ECORCE M

Il software è un'applicazione Java versione 7, il quale è stato sviluppato dall'IFSTTAR (*Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Reasaux*) per conto dell'Università di Grenoble. L'applicativo utilizza dati pubblici, in relazione al territorio francese ed il collegamento tra i dati di input e le valutazioni di impatto ambientale è costituito dalle masse e dalle tipologie di materiali utilizzati.

Lo scopo di ECORCE M è quello fornire dati di inventario relativi al ciclo di vita di una pavimentazione stradale ed indicatori di emissione relativi ai risultati ambientali ottenuti. La metodologia utilizzata all'interno dell'applicativo per la valutazione del ciclo di vita di una pavimentazione non fornisce necessariamente informazioni dirette sugli impatti ambientali, ma esprime una rappresentazione della pressione esercitata sull'ambiente. Per un dato indicatore, il valore attribuito può solamente essere utilizzato per scopi comparativi: l'ordine di grandezza delle differenze tra le opzioni non ha significato reale (*ECO-comparator applied to Road Construction and Maintenance Reference Manual, IFSTTAR, 2014*).

Per quanto riguarda l'interpretazione dei risultati, è necessario fare una distinzione tra gli indicatori che descrivono un effetto ambientale globale e quelli di portata più locale o regionale. In caso di effetto globale (come, ad esempio, l'effetto serra o potenziale di riscaldamento globale), si conosce l'effetto ambientale con certezza, mentre in caso di effetto locale (quale, ad esempio, potenziale di creazione di ozono fotochimico, acidificazione, eutrofizzazione, soglia di tossicità ed ecotossicità), l'effetto ambientale dipende dal punto specifico di rilascio delle sostanze interessate (*ECO-comparator applied to Road Construction and Maintenance Reference Manual, IFSTTAR, 2014*).

Nella seguente figura, si illustrano le fasi principali attraverso le quali opera l'applicativo:

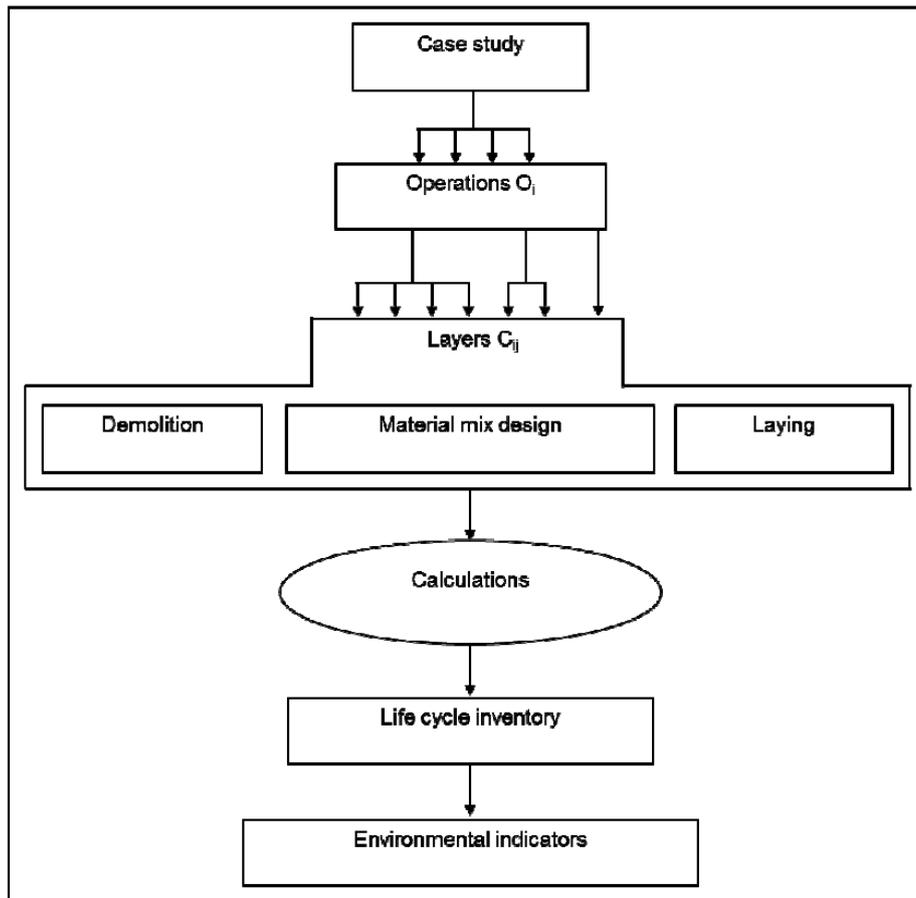


Figura 4.25 – Fasi di operazione di ECORCE M

Di seguito si fornisce una descrizione del funzionamento dell'applicativo, dei dati di input inseribili e dei risultati in output espressi in seguito all'analisi di LCA riguardo la pavimentazione di progetto.

LAYERS DEFINITION

All'interno della presente scheda si definiscono le fasi di analisi considerate per l'analisi di LCA da condurre, le caratteristiche geometriche della pavimentazione stradale e la tipologia di materiale costituente ciascuno strato di pavimentazione. Per la pavimentazione oggetto del presente elaborato, sono considerate le fasi di produzione dei materiali e di costruzione della pavimentazione, le quali sono assunte accorpate in un'unica fase dall'applicativo¹⁶.

Per la fase complessiva di produzione e costruzione, l'applicativo richiede la definizione dei seguenti parametri:

- Tipologia: tipologia di strati di pavimentazione che costituiscono l'intera struttura, per il quale il caso analizzato prevede la presenza di uno strato di usura, di uno strato di collegamento (o, equivalentemente, strato di binder), di uno strato di base e di uno strato di fondazione;

¹⁶ L'applicativo distingue le seguenti operazioni: produzione e costruzione, manutenzione, rimozione materiale a fine vita.

- Materiale utilizzato¹⁷: tipologia di materiale utilizzato per la costruzione degli strati di pavimentazione previsti, per i quali all'interno del caso studio trattato si considerano delle miscele bituminose per gli strati di usura, binder e base, mentre per lo strato di fondazione si considera un materiale misto granulare proveniente da cava di estrazione;
- Geometria: si inseriscono le dimensioni della geometria di ogni strato, in particolare i valori di lunghezza, larghezza ed altezza.

Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Length(m)	Width(m)	Deconstruction	Type of material
Delete layer	Wearing course	Usura	5.0	1000.0	3.75	Asphalt material
Delete layer	Binder course	Binder	6.0	1000.0	3.75	Asphalt material
Delete layer	Base course	Base	22.0	1000.0	3.75	Asphalt material
Delete layer	Sub-base layer	Fondazione	15.0	1000.0	3.75	Bank-run gravel

Figura 4.26 – Interfaccia grafica “Layers definition”

CASE STUDY SPECIFICATION

Si definiscono, per ciascuno strato, la densità in situ della miscela bituminosa e la relativa composizione secondo il mix design (quantità di aggregati e bitume), oltre alla tipologia di impianto di produzione, a ciascuna delle quali l’applicativo associa un valore differente di indicatore di emissione. In aggiunta, si definiscono le distanze di trasporto relative alle materie prime, in particolare la distanza di trasporto degli aggregati dal sito di estrazione all’impianto di produzione e la distanza di trasporto del bitume dalla raffineria all’impianto di produzione e la distanza di trasporto delle miscele bituminose dall’impianto di produzione al sito di costruzione. La scelta del mezzo di trasporto non è modificabile da parte dell’utente, ma è assunta direttamente dall’applicativo¹⁸.

La scelta dei mezzi di cantiere è compresa altresì all’interno della presente scheda, sotto la dicitura “Laying”. Nello specifico, per ciascun mezzo di cantiere utilizzato l’applicativo richiede l’inserimento dei seguenti valori:

- Tempo di operazione: rappresenta il tempo necessario al singolo mezzo di cantiere per completare le operazioni di competenza, valore espresso in ore;

¹⁷ Le caratteristiche dei materiali considerati si riferiscono al database di ECORCE M e non possono essere modificate dall’utente secondo esigenza.

¹⁸ L’applicativo assume di default un mezzo di trasporto univoco con capacità pari a 24 tonnellate.

- Consumo di carburante: rappresenta il valore di consumo relativo a ciascun mezzo di cantiere, espresso in litri/ora e reperito per il caso studio in oggetto all'interno del lavoro di (Blengini et al., 2010);
- Consumo di acqua: tale valore non è considerato ai fini del computo delle emissioni all'interno del presente caso studio;
- Distanza di trasporto dei mezzi di cantiere: rappresenta la distanza di trasporto dei mezzi di cantiere dal luogo di fornitura al sito di costruzione. Tale valore non è considerato ai fini del computo delle emissioni relativo al caso studio in oggetto.

Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Wearing course	Usura	5.0	3750.0	false	Asphalt material

Components	Content	Road transport	Rail transport	Waterway transport	Maritime transport	Transport by dumper	Density
Aggregates (%)	94.7	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Asphalt (%)	5.3	229.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 4.27 – Interfaccia grafica “Case study specification-Asphalt material formulation”

Type of equipment	Brand / Model	Operating time (h)	Fuel (L/h)	Water (L/h)	Haul distance (km)
Compactor	Bomag BW 203 ad-4	1.67	32.7	0.0	0.0
Paver	Bomag BF 600	0.12	43.1	0.0	0.0

Figura 4.28 – Interfaccia grafica “Case study specification-Laying”

RESULTS

La scheda fornisce i risultati di output relativi all'analisi di LCA condotta dall'applicativo in relazione alla pavimentazione definita nelle schede di input. Le tipologie di risultati generati riguardano i flussi totali ed i relativi indicatori di impatto, divisi nelle seguenti schede di output:

- Inventario delle quantità di materiali utilizzati, espresse in termini di massa e di volume e riferite distintamente sia per fase di LCA che per ciascuno strato di pavimentazione;
- Consumi energetici ed idrici, anch'essi espressi sia in funzione della singola fase, sia riferiti al singolo strato di pavimentazione;
- Indicatori di emissione e rispettivi flussi, espressi sia in funzione della singola operazione, sia della singola fase, sia del singolo strato di pavimentazione¹⁹;
- Inventario riassuntivo dei consumi e delle emissioni, per ciascuna categoria

Compatibilmente con lo scopo del presente lavoro, delle schede di output sopra descritte si considerano di interesse la scheda relativa all'inventario dei materiali e la scheda relativa alle emissioni di gas serra, riportate come GWP (Potenziale di Riscaldamento Globale).

La scheda relativa all'inventario dei materiali fornisce una valutazione dei materiali utilizzati all'interno del progetto analizzato, sia per quanto riguarda la fase di produzione, che per la fase di costruzione, che per il trasporto degli stessi, quantità espresse in termini di massa o di volume. Le terminologie presenti all'interno della tabella di output assumono il seguente significato:

- *Asphalt*: quantità di bitume (tonnellate) utilizzata e consumata all'interno delle operazioni che interessano tale materiale;
- *Hot-mix asphalt plant*: quantità di conglomerato bituminoso (tonnellate) prodotta all'interno dell'impianto di produzione;
- *Construction equipment*: consumo di energia (Megajoule) relativo all'impiego dei mezzi di cantiere;
- *Aggregates*: quantità di aggregati (tonnellate) utilizzata e consumata all'interno delle operazioni che interessano il materiale stesso;
- *Road transport*: distanza percorsa (chilometri) per il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione e delle miscele bituminose al sito di costruzione.

Di seguito si riporta un estratto dell'interfaccia grafica di output relativa all'inventario dei materiali:

Materials consumption							
Name	Operation	Asphalt (t) Eurobitume 2011	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (t) Ref. Manual § 4.2.4.1.12	Construction equipment (MJ) Ref. Manual § 4.2.4.1.16	Aggregates (t) Ref. Manual § 4.2.4.1.18	Road transport (km) AFNOR, FD P01-015	
Usura	Produzione+Costruzione	2.5281E1	4.77E2	2.1492E3	4.5172E2	2.7571E3	
Binder	Produzione+Costruzione	2.6102E1	5.8005E2	2.6147E3	5.5305E2	3.2781E3	
Base	Produzione+Costruzione	9.5708E1	2.1268E3	9.6096E3	2.0311E3	1.2023E4	
Fondazione	Produzione+Costruzione			2.0355E3	1.5188E3	7.4836E3	

¹⁹ ECORCE M fornisce risultati di output relativi alle seguenti categorie di impatto ambientale: Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP), Potenziale di Acidificazione (AP), Potenziale di Eutrofizzazione (EI), Formazione di Ozono Fotochimico (POCP), Potenziale di Ecotossicità (EP), Potenziale di Tossicità Cronica (TP).

Figura 4.29 – Tabella dei materiali

La scheda relativa alle emissioni di gas serra calcola sia il valore dell'indicatore di emissione che del flusso di emissione stessa, quest'ultimo espresso in kg CO₂ equivalente e definito secondo quanto assunto dal GIEC (*Gruppo Intergovernativo di Esperti sui Cambiamenti Climatici*). Di seguito si riportano le interfacce grafiche generate dall'applicativo, le quali esprimono i risultati relativi alla categoria di impatto in termini di valore assoluto ed in termini di percentuale di ciascuna operazione sul totale delle emissioni; per ognuna di queste due tipologie di output l'applicativo fornisce i rispettivi grafici.

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																																								
Greenhouse effect		Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical																																																								
Hypothesis		Reference		Materials		Energy																																																								
Water																																																														
Greenhouse effect																																																														
Unit indicator GWP per process																																																														
Asphalt (kg eq.CO2/t)		Modified asphalt (kg eq.CO2/t)				Concrete mixing plant (kg eq.CO2/t)																																																								
1.9138E2		3.2609E2				3.9455E0																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th>Total</th> <th colspan="4">Layers</th> <th>Operations</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Binder course</th> <th>Wearing course</th> <th>Base course</th> <th>Sub-base layer</th> <th>Produzione+Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.82E4</td> <td>5E3</td> <td>4.84E3</td> <td>1.83E4</td> <td></td> <td>2.82E4</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td>7.63E4</td> <td>1.39E4</td> <td>1.14E4</td> <td>5.1E4</td> <td></td> <td>7.63E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.39E3</td> <td>2.21E2</td> <td>1.82E2</td> <td>8.13E2</td> <td>1.72E2</td> <td>1.39E3</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>9.99E3</td> <td>1.21E3</td> <td>9.9E2</td> <td>4.45E3</td> <td>3.33E3</td> <td>9.99E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>2.99E4</td> <td>3.84E3</td> <td>3.23E3</td> <td>1.41E4</td> <td>8.77E3</td> <td>2.99E4</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.46E5</td> <td>2.42E4</td> <td>2.07E4</td> <td>8.86E4</td> <td>1.23E4</td> <td>1.46E5</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layers				Operations		Binder course	Wearing course	Base course	Sub-base layer	Produzione+Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	2.82E4	5E3	4.84E3	1.83E4		2.82E4	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	7.63E4	1.39E4	1.14E4	5.1E4		7.63E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.39E3	2.21E2	1.82E2	8.13E2	1.72E2	1.39E3	Aggregates (kg eq.CO2/t)	9.99E3	1.21E3	9.9E2	4.45E3	3.33E3	9.99E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	2.99E4	3.84E3	3.23E3	1.41E4	8.77E3	2.99E4	Total (kg eq.CO2/t)	1.46E5	2.42E4	2.07E4	8.86E4	1.23E4	1.46E5
	Total	Layers				Operations																																																								
		Binder course	Wearing course	Base course	Sub-base layer	Produzione+Costruzione																																																								
Asphalt (kg eq.CO2/t)	2.82E4	5E3	4.84E3	1.83E4		2.82E4																																																								
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	7.63E4	1.39E4	1.14E4	5.1E4		7.63E4																																																								
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.39E3	2.21E2	1.82E2	8.13E2	1.72E2	1.39E3																																																								
Aggregates (kg eq.CO2/t)	9.99E3	1.21E3	9.9E2	4.45E3	3.33E3	9.99E3																																																								
Road transport (kg eq.CO2/km)	2.99E4	3.84E3	3.23E3	1.41E4	8.77E3	2.99E4																																																								
Total (kg eq.CO2/t)	1.46E5	2.42E4	2.07E4	8.86E4	1.23E4	1.46E5																																																								

Figura 4.30 – Emissioni GWP in valore assoluto²⁰

²⁰ Il significato delle categorie è il medesimo riportato per la tabella dei materiali.

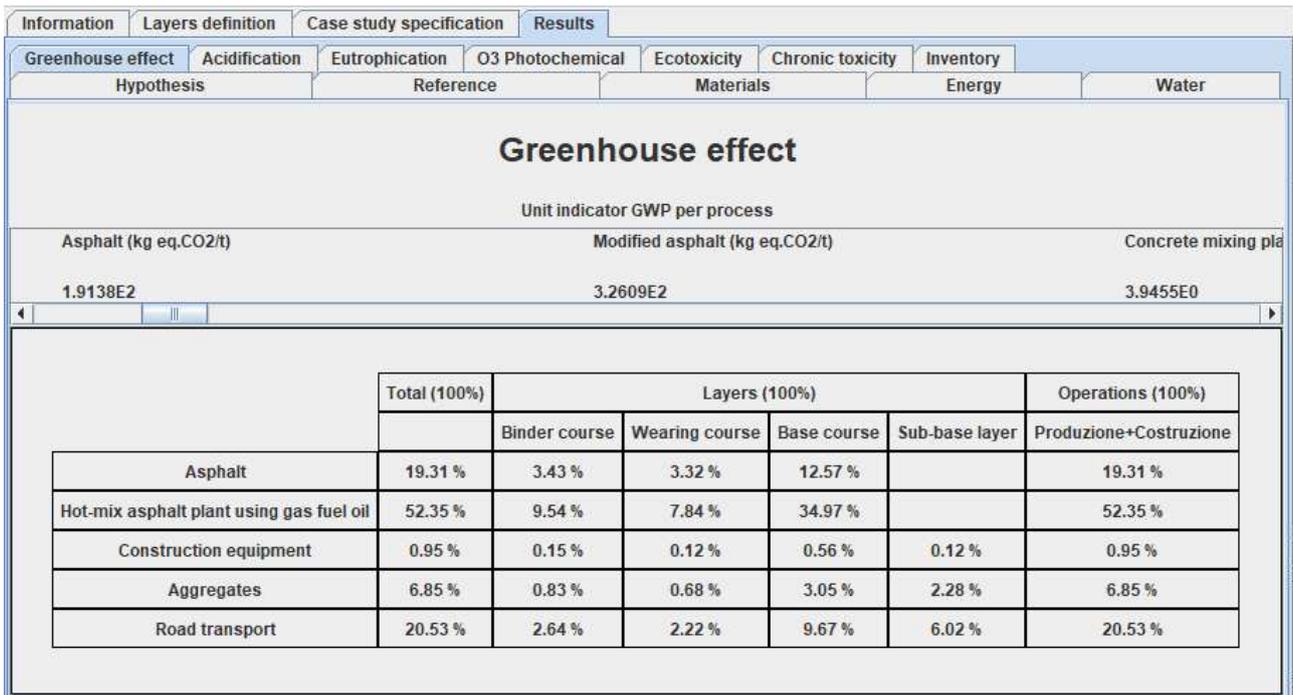


Figura 4.31 – Emissioni GWP in percentuale²¹

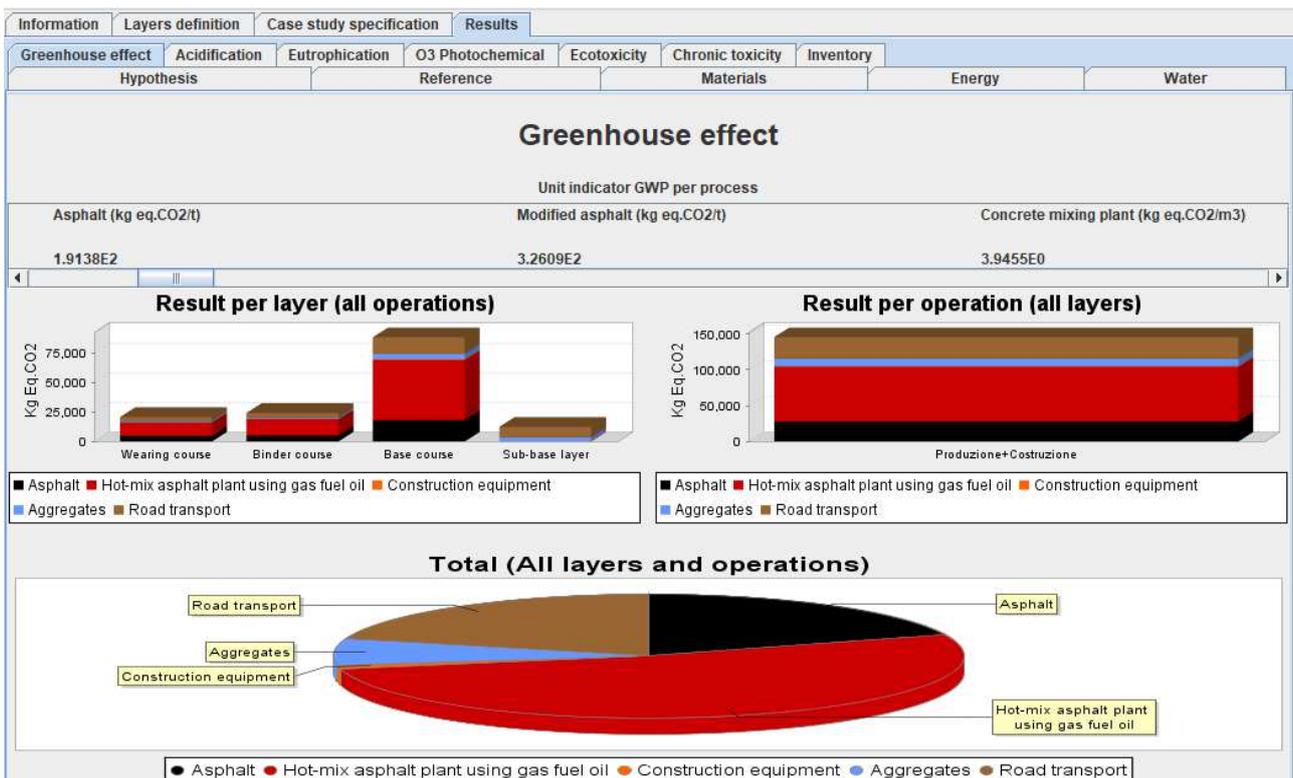


Figura 4.32 – Emissioni GWP in forma grafica

²¹ Il significato delle categorie è il medesimo riportato per la tabella dei materiali.

4.4 Athena Impact Estimator for Highways

L'applicativo in questione è un'applicazione web che fornisce una valutazione del ciclo di vita ambientale (LCA) ed un'analisi dei costi relativi al ciclo di vita (LCCA) in riferimento alla costruzione di una pavimentazione stradale, alla produzione dei materiali necessari per tale scopo ed alla manutenzione della stessa. Esso è stato sviluppato per dall'*Athena Sustainable Materials Institute*, organizzazione no-profit che opera nel Nord America, in particolare in relazione al territorio canadese ed al territorio statunitense.

Lo studio di LCA di una generica pavimentazione adotta un inventario relativo ad un processo "*cradle-to-grave*" ("dalla culla alla tomba") per un periodo di analisi variabile, computabile in modo indipendente dall'utente, comprendendo le fasi di produzione dei materiali, trasporto dei materiali, costruzione della pavimentazione stradale e manutenzione della stessa, escludendo dalla medesima analisi valutazioni inerenti al fine vita della pavimentazione. I dati disponibili all'interno del database implementato nell'applicativo si riferiscono a valori medi nazionali (canadesi e statunitensi), sia per quanto riguarda la produzione dei materiali, che per i valori prestazionali di ciascun mezzo, che sia esso un mezzo di trasporto od un mezzo di cantiere, in conformità alla norma ISO 14040/14044. A tali valori, possono essere affiancati o sostituiti valori implementati dall'utente stesso, secondo dati di inventario relativi a database differenti a quello dell'applicativo.

I risultati forniti in output comprendono flussi di energia e materie prime, emissioni in aria, emissioni in acqua ed emissioni sul suolo. *Athena Impact Estimator* definisce le seguenti categorie di impatto ambientale, frutto di una valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA) basata sullo strumento *US EPA TRACI (Strumento per la Riduzione e la Valutazione di Sostanze Chimiche ed Altri Impatti ambientali)*, in conformità con la norma ISO 21930/31:

- Potenziale di riscaldamento globale, misurato in kg di CO₂ equivalente;
- Potenziale di acidificazione, misurato in kg di SO₂ equivalente;
- Particolato per la salute umana, valutato in kg di PM_{2,5} equivalente;
- Potenziale di eutrofizzazione, misurato in kg N equivalente;
- Potenziale di smog, misurato in kg di O₃ equivalente;
- Potenziale di riduzione dell'ozono, misurato in kg di CFC 11 equivalente;
- Consumo totale di energia primaria, valutato in MJ;
- Consumo di energia non rinnovabile, valutato in MJ;
- Consumo di combustibili fossili, valutato in MJ.

Si riporta di seguito una breve descrizione riguardo il funzionamento dell'applicativo, focalizzandosi in particolare sulle funzionalità relative alle schede di input e sulle tipologie di risultati forniti in output che interessano il caso studio oggetto del presente elaborato.

PROJECT INFORMATION

All'interno della scheda è richiesto l'inserimento di dati generali inerenti al progetto di pavimentazione stradale. Tra queste informazioni, è richiesta la zona geografica all'interno della quale considerare il progetto da realizzare (la scelta ricade solamente tra Stati Uniti e Canada), in modo tale che l'applicativo scelga quale database regionale considerare per le caratteristiche dei materiali. Accanto alla scelta della posizione geografica, si definiscono tre distanze di trasporto per valutare gli effetti del trasporto stesso durante le operazioni di costruzione e, eventualmente, le operazioni di manutenzione (quest'ultime non considerate all'interno del presente caso studio):

- Distanza media tra impianto di produzione di conglomerato bituminoso ed il sito di costruzione della pavimentazione;
- Distanza media tra il sito di costruzione ed il luogo di accumulo del materiale. Per il presente caso studio non si è presa in considerazione tale distanza, trascurando il contributo, poiché minimo, dell'effetto del trasporto per lo smaltimento o lo stoccaggio di qualsiasi materiale rimosso (o riciclato);
- Distanza media tra il luogo di deposito dell'attrezzatura di cantiere ed il sito di costruzione. Per il presente caso studio non si è presa in considerazione tale distanza, trascurando il contributo, poiché minimo, riguardo gli effetti del trasporto delle attrezzature al cantiere.

Si inseriscono inoltre il valore della durata di progetto della pavimentazione stradale, per il quale l'applicativo considera una forbice temporale tra i 30 anni ed i 100 anni, all'interno dei quali sono considerati anche gli anni in cui effettuare una eventuale manutenzione dell'opera stessa.

Riguardo all'analisi di costo (LCCA), l'applicativo richiede di inserire alcune informazioni riguardo alla valuta da considerare per il computo dei costi, il tasso di cambio, il tasso di inflazione ed il tasso di sconto. Non essendo considerata l'analisi di costo per il presente elaborato, non si riportano ulteriori dettagli in merito.

The screenshot shows the 'Project Information' tab of a software interface. At the top, there are several navigation tabs: 'Project Information' (selected), 'Project Roadways', 'Basic Materials', 'Construction Equipment', 'Material Transportation', 'LCCA Cost Items', and 'Operating Energy Consump.'. Below the tabs, the 'Project Name' field contains 'PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE'. The 'Project Type' dropdown is set to 'Roadway'. The 'Project Location' dropdown is set to 'USA'. The 'Project Currency' dropdown is set to 'Select a Currency'. The 'Project Lifespan' dropdown is set to '30 years'. The 'Units' section has 'SI' selected. The 'Average Distance Plant to Site' field is '51 km'. The 'Average Distance Site to Stockpile' field is '0 km'. The 'Average Distance Equipment Depot to Site' field is '0 km'. The 'USD to CAD Exchange Rate ?' field is '0.0000'. The 'Real Inflation Rate ?' field is '0.00 %'. The 'Real Discount Rate ?' field is '0.00 %'.

Figura 4.33 – Scheda Project Information

PROJECT ROADWAYS

In questa scheda è possibile definire la sezione trasversale della pavimentazione, in modo tale da poter determinare i volumi dei materiali da parte dell'applicativo. Si assegnano quindi i valori di lunghezza del tratto stradale considerato (per il caso studio essa è pari a 1 km, che corrisponde all'Unità Funzionale del LCA), il numero corsie (per il caso studio pari ad una corsia), il numero di strati legati a bitume ed il numero di strati granulari e la tipologia di pavimentazione, flessibile o rigida. Non è prevista la presenza di scarpate laterali e si omette il valore di costo per la realizzazione dell'opera in quanto non si tratta l'analisi di costo. Una volta definiti questi valori, si implementano i valori relativi alla geometria di ciascuno strato di pavimentazione ed il materiale costituente ciascuno di essi²².

²² Per i valori dettagliati si rimanda alla consultazione del **Paragrafo 2** del presente elaborato.

📄 Roadway Information
🏗️ Site Preparation
📅 Rehabilitation Schedule
🚗 Pavement Vehicle Interaction

Survey

Name:

Lane Length:

of Lanes: [# Lanes In Both Directions]

of Pavement Lifts:

of Granular Layers: [Base & Sub-Base]

Initial Cost:

Pavement Types

Flexible Pavement:

Rigid Pavement:

Slab Length:

Reinforcing Steel

Epoxy Coated Steel:

Galvanized Steel:

Black Steel:

Left Shoulder Elements

Paved Shoulder:

of Lifts:

Unpaved Shoulder:

Left Side Rounding:

Fore Slope: :

Right Shoulder Elements

Paved Shoulder:

of Lifts:

Unpaved Shoulder:

Right Side Rounding:

Fore Slope: :

Figura 4.34 – Scheda Roadway Information

Roadway Cross Section

Lanes
Lane 1 Lift 1
Lane 1 Lift 2
Lane 1 Lift 3
Granular Layer 1

Roadway Design Details

Element Name	Material	Width [m]	Thickness [mm]	Density [tonnes/m3]	Mass [tonnes]	Area [m2]	Volume [m3]
Lane 1 Lift 1	Usura	3.7500	50.0000	2.544	477.0000	0.1875	187.5000
Lane 1 Lift 2	Collegamento	3.7500	60.0000	2.578	580.0500	0.2250	225.0000
Lane 1 Lift 3	Base	3.7500	220.0000	2.578	2126.8500	0.8250	825.0000
Granular Layer 1	Fondazione	3.7500	150.0000	2.7	1518.7500	0.5625	562.5000

Figura 4.35 – Scheda Roadway Information²³

Oltre alla definizione della geometria della pavimentazione stradale considerata ed ai materiali costituenti ciascuno strato della stessa, l'applicativo consente di definire le operazioni riguardo alla preparazione del sito di costruzione (operazioni di scavo e riporto di materiale), alla pianificazione della manutenzione durante il periodo di vita della pavimentazione e l'interazione dei veicoli con la pavimentazione durante la fase operativa (o di esercizio) della pavimentazione stessa, il quale consente di modellare il possibile aumento di consumo di carburante dovuto al deterioramento della pavimentazione nel tempo e le prestazioni della stessa nel tempo. All'interno del caso studio analizzato, non si considera il contributo relativo a queste schede, poiché ricadono al di fuori dei confini di sistema adottati per la presente analisi di LCA.

CONSTRUCTION EQUIPMENT

La scheda in oggetto riguarda la definizione dei mezzi di cantiere operativi durante la fase di costruzione della pavimentazione, in particolar modo in riferimento alle operazioni di stesura e compattazione dei materiali. Ai valori forniti dall'applicativo, derivanti dai database regionali utilizzati di default, si sono considerati dei

²³ I materiali inseriti per ciascuno strato sono stati definiti diversamente a quelli proposti dal database di Athena Impact Estimator, secondo quanto riportato all'interno di (Blengini et al., 2010) e (Del Frari, 2021).

valori di consumo di carburante e di produttività reperiti all'interno dei lavori di (Blengini et al, 2010) e (Del Frari, 2021).

	Activity	Equipment	Qty	Fuel Consumption			Production Rates		Load Factor	hr/day	min/hr	Secondary Fuel Consumption		
				Fuel	Value	Unit	Value	Unit	Value	Value	Value	Fuel	Value	Unit
<input type="checkbox"/>	Asphalt Paving HMA	Asphalt Paver *	1	Diesel	0.0077	l/tonne	9,752.0000	tonne/day	0.62	8	60			
<input type="checkbox"/>	Asphalt Paving HMA	Compactor *	1	Diesel	0.0199	l/tonne	3,248.0000	tonne/day	0.56	8	60			
<input type="checkbox"/>	Granular Compaction	Compactor *	1	Diesel	0.0199	l/tonne	3,248.0000	tonne/day	0.56	8	60			
<input type="checkbox"/>	Granular Shaping and Grading	Grader *	1	Diesel	0.0074	l/tonne	43,488.0000	tonne/day	0.61	8	60			

Figura 4.36 – Scheda Construction equipment

MATERIAL TRANSPORTATION

La scheda si riferisce al trasporto delle materie prime all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso, mentre il computo del trasporto delle miscele bituminose dall'impianto al sito di costruzione è considerato all'interno della scheda *Project Information*, già trattata precedentemente. L'applicativo non consente di modificare la tipologia di mezzo di trasporto, la quale è assunta secondo i dati predefiniti presenti all'interno del database regionale nordamericano a cui si appoggia, ma consente unicamente di computare le distanze di trasporto relative a ciascuna materia prima utilizzata. Da notare che in questa scheda è possibile computare le distanze relative al trasporto dei materiali granulari, mentre per quanto riguarda il trasporto del bitume il dato relativo è contenuto all'interno del computo delle emissioni relative alla produzione del materiale stesso.

	Material			Road		Rail		Barge	
	ID	Name	Rolled Up (?)	Distance [km]	Fuel	Distance [km]	Fuel	Distance [km]	Fuel
<input type="checkbox"/>	202	Coarse Aggregate Crushed Stone *	False	14.50	Diesel Road Short Haul	0.00	Diesel	0.00	RFO
<input type="checkbox"/>	199	Fine Aggregate Crushed Stone *	False	14.50	Diesel Road Short Haul	0.00	Diesel	0.00	RFO

Figura 4.37 – Scheda Material Transportation

Le rimanenti schede di input riguardano il computo dei costi relativi alle operazioni considerate all'interno dell'analisi di LCA ed il consumo di energia da parte dei veicoli durante la fase di esercizio della pavimentazione. Queste due schede non sono considerate al fine del computo delle emissioni per il presente caso studio.

RESULTS

I risultati in output forniti dall'applicativo sono suddivisi in differenti schede, coerentemente con quanto già riportato all'inizio del presente paragrafo, per ognuna delle quali i valori si riferiscono alle seguenti operazioni:

- Produzione dei materiali;
- Trasporto dei materiali all'impianto di produzione;
- Utilizzo dei mezzi di cantiere;
- Trasporto delle miscele bituminose al sito di costruzione.

Le schede di interesse per il caso studio trattato all'interno dell'elaborato sono:

- Inventario dei materiali, per i quali l'applicativo fornisce la quantità di materiali utilizzati espressa in termini di massa e di volume;
- Emissioni di GWP, espresse in kg CO₂ equivalente per ciascuna operazione delle precedentemente elencate e valutate attraverso il computo di un indicatore di impatto secondo la formula proposta dall'IPCC (International Panel on Climate Change) (1990) per un orizzonte temporale di 100 anni.

Material Name	Quantity	Unit	Mass Value	Mass Unit	Record Type
Base	825.000	m3	2,126.850	tonnes	User Defined
Collegamento	225.000	m3	580.050	tonnes	User Defined
Fondazione	562.500	m3	1,518.750	tonnes	User Defined
Usura	187.500	m3	477.000	tonnes	User Defined

Figura 4.38 – Inventario dei materiali

Summary Measure	Unit	Manufacturing			Construction		
		Material	Transportat...	Total	Equipment	Transportat...	Total
Global Warming Potential	kg CO2 eq	1.312e+5	6.790e+3	1.380e+5	3.760e+2	1.986e+4	2.024e+4
Acidification Potential	kg SO2 eq	5.824e+2	6.534e+1	6.477e+2	3.618e+0	1.911e+2	1.948e+2
HH Particulate	kg PM2.5 eq	3.367e+1	3.618e+0	3.729e+1	2.004e-1	1.058e+1	1.078e+1
Eutrophication Potential	kg N eq	2.330e+1	4.063e+0	2.736e+1	2.250e-1	1.189e+1	1.211e+1
Ozone Depletion Potential	kg CFC-11 eq	3.988e-5	2.372e-7	4.012e-5	1.313e-8	6.938e-7	7.069e-7
Smog Potential	kg O3 eq	5.687e+3	2.063e+3	7.750e+3	1.142e+2	6.035e+3	6.149e+3
Total Primary Energy	MJ	7.702e+6	9.901e+4	7.801e+6	5.482e+3	2.896e+5	2.951e+5
Non-Renewable Energy	MJ	7.689e+6	9.897e+4	7.788e+6	5.480e+3	2.895e+5	2.950e+5
Fossil Fuel Consumption	MJ	7.685e+6	9.882e+4	7.783e+6	5.472e+3	2.891e+5	2.945e+5

Figura 4.39 – Categorie di impatto ambientale

5. Descrizione e applicazione dei modelli matematici

In questo capitolo si descrivono dettagliatamente i modelli matematici utilizzati da ciascun applicativo, i quali sono alla base del calcolo delle emissioni di CO₂ equivalente (quantificate nel caso specifico in kg CO₂eq) relative a ciascuna fase considerata all'interno dello studio di LCA oggetto del presente lavoro. Si trattano, nello specifico, la fase di produzione e la fase di costruzione, a loro volta suddivise in:

- Produzione delle materie prime (aggregati, bitume) e produzione delle miscele bituminose in impianto di produzione → FASE DI PRODUZIONE;
- Trasporto all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso delle materie prime (aggregati, bitume) necessarie alla produzione delle miscele di progetto → FASE DI PRODUZIONE;
- Trasporto dall'impianto di produzione al sito di costruzione della pavimentazione di progetto delle miscele bituminose → FASE DI COSTRUZIONE;
- Trasporto al sito di costruzione della pavimentazione di progetto degli aggregati necessari alla costituzione dello strato di fondazione in misto granulare, in quanto non è necessaria alcuna lavorazione in un impianto intermedio → FASE DI COSTRUZIONE;
- Utilizzo dei mezzi di cantiere per le operazioni di stesura e compattazione dei materiali finiti costituenti gli strati della pavimentazione → FASE DI COSTRUZIONE.

5.1 Produzione delle materie prime e delle miscele bituminose

Si descrivono i modelli matematici utilizzati da ciascun applicativo per la definizione delle emissioni di gas serra (quantificate in kg CO₂ equivalente) relative alla produzione delle materie prime ed alla produzione delle miscele bituminose che andranno a costituire gli strati della pavimentazione flessibile definita all'interno del presente lavoro.

La produzione di aggregati si riferisce all'estrazione ed alla lavorazione degli stessi all'interno della cava di Mollieres, situata nel comune di Cesana Torinese (TO), considerata come sito di estrazione di riferimento. La definizione relativa alle emissioni dovute alla produzione di aggregati è stata eseguita secondo quanto riportato all'interno del lavoro di (*Blengini et al., 2010*): l'analisi di inventario include gli oneri ambientali relativi all'estrazione delle materie prime dalla cava alla frantumazione e vagliatura degli aggregati. In base a tali considerazioni, si ottiene un valore di emissione di CO₂ equivalente per la produzione di una tonnellata di aggregati pari a **2467,9 g/t**.

La produzione di bitume si riferisce al prodotto lavorato all'interno della raffineria Iplom di Busalla (GE), considerata come sito industriale di riferimento. I dati di inventario sono stati ricavati dal "*Life Cycle Inventory for Bitumen*" redatto da (*Eurobitume, 2020*), considerando come unità di processo l'estrazione del petrolio, il trasporto presso la raffineria, la raffinazione del greggio di petrolio e lo stoccaggio del bitume.

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 ^{d)}	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
NMVOG	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

Figura 5.1 – Inventario per la produzione di 1 tonnellata di bitume (Eurobitume, 2020)

La produzione di conglomerato bituminoso si riferisce alla lavorazione di aggregati e bitume all'interno di un impianto di produzione dedicato a tale operazione, per il quale si sono assunti due modelli differenti: nel caso dell'applicativo PaLATE, il gruppo di lavoro del DIATI del Politecnico di Torino si è appoggiato a dati forniti dalla Sitalfa S.P.A. riguardo il proprio modello di impianto, sito in Salbertrand (TO), mentre nel caso degli altri applicativi si è scelto di utilizzare il modello di impianto situato a Caprie (TO), di proprietà della Bernardi Impianti International SPA.

5.1.1 PaLATE

Le emissioni di gas serra ottenute attraverso l'applicazione dei seguenti modelli matematici si riferiscono ai singoli strati che costituiscono la pavimentazione flessibile.

STRATO DI USURA

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{AGGREGATI}} \text{ [t]} \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \\
 & \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] = \mathbf{1186 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = 480 \text{ t}$, ottenuta come:

$$massa_{AGGREGATI} = densità\ volumica_{AGGREGATI} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{AGGREGATI} [m^3]$$

dove:

- $densità\ volumica_{AGGREGATI} = 2,786\ t/m^3$;
- $volume_{AGGREGATI} = 173\ m^3$.
- $indicatore\ di\ emissione_{AGGREGATI} = 2468\ g\ CO_2eq/t$ aggregati, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di aggregati, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport*, come riportato di seguito:

LIFE CYCLE INVENTORY - MATERIALI										
INPUT PaLATE - BITUME BASE										
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
183.955	448.28	1.110,71	852.99	245.92	2.068,78	0,00	-	-	-	1.011,797

INPUT PaLATE - AGGREGATI										
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
2467,9	3,98	8,80	6,52	1,18	25,10	0,00	1,07E-04	9,29E-04	-	1261434

Figura 5.2 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport*

- $fattore\ di\ conversione = 1/1000$, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

$(emissioni)_{produzione\ bitume} [kg\ CO_2eq]$

$$= massa_{BITUME} [t] \cdot indicatore\ di\ emissione_{BITUME} \left[\frac{g\ CO_2eq}{t\ bitume} \right] \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kg}{g} \right] = 4946\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $massa_{BITUME} = 27\ t$, ottenuta come:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{BITUME} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BITUME} [m^3]$$

dove:

- $densità\ volumica_{BITUME} = 0,998\ t/m^3$;
- $volume_{BITUME} = 27\ m^3$.
- $indicatore\ di\ emissione_{BITUME} = 183955\ g\ CO_2eq/t$ bitume, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di bitume, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport*, come riportato di seguito:

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione materiali}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{(emissioni)}_{\text{produzione aggregati}} + \text{(emissioni)}_{\text{produzione bitume}} \\
 & + \text{(emissioni)}_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} = 1186 + 4946 + 8522 \\
 & = \mathbf{14653 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{AGGREGATI}} \text{ [t]} \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \\
 & \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] = \mathbf{1446 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = 586 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = \text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{AGGREGATI}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{AGGREGATI}} = 210 \text{ m}^3$.
- $\text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} = 2468 \text{ g CO}_2\text{eq/t aggregati}$, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di aggregati, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport* (si veda **Figura 5.3**);
- $\text{fattore di conversione} = 1/1000$, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{BITUME}} \text{ [t]} \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{BITUME}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{t bitume}} \right] \\
 & \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] = \mathbf{5080 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{BITUME}} = 28 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{BITUME}} = \text{densità volumica}_{\text{BITUME}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BITUME}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{BITUME}} = 0,998 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BITUME}} = 28 \text{ m}^3$.
- $\text{indicatore di emissione}_{\text{BITUME}} = 183955 \text{ g CO}_2\text{eq/t bitume}$, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di bitume, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport* (si veda **Figura 5.3**);
- $\text{fattore di conversione} = 1/1000$, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO}} \text{ [t]} \\
 & \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t conglomerato}} \right] \\
 & = \mathbf{10308 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO}} = 580 \text{ t}$, pari alla massa dell'intero strato di binder (collegamento), ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO}} = 2,578 \text{ t/m}^3$, secondo quanto riportato all'interno del mix design;
- $\text{volume}_{\text{BITUME}} = 225 \text{ m}^3$.
- $\text{indicatore di emissione}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} = 16,80 \text{ kg CO}_2\text{eq/t bitume}$, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso, inserita all'interno del foglio di calcolo *Equipment Details* (si veda **Figura 5.3**).

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione materiali}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{(emissioni)}_{\text{produzione aggregati}} + \text{(emissioni)}_{\text{produzione bitume}} \\
 & + \text{(emissioni)}_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} = 1446 + 5080 + 10308 \\
 & = \mathbf{16834 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

STRATO DI BASE

$$\begin{aligned}
 & \text{(emissioni)}_{\text{produzione aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{AGGREGATI}} \text{ [t]} \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \\
 & \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] = \mathbf{5275 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = 2138 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = \text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{AGGREGATI}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{AGGREGATI}} = 767 \text{ m}^3$.
- $\text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} = 2468 \text{ g CO}_2\text{eq/t aggregati}$, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di aggregati, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport* (si veda **Figura 5.3**);
- $\text{fattore di conversione} = 1/1000$, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

(emissioni)_{produzione bitume} [kg CO₂eq]

$$= massa_{BITUME} [t] \cdot indicatore\ di\ emissione_{BITUME} \left[\frac{g\ CO_2eq}{t\ bitume} \right] \\ \cdot\ fattore\ di\ conversione \left[\frac{kg}{g} \right] = 18529\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- *massa* _{BITUME} = 101 t, ottenuta come:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{BITUME} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BITUME} [m^3]$$

dove:

- *densità volumica* _{BITUME} = 0,998 t/m³;
- *volume* _{BITUME} = 101 m³.
- *indicatore di emissione* _{BITUME} = 183955 g CO₂eq/t bitume, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di bitume, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport* (si veda **Figura 5.3**);
- *fattore di conversione* = 1/1000, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

(emissioni)_{produzione conglomerato bituminoso} [kg CO₂eq]

$$= massa_{CONGLOMERATO} [t] \\ \cdot\ indicatore\ di\ emissione_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ conglomerato} \right] \\ = 37599\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- *massa* _{CONGLOMERATO} = 2127 t, pari alla massa dell'intero strato di base, ottenuta come segue:

$$massa_{CONGLOMERATO} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- *densità volumica* _{CONGLOMERATO} = 2,578 t/m³, secondo quanto riportato all'interno del mix design;
- *volume* _{BASE} = 825 m³.
- *indicatore di emissione* _{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO} = 16,80 kg CO₂eq/t bitume, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso, inserita all'interno del foglio di calcolo *Equipment Details* (si veda **Figura 5.3**).

(emissioni)_{produzione materiali} [kg CO₂eq]

$$= (emissioni)_{produzione\ aggregati} + (emissioni)_{produzione\ bitume} \\ + (emissioni)_{produzione\ conglomerato\ bituminoso} = 5275 + 18529 + 37599 \\ = 61404\ kg\ CO_2eq$$

STRATO DI FONDAZIONE

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione misto granulare}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 &= \text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} [\text{t}] \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \\
 &\cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] = 3320 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = 1567 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di fondazione ed ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = \text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{MISTO GRANULARE}} [\text{m}^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{AGGREGATI}} = 562 \text{ m}^3$.
- $\text{indicatore di emissione}_{\text{AGGREGATI}} = 2468 \text{ g CO}_2\text{eq/t aggregati}$, ricavato dalla tabella dei dati di inventario relativa alla produzione di aggregati, inserita all'interno del foglio di calcolo *EMF Transport* (si veda **Figura 5.3**);
- $\text{fattore di conversione} = 1/1000$, applicato per riportare coerentemente le emissioni di gas serra con l'unità di misura scelta.

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione materiali}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= (\text{emissioni})_{\text{produzione misto granulare}} \\
 &= 3320 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

5.1.1.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	1186	4946	8522	14653

Tabella 5.1 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	1446	5080	10308	16834

Tabella 5.2 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	5275	18529	37599	61404

Tabella 5.3 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO ₂ eq)	
	Fase di produzione	
	Produzione dei materiali	
	Misto granulare	Totale
PALATE	3320	3320

Tabella 5.4 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione

5.1.2 asPECT

Le emissioni di gas serra relative alla produzione dei materiali sono determinate attraverso l'utilizzo di modelli matematici differenti: per la produzione delle materie prime (aggregati, bitume) si utilizza un modello matematico riconducibile allo stesso utilizzato all'interno di PaLATE, mentre per la produzione di conglomerato bituminoso si utilizza un modello matematico che parte dalla definizione di un impianto di produzione di conglomerati bituminosi. A tal proposito, si è scelto di adottare il modello di impianto utilizzato dalla *Bernardi Impianti SPA International*, situato nella località di Caprie (TO).

STRATO DI USURA

I modelli matematici relativi alla produzione di aggregati e bitume sono riportati di seguito:

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 & = \text{indicatore di emissione}_{LCI,AGGREGATI} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \cdot \frac{\% \text{aggregati}_{MIX DESIGN}}{100} [-] \\
 & \cdot \text{massa}_{USURA} [t] = \mathbf{1245 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *indicatore di emissione* $LCI,AGGREGATI$ = 2,70 kg CO₂eq/t aggregati, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno del lavoro di (*Blengini et al., 2010*):

Name	Category	Data Source	Source	Input Date	Input Mode	Valid Date	kg CO ₂ e / t
Bitumen Emulsion (re...	Bitumen Emulsions	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	180,0
Cement (Portland Ce...	Cement	BCA, CSMA, UKQAA...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	860,0
Fibres	Fibres	Industry average, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,2
Fluxes (kerosene bas...	Fluxes	European Commissio...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	370,0
GGBS	Ground Granulated Bl...	mpa.csm and UK Q...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	79,6
Hydrated Lime	Hydrated Lime	Hammond & Jones, 2...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	780,0
PFA	Pulverised Fuel Ash (...)	BCA, CSMA, UKQAA,...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,1
Polymer Modified Bitu...	Bitumen - Polymer Mo...	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	340,0
Polymer Modified Bitu...	Bitumen Emulsions - ...	Eurobitume, 2020		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	300,0
Water	Other	BEIS, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	0,3
Wax (Fischer-Tropsch...	Waxes	Industry average, 2019		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	2.010,0
Wax (Crude derived ...)	Waxes	European Commissio...		01/07/2020	Protocol	01/01/2020	370,0
BITUME	Bitumen	Eurobitume, 2020	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	202,7
AGGREGATI	Crushed Rock	Blengini et al. (2010)	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	2,7
ACQUA	Other	Ecoinvent	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	0,2
EMULSIONE BITUM...	Bitumen Emulsions	Eurobitume, 2012	Tesi Alberto Del Frari	26/08/2021	Entered	26/08/2021	178,4

Figura 5.5 – Tabella materiali

- $\% \text{aggregati}_{MIX DESIGN}$ = 94,7%, come definito all'interno del mix design e riportato di seguito:

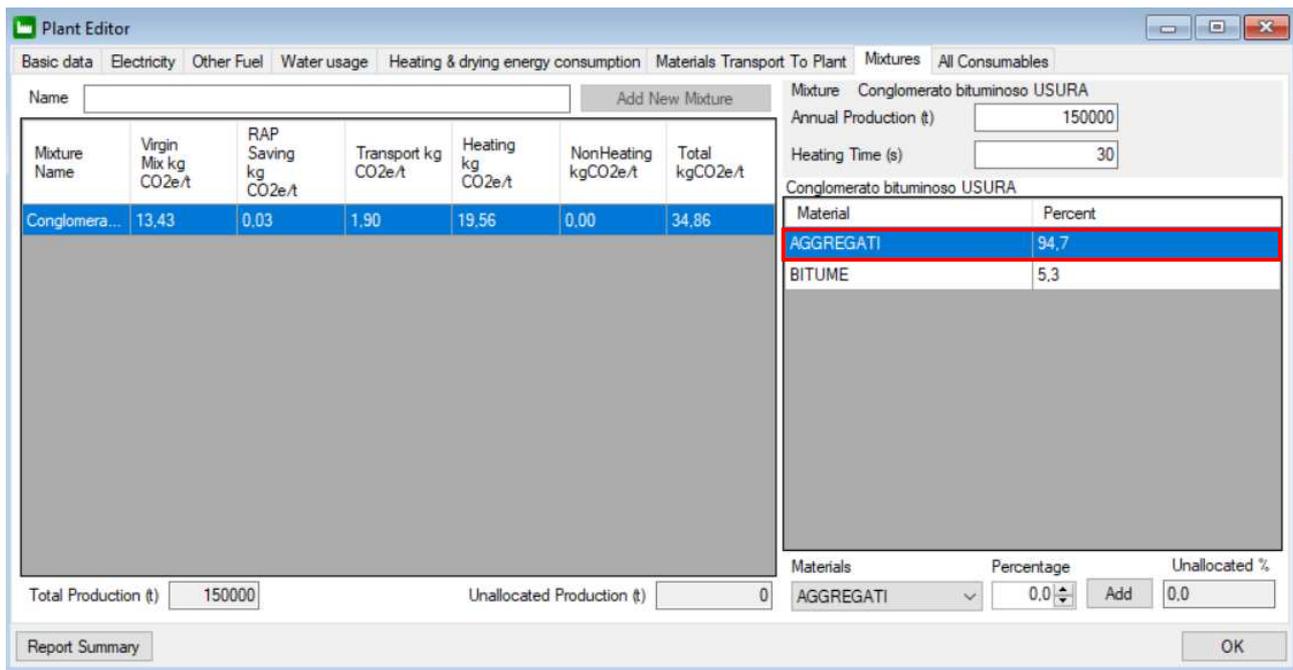


Figura 5.6 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design

- $massa_{USURA} = 477$ t, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$massa_{USURA} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,544$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{USURA} = 187,5$ m³.

(emissioni)_{produzione bitume} [kg CO₂eq]

$$= indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ bitume} \right] \cdot \frac{\%bitume_{MIX\ DESIGN}}{100} [-]$$

$$\cdot massa_{USURA} [t] = 5147\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} = 202,70$ kg CO₂eq/t bitume, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno di (*Eurobitume, 2020*);
- $\%bitume_{MIX\ DESIGN} = 5,3\%$, come definito all'interno del mix design e riportato di seguito:

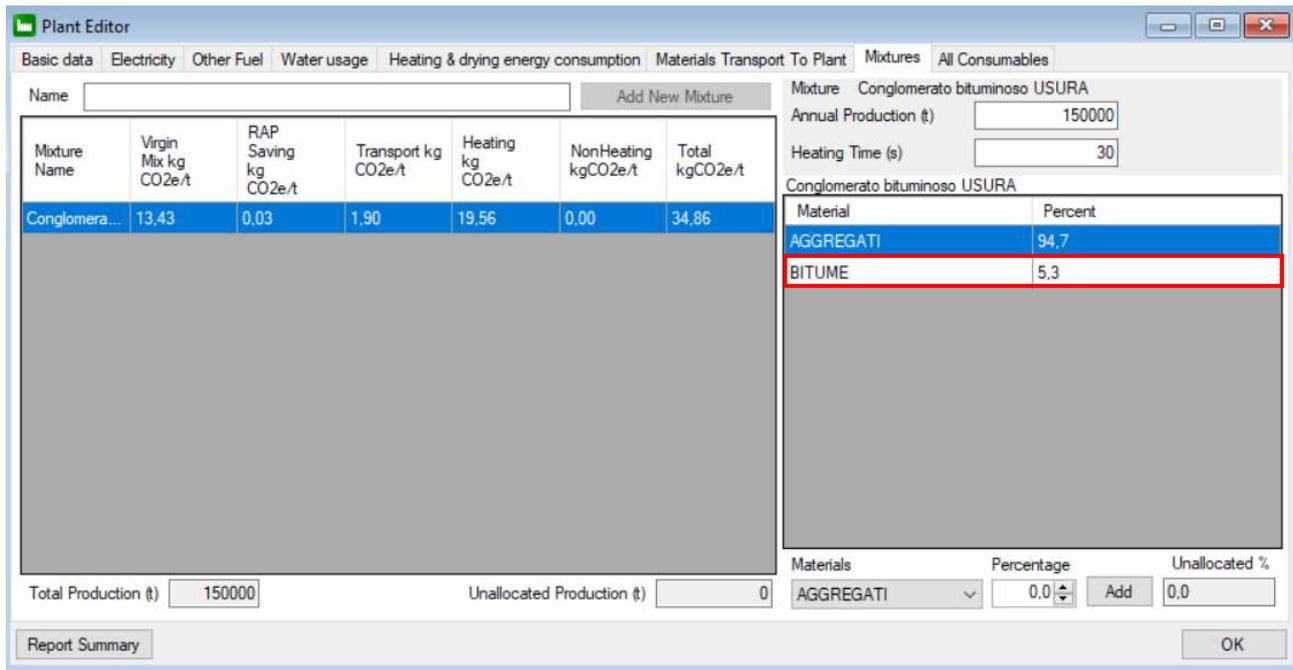


Figura 5.7 – Definizione percentuale bitume all'interno del mix design

- $massa_{USURA} = 477$ t, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$massa_{USURA} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,544$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{USURA} = 187,5$ m³.

Il modello matematico relativo alla produzione di conglomerato bituminoso all'interno dell'impianto di produzione considerato è il seguente:

$$\begin{aligned} & consumo\ energia\ annuo_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} [kWh] \\ & = PCI_{combustibile\ fossile} \left[\frac{kcal}{kg} \right] \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kg}{t} \right] \cdot consumo\ annuo [t] \\ & \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kWh}{kcal} \right] = 9210000 kWh \end{aligned}$$

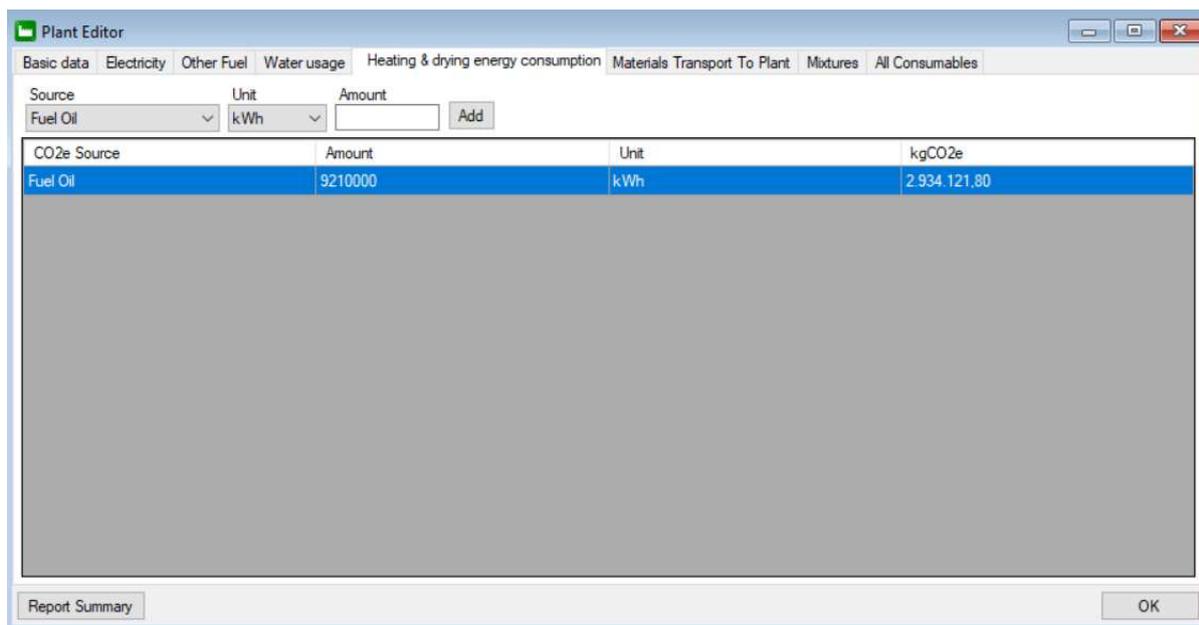


Figura 5.8 – Interfaccia asPECT consumo di energia annuo

in cui:

- $PCI_{\text{combustibile fossile}} = 9600 \text{ kcal/kg}$, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);
- $\text{fattore di conversione} = 1000 \text{ kg/t}$, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta;
- $\text{consumo annuo} = 825 \text{ t}$, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);
- $\text{fattore di conversione} = 0,0012 \text{ kWh/kcal}$, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta e ricavato dal *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 (\text{emissione annua})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} & [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 &= \text{consumo energia annuo}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} [\text{kWh}] \\
 &\cdot \text{fattore di emissione}_{\text{COMBUSTIBILE FOSSILE}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \right] = 2934122 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

Type	CO2e Source	Amount	Unit	kgCO2e
Fuel	Fuel Oil	9210000	kWh	2.934.121,80

Figura 5.9 – Interfaccia asPECT emissione annua

in cui:

- *consumo energia annuo* $_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} = 9210000$ kWh, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *fattore di conversione* $_{COMBUSTIBILE\ FOSSILE} = 0,319$ kg CO₂eq/kWh, applicato per convertire il valore energetico di consumo di energia in emissione di gas serra, coerentemente con quanto riportato all'interno del *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 & (emissione\ media)_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t} \right] \\
 &= \frac{(emissione\ annua)_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} [kg\ CO_2eq]}{produzione\ annua_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} [t]} \\
 &= 19,56 \frac{kg\ CO_2eq}{t}
 \end{aligned}$$

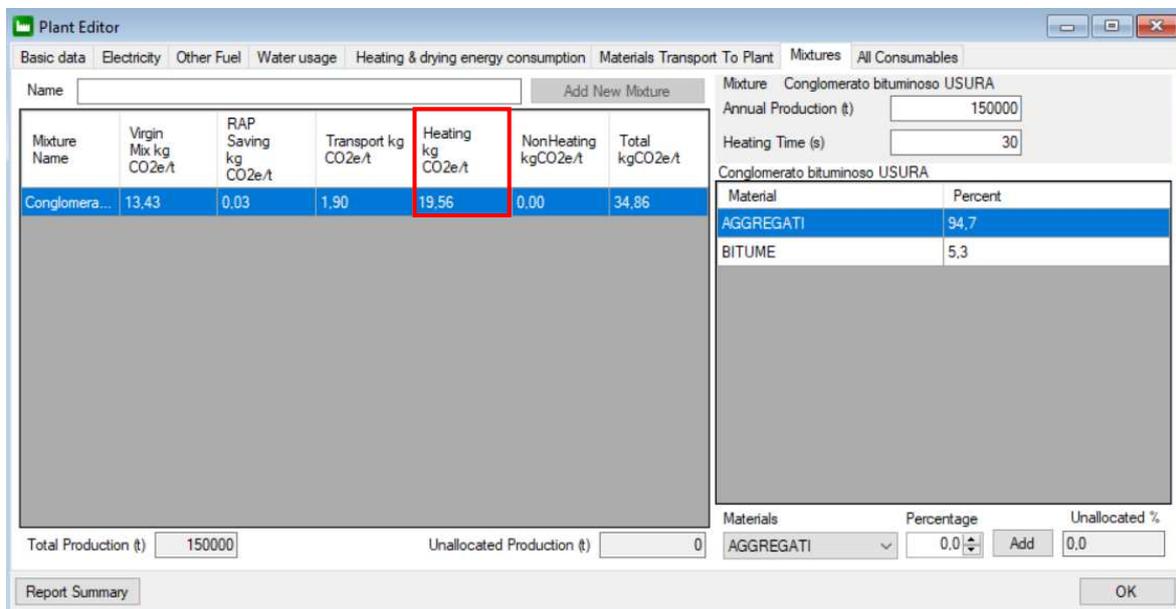


Figura 5.10 – Interfaccia asPECT emissione media

in cui:

- *emissione annua* $_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} = 2934122$ kg CO₂eq, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *produzione annua* $_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} = 150000$ kg CO₂eq/kWh, secondo quanto ricavato dai dati di produzione disponibili all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO).

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{produzione\ conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq] \\
 &= (emissione\ media)_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t} \right] \\
 &\cdot massa_{CONGLOMERATO} [t] = 9331\ kg\ CO_2eq
 \end{aligned}$$

in cui:

- *emissione media* IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO = 19,56 kg CO₂eq/t, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *massa* CONGLOMERATO = 477 t, pari alla massa dell'intero strato di usura valutata come descritto in precedenza.

(emissioni)_{produzione materiali} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} + (\text{emissioni})_{\text{produzione bitume}} \\
 &+ (\text{emissioni})_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} = 1245 + 5147 + 9331 \\
 &= \mathbf{15723 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

Step	Description	kg CO ₂ e / t	Total kg CO ₂ e
Steps 1-3	Material extraction and processing	13,40	6.391,67
Step 4	Transport to plant	1,90	906,71
Step 5	Asphalt production	19,56	9.330,51
Step 6	Transport to site	3,48	1.660,01
Step 7	Laying and compacting	0,30	143,10
Step 8	Project works	0,00	0,00
Step 9	Maintenance	18,85	8.990,93
Step 10	End of life	3,71	1.771,60

	Steps 1 to 7	Asphalt	Project
Total kg CO ₂ e	18.432,00	29.194,54	29.194,54
tonnes		954,09	954,09
kg CO ₂ e /tonne	38,64	30,60	

Figura 5.11 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali²⁴

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

I modelli matematici relativi alla produzione di aggregati e bitume sono riportati di seguito:

(emissioni)_{produzione aggregati} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \text{indicatore di emissione}_{LCI,AGGREGATI} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t aggregati}} \right] \cdot \frac{\% \text{aggregati}_{MIX DESIGN}}{100} [-] \\
 &\cdot \text{massa}_{BINDER} [t] = \mathbf{1526 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *indicatore di emissione* LCI,AGGREGATI = 2,70 kg CO₂eq/t aggregati, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno del lavoro di (Blengini et al., 2010);
- *%aggregati* MIX DESIGN = 95,5%, come definito all'interno del mix design e riportato di seguito:

²⁴ Il valore evidenziato corrispondente agli Steps 1-3 Material extraction and processing indica la somma delle emissioni relativa alla produzione di aggregati e bitume, per la quale asPECT ricava un unico indicatore di emissioni pari alla somma pesata dei singoli indicatori, mentre il valore evidenziato corrispondente allo Step 5 Asphalt production indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso.

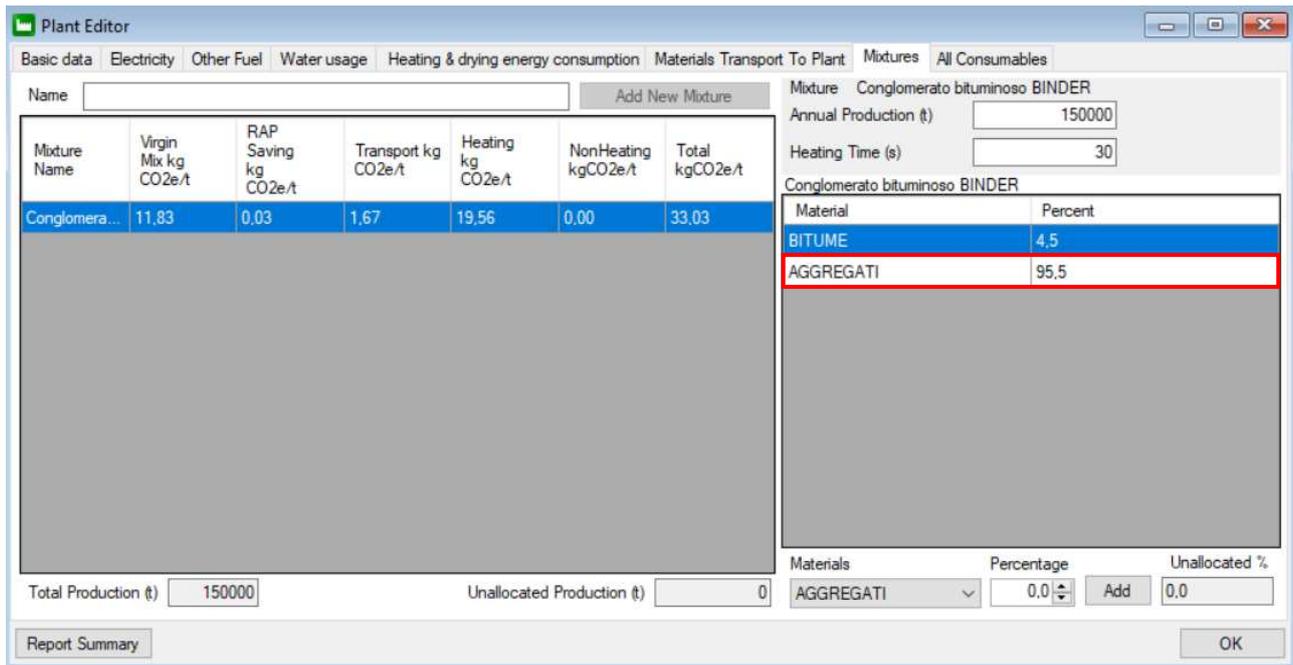


Figura 5.12 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design

- $massa_{BINDER} = 580$ t, pari alla massa dello strato di binder (collegamento) ed ottenuta come segue:

$$massa_{BINDER} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,578$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BINDER} = 225$ m³.

(emissioni)_{produzione bitume} [kg CO₂eq]

$$= indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ bitume} \right] \cdot \frac{\%bitume_{MIX\ DESIGN}}{100} [-]$$

$$\cdot massa_{BINDER} [t] = 5320\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} = 202,70$ kg CO₂eq/t bitume, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno di (*Eurobitume, 2020*);
- $\%bitume_{MIX\ DESIGN} = 4,5\%$, come definito all'interno del mix design e riportato di seguito:

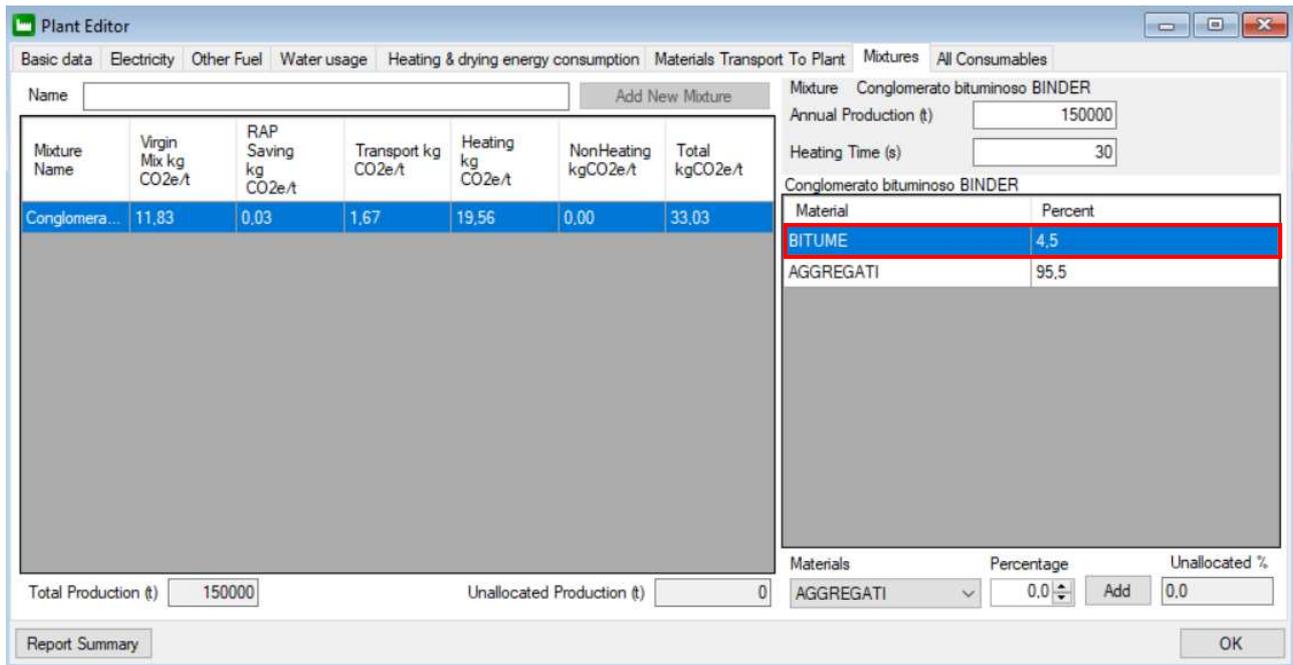


Figura 5.13 – Definizione percentuale bitume all'interno del mix design

- $massa_{BINDER} = 580$ t, pari alla massa dello strato di binder (collegamento) ed ottenuta come segue:

$$massa_{BINDER} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,578$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BINDER} = 225$ m³.

Il modello matematico relativo alla produzione di conglomerato bituminoso all'interno dell'impianto di produzione considerato è il seguente:

$$\begin{aligned} consumo\ energia\ annuo_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} [kWh] \\ = PCI_{combustibile\ fossile} \left[\frac{kcal}{kg} \right] \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kg}{t} \right] \cdot consumo\ annuo [t] \\ \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kWh}{kcal} \right] = 9210000\ kWh \end{aligned}$$

in cui:

- $PCI_{combustibile\ fossile} = 9600$ kcal/kg, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);
- $fattore\ di\ conversione = 1000$ kg/t, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta;
- $consumo\ annuo = 825$ t, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);

- *fattore di conversione* = 0,0012 kWh/kcal, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta e ricavato dal *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione annua})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{consumo energia annuo}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kWh]} \\
 & \cdot \text{fattore di emissione}_{\text{COMBUSTIBILE FOSSILE}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \right] = 2934122 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *consumo energia annuo* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 9210000 kWh, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *fattore di conversione* $_{\text{COMBUSTIBILE FOSSILE}}$ = 0,319 kg CO₂eq/kWh, applicato per convertire il valore energetico di consumo di energia in emissione di gas serra, coerentemente con quanto riportato all'interno del *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right] \\
 & = \frac{(\text{emissione annua})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{\text{produzione annua}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [t]}} \\
 & = 19,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *emissione annua* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 2934122 kg CO₂eq, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *produzione annua* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 150000 kg CO₂eq/kWh, secondo quanto ricavato dai dati di produzione disponibili all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{PRODUZIONE CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = (\text{emissione media})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right] \\
 & \cdot \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO}} \text{ [t]} = 11345 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *emissione media* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 19,56 kg CO₂eq/t, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *massa* $_{\text{CONGLOMERATO}}$ = 580 t, pari alla massa dell'intero strato di collegamento e valutata come in precedenza.

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{produzione\ materiali} [kg\ CO_2eq] \\
 & = (emissioni)_{produzione\ aggregati} + (emissioni)_{produzione\ bitume} \\
 & + (emissioni)_{produzione\ conglomerato\ bituminoso} = 1526 + 5320 + 11345 \\
 & = \mathbf{18191\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

Life Cycle Stage	kg CO2e / t	Total kg CO2e
Steps 1-3 Material extraction and processing	11,80	6.846,06
Step 4 Transport to plant	1,67	966,57
Step 5 Asphalt production	19,56	11.345,27
Step 6 Transport to site	3,48	2.018,47
Step 7 Laying and compacting	0,30	174,00
Step 8 Project works	0,00	0,00
Step 9 Maintenance	0,00	0,00
Step 10 End of life	3,21	1.860,05

	Steps 1 to 7	Asphalt	Project
Total kg CO2e	21.350,37	23.210,42	23.210,42
tonnes		580,00	580,00
kg CO2e /tonne	36,81	40,02	

Figura 5.14 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali²⁵

STRATO DI BASE

I modelli matematici relativi alla produzione di aggregati e bitume sono riportati di seguito:

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{produzione\ aggregati} [kg\ CO_2eq] \\
 & = indicatore\ di\ emissione_{LCI,AGGREGATI} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ aggregati} \right] \cdot \frac{\%aggregati_{MIX\ DESIGN}}{100} [-] \\
 & \cdot massa_{BASE} [t] = \mathbf{5595\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *indicatore di emissione* $_{LCI,AGGREGATI}$ = 2,70 kg CO₂eq/t aggregati, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno del lavoro di (Blengini et al., 2010);
- *%aggregati* $_{MIX\ DESIGN}$ = 95,5%, come definito all'interno mix design e riportato di seguito:

²⁵ Il valore evidenziato corrispondente agli *Steps 1-3 Material extraction and processing* indica la somma delle emissioni relativa alla produzione di aggregati e bitume, per la quale asPECT ricava un unico indicatore di emissioni pari alla somma pesata dei singoli indicatori, mentre il valore evidenziato corrispondente allo *Step 5 Asphalt production* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso.

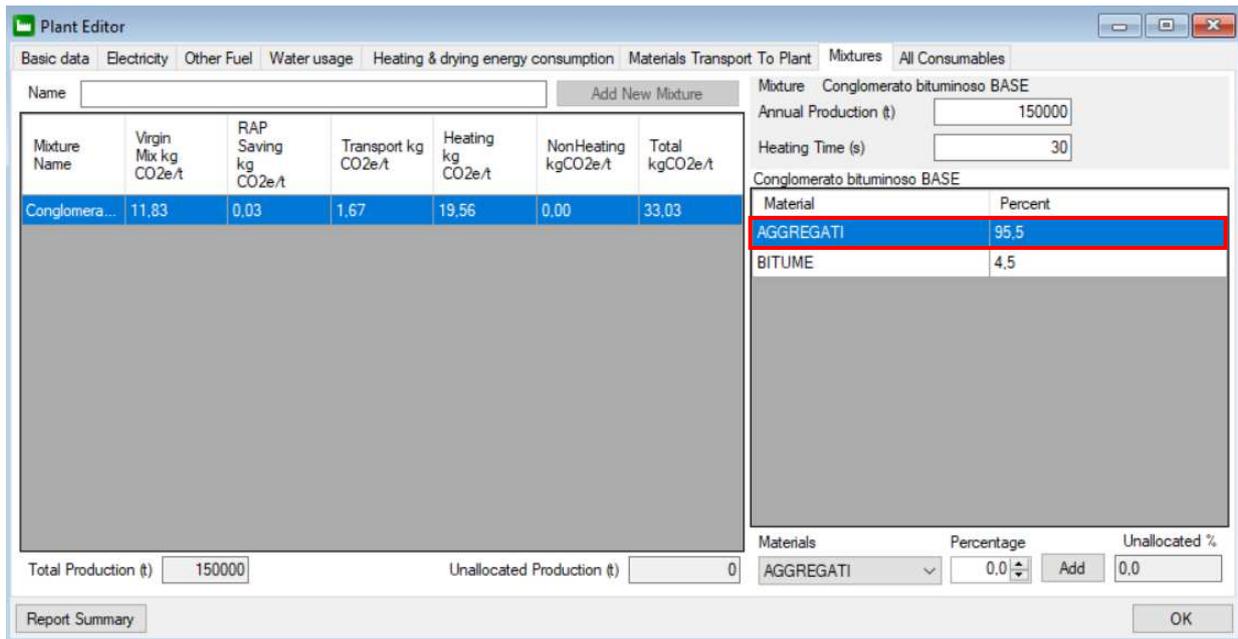


Figura 5.15 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design

- $massa_{BASE} = 2127$ t, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$massa_{BASE} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,578$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BASE} = 825$ m³.

(emissioni)_{produzione bitume} [kg CO₂eq]

$$= indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ bitume} \right] \cdot \frac{\%bitume_{MIX\ DESIGN}}{100} [-] \cdot massa_{BASE} [t] = \mathbf{19511\ kg\ CO_2eq}$$

in cui:

- $indicatore\ di\ emissione_{LCI,BITUME} = 202,70$ kg CO₂eq/t bitume, definito all'interno della tabella dei materiali secondo quanto riportato all'interno di (*Eurobitume, 2020*);
- $\%bitume_{MIX\ DESIGN} = 4,5\%$, come definito all'interno del mix design e riportato di seguito:

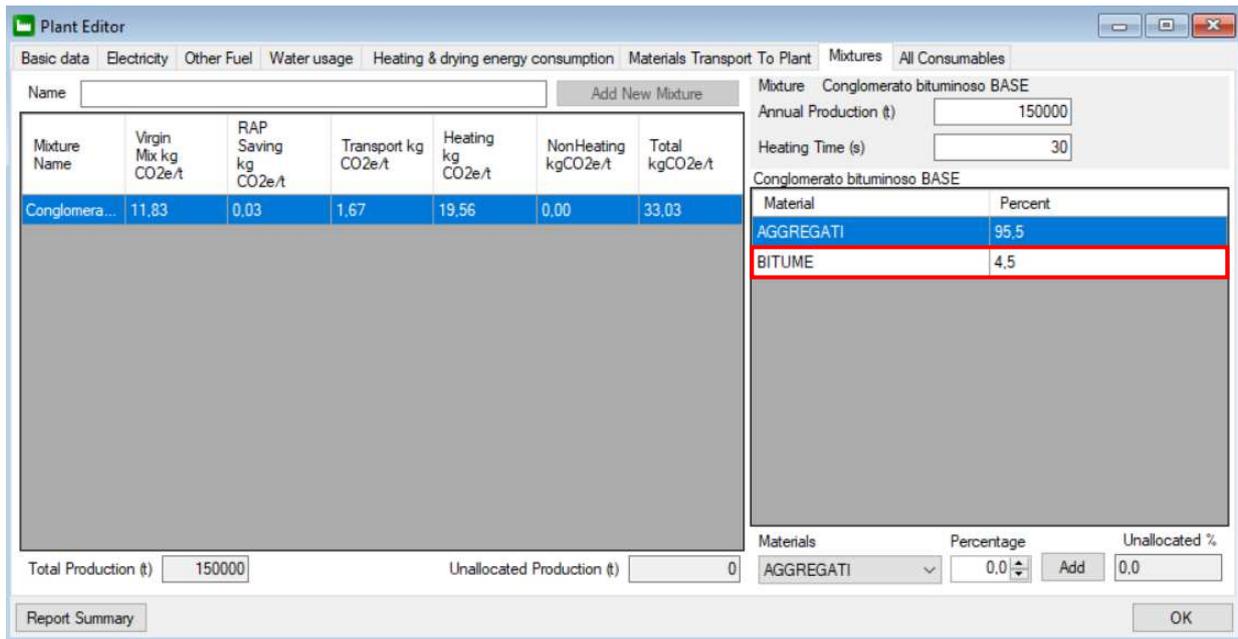


Figura 5.16 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design

- $massa_{BASE} = 2127$ t, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$massa_{BASE} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,578$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BASE} = 825$ m³.

Il modello matematico relativo alla produzione di conglomerato bituminoso all'interno dell'impianto di produzione considerato è il seguente:

$$\begin{aligned} & consumo\ energia\ annuo_{IMPIANTO\ PRODUZIONE\ CONGLOMERATO} [kWh] \\ & = PCI_{combustibile\ fossile} \left[\frac{kcal}{kg} \right] \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kg}{t} \right] \cdot consumo\ annuo [t] \\ & \cdot fattore\ di\ conversione \left[\frac{kWh}{kcal} \right] = 9210000\ kWh \end{aligned}$$

in cui:

- $PCI_{combustibile\ fossile} = 9600$ kcal/kg, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);
- $fattore\ di\ conversione = 1000$ kg/t, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta;
- $consumo\ annuo = 825$ t, secondo quanto riportato all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO);

- *fattore di conversione* = 0,0012 kWh/kcal, applicato per riportare coerentemente il consumo di energia annuo dell'impianto di produzione con l'unità di misura scelta e ricavato dal *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione annua})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{consumo energia annuo}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kWh]} \\
 & \cdot \text{fattore di emissione}_{\text{COMBUSTIBILE FOSSILE}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \right] = 2934122 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *consumo energia annuo* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 9210000 kWh, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *fattore di conversione* $_{\text{COMBUSTIBILE FOSSILE}}$ = 0,319 kg CO₂eq/kWh, applicato per convertire il valore energetico di consumo di energia in emissione di gas serra, coerentemente con quanto riportato all'interno del *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors* (versione 2019).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right] \\
 & = \frac{(\text{emissione annua})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{\text{produzione annua}_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \text{ [t]}} \\
 & = 19,56 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *emissione annua* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 2934122 kg CO₂eq, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *produzione annua* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 150000 kg CO₂eq/kWh, secondo quanto ricavato dai dati di produzione disponibili all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto di produzione di Caprie (TO).

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = (\text{emissione media})_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right] \\
 & \cdot \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO}} \text{ [t]} = 41606 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *emissione media* $_{\text{IMPIANTO PRODUZIONE CONGLOMERATO}}$ = 19,56 kg CO₂eq/t, secondo quanto calcolato al passo precedente;
- *massa* $_{\text{CONGLOMERATO}}$ = 2127 t, pari alla massa dell'intero strato di base e valutata come in precedenza.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione materiali}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} + (\text{emissioni})_{\text{produzione bitume}} \\
 & + (\text{emissioni})_{\text{produzione conglomerato bituminoso}} = 5595 + 19511 + 41606 \\
 & = 66712 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

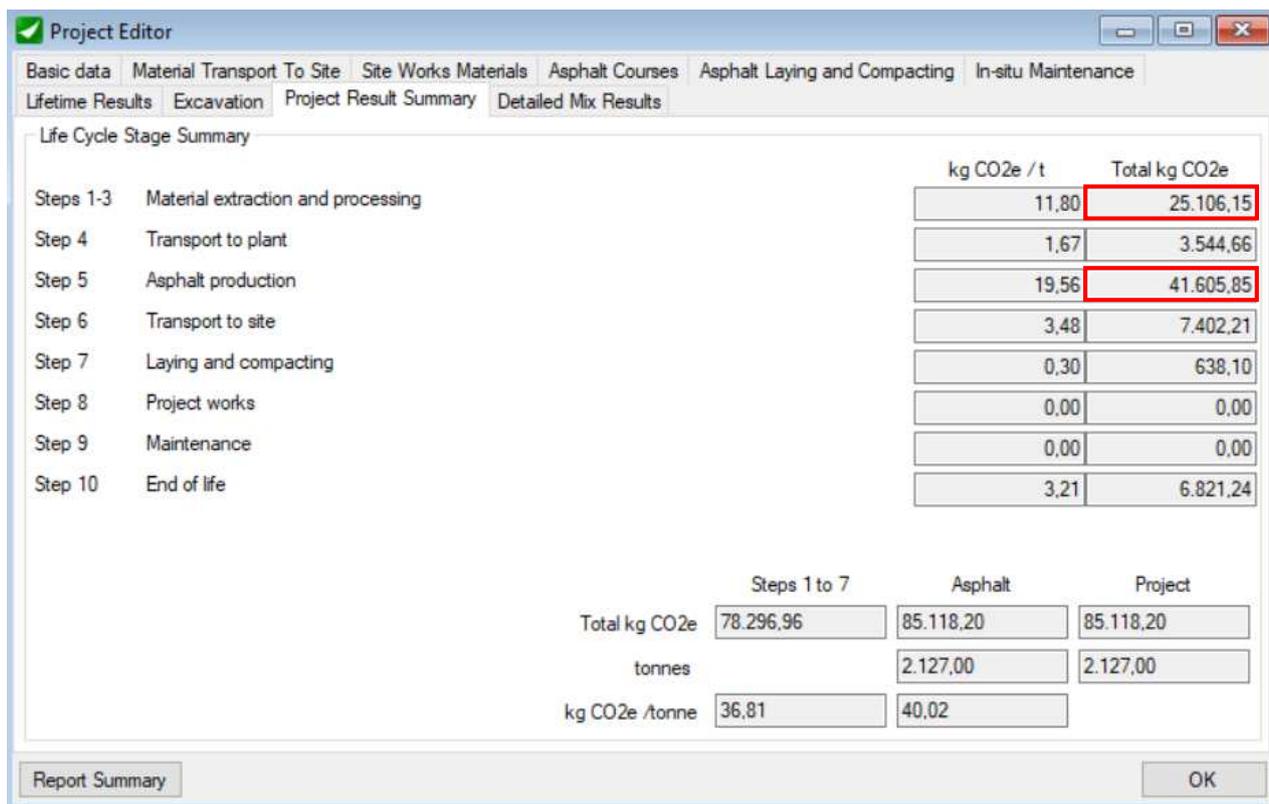


Figura 5.17 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali²⁶

Per lo strato di fondazione non è possibile valutare la quantità di emissioni di gas serra in quanto tale applicativo consente solo l'analisi di miscele legate a bitume.

5.1.2.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	1245	5147	9331	15723

Tabella 5.5 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	1526	5320	11375	18191

Tabella 5.6 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder)

²⁶ Il valore evidenziato corrispondente agli Steps 1-3 Material extraction and processing indica la somma delle emissioni relativa alla produzione di aggregati e bitume, per la quale asPECT ricava un unico indicatore di emissioni pari alla somma pesata dei singoli indicatori, mentre il valore evidenziato corrispondente allo Step 5 Asphalt production indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso.

BASE	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	5595	19511	41606	66712

Tabella 5.7 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base

5.1.3 ECORCE M

Il contributo di emissioni di gas serra relativo alla produzione dei materiali utilizzati per la costituzione degli strati della pavimentazione oggetto di questa analisi si ricava a partire da un indicatore unitario fornito direttamente dall'applicativo (espresso in kg CO₂eq/t), che moltiplicato per la relativa quantità di materiale (espressa in tonnellate) fornisce le emissioni in termini di CO₂-equivalente per la produzione dei materiali relativi allo strato di pavimentazione considerato. Di seguito si riporta l'espressione che definisce gli indicatori unitari (GWP) utilizzati dall'applicativo in questione, come riportato in (Goedkoop, 1996 – *The Eco-indicator 95, Final Report*), i quali differiscono a seconda del materiale considerato:

$$GWP_{materiale\ j-esimo} \left[\frac{kgCO_2e}{t} \right] = \sum_{i=1}^n GWP_i = \sum_{i=1}^n \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt}$$

in cui:

- a_i = assorbimento della radiazione termica dovuta all'incremento della concentrazione del gas i -esimo;
- $c_i(t)$ = concentrazione del gas i -esimo rimanente al tempo t dopo il proprio rilascio;
- T = numero di anni sul quale viene sviluppato l'integrale, assunto pari a 100 anni, il quale corrisponde al ciclo di vita di una molecola di CO₂ in atmosfera.

Nella tabella seguente si riassumono i valori degli indicatori unitari relativi alla produzione di aggregati, bitume e conglomerato bituminoso:

ECORCE M	
Produzione materiali	
<i>indicatore unitario di emissione GWP_{aggregati} [kg CO₂eq/ton aggregati]</i>	2,19
<i>indicatore unitario di emissione GWP_{bitume} [kg CO₂eq/ton bitume]</i>	191,38
<i>indicatore unitario di emissione GWP_{impianto produzione conglomerato} [kg CO₂eq/ton conglomerato]</i>	23,97

Tabella 5.8 – Indicatori unitari di emissione

Il modello matematico utilizzato dall'applicativo per la determinazione delle emissioni di gas serra relative alla produzione dei materiali è il medesimo per ciascun materiale considerato e per ciascuno strato di pavimentazione. Di seguito si riportano i passaggi matematici necessari alla determinazione di suddetti valori di emissione:

STRATO DI USURA

$$(emissioni)_{produzione\ aggregati} [kg\ CO_2eq] = GWP_{aggregati} [kg\ CO_2eq/t] \cdot massa_{AGGREGATI} [t]$$

$$= 990\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $GWP_{aggregati}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di aggregati, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $massa_{AGGREGATI}$ = 452 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{AGGREGATI} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3] \cdot \frac{\%aggregati_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX}$ = 2,544 t/m³, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{USURA}$ = 188 m³;
- $\%aggregati_{MIX}$ = 94,7 %.

Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Wearing course	Usura	5.0	3750.0	false	Asphalt material

Components	Content	Road transport	Rail transport
Aggregates (%)	94.7	14.5	0.0
Asphalt (%)	5.3	229.0	0.0

Figura 5.18 – Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo

$$(emissioni)_{produzione\ bitume} [kg\ CO_2eq] = GWP_{bitume} [kg\ CO_2eq/t] \cdot massa_{BITUME} [t]$$

$$= 4838\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- GWP_{bitume} = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di bitume, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $massa_{BITUME}$ = 25 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3] \cdot \frac{\%bitume_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,544\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{USURA} = 188\ m^3$;
- $\%bitume_{MIX} = 5,3\ \%$.

Components	Content	Road transport	Rail transport
Aggregates (%)	94.7	14.5	0.0
Asphalt (%)	5.3	229.0	0.0

Figura 5.19 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo

$(emissioni)_{produzione\ conglomerato}\ [kg\ CO_2eq]$

$$= GWP_{impianto\ produzione\ conglomerato}\ [kg\ CO_2eq/t] \cdot massa_{CONGLOMERATO}\ [t]$$

$$= 11432\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $GWP_{impianto\ produzione\ bitume}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di conglomerato bituminoso, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $massa_{CONGLOMERATO} = 477\ t$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$massa_{CONGLOMERATO} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO}\ \left[\frac{t}{m^3}\right] \cdot volume_{USURA}\ [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,544\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{USURA} = 188\ m^3$.

$(emissioni)_{produzione}\ [kg\ CO_2eq]$

$$= (emissioni)_{produzione\ aggregati} + (emissioni)_{produzione\ bitume}$$

$$+ (emissioni)_{produzione\ conglomerato} = 990 + 4838 + 11432 = 17260\ kg\ CO_2eq$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results	
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity	
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference	
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect	
Greenhouse effect							
Unit indicator GWP per process							
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)			
4.408E2				4.6641E2			
◀ ▶				▶			
		Total		Layer		Operations	
				Wearing course		Costruzione	
Asphalt (kg eq.CO2/t)		4.84E3		4.84E3		4.84E3	
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)		1.14E4		1.14E4		1.14E4	
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)		1.51E2		1.51E2		1.51E2	
Aggregates (kg eq.CO2/t)		9.9E2		9.9E2		9.9E2	
Road transport (kg eq.CO2/km)		3.23E3		3.23E3		3.23E3	
Total (kg eq.CO2/t)		2.06E4		2.06E4		2.06E4	

Figura 5.20 – Emissioni produzione materiali strato di usura²⁷

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= GWP_{\text{aggregati}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \cdot \text{massa}_{\text{AGGREGATI}} [t] \\
 &= 1214 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $GWP_{\text{aggregati}}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di aggregati, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}}$ = 554 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = \text{densità volumica}_{\text{MIX}} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} [m^3] \cdot \frac{\% \text{aggregati}_{\text{MIX}}}{100}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{MIX}} = 2,578 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BINDER}} = 225 \text{ m}^3$;
- $\% \text{aggregati}_{\text{MIX}} = 95,5 \%$.

²⁷ Il valore evidenziato corrispondente al termine *Asphalt* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di bitume; il valore evidenziato corrispondente al termine *Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso; il valore evidenziato corrispondente al termine *Aggregates* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di aggregati.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input: "Binder"	
Operation name or year:	Costruzione				
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Binder course	Binder	6.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation					
Laying					
Distance from plant to construction site (km): 51.2 *					
In-place density (kg/m3): 2578.0 *					
Type of mixing: Hot-mix asphalt plant using fuel oil					
Composition and origin					
	Components	Content	Road transport	Rail transport	
✘ Suppress the line	Aggregates (%)	95.5	14.5	0.0	
✘ Suppress the line	Asphalt (%)	4.5	229.0	0.0	
Add a component					

Figura 5.21 – Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione bitume}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= GWP_{\text{bitume}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \cdot \text{massa}_{\text{BITUME}} [t] \\
 &= 4995 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- GWP_{bitume} = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di bitume, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $\text{massa}_{\text{BITUME}}$ = 26 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$\text{massa}_{\text{BITUME}} = \text{densità volumica}_{\text{MIX}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} [\text{m}^3] \cdot \frac{\% \text{bitume}_{\text{MIX}}}{100}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{MIX}} = 2,578 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BINDER}} = 225 \text{ m}^3$;
- $\% \text{bitume}_{\text{MIX}} = 4,5 \%$.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input: "Binder"	
Operation name or year:	Costruzione				
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m ²)	Deconstruction	Type of material
Binder course	Binder	6.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation					
Laying					
Distance from plant to construction site (km): 51.2 *					
In-place density (kg/m ³): 2578.0 *					
Type of mixing: Hot-mix asphalt plant using fuel oil					
Composition and origin					
	Components	Content	Road transport	Rail transport	
✘ Suppress the line	Aggregates (%)	95.5	14.5	0.0	
✘ Suppress the line	Asphalt (%)	4.5	229.0	0.0	
Add a component					

Figura 5.22 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo

$$\begin{aligned}
 (emissioni)_{\text{produzione conglomerato}} [kg CO_2eq] &= GWP_{\text{impianto produzione conglomerato}} [kg CO_2eq/t] \cdot massa_{\text{CONGLOMERATO}} [t] \\
 &= 13901 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

in cui:

- $GWP_{\text{impianto produzione bitume}}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di conglomerato bituminoso, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $massa_{\text{CONGLOMERATO}} = 580 t$, pari alla massa dello strato di binder ed ottenuta come segue:

$$massa_{\text{CONGLOMERATO}} = densità\ volumica_{\text{CONGLOMERATO}} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{\text{BINDER}} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{\text{CONGLOMERATO}} = 2,578 t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{\text{BINDER}} = 225 m^3$.

$$\begin{aligned}
 (emissioni)_{\text{produzione}} [kg CO_2eq] &= (emissioni)_{\text{produzione aggregati}} + (emissioni)_{\text{produzione bitume}} \\
 &+ (emissioni)_{\text{produzione conglomerato}} = 1214 + 4995 + 13901 = 20110 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																	
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																																	
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																																	
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																																	
Greenhouse effect																																							
Unit indicator GWP per process																																							
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)		Red																																	
4.408E2				4.6641E2		2.5																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Binder course</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td style="border: 2px solid red;">5E3</td> <td>5E3</td> <td>5E3</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td style="border: 2px solid red;">1.39E4</td> <td>1.39E4</td> <td>1.39E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td style="border: 2px solid red;">1.21E3</td> <td>1.21E3</td> <td>1.21E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Binder course	Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3	Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4
	Total	Layer	Operation																																				
		Binder course	Costruzione																																				
Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3																																				
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4																																				
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2																																				
Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3																																				
Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3																																				
Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4																																				

Figura 5.23 – Emissioni produzione materiali strato di collegamento²⁸

STRATO DI BASE

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= GWP_{\text{aggregati}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \cdot \text{massa}_{\text{AGGREGATI}} [\text{t}] \\
 &= 4452 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $GWP_{\text{aggregati}}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di aggregati, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}}$ = 2031 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = \text{densità volumica}_{\text{MIX}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BASE}} [\text{m}^3] \cdot \frac{\% \text{aggregati}_{\text{MIX}}}{100}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{MIX}} = 2,578 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BASE}} = 825 \text{ m}^3$;
- $\% \text{aggregati}_{\text{MIX}} = 95,5 \%$.

²⁸ Il valore evidenziato corrispondente al termine *Asphalt* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di bitume; il valore evidenziato corrispondente al termine *Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso; il valore evidenziato corrispondente al termine *Aggregates* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di aggregati.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input: "Base"	
Operation name or year:		Costruzione			
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Base course	Base	22.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation		Laying			
Distance from plant to construction site (km): 51.2 *					
In-place density (kg/m3): 2578.0 *					
Type of mixing: Hot-mix asphalt plant using fuel oil					
Composition and origin					
	Components	Content	Road transport	Rail transport	
✘ Suppress the line	Aggregates (%)	95.5	14.5	0.0	
✘ Suppress the line	Asphalt (%)	4.5	229.0	0.0	
Add a component					
Confirm layer					

Figura 5.24– Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione bitume}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= GWP_{\text{bitume}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \cdot \text{massa}_{\text{BITUME}} [t] \\
 &= 18316 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- GWP_{bitume} = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di bitume, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $\text{massa}_{\text{BITUME}}$ = 96 t, valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$\text{massa}_{\text{BITUME}} = \text{densità volumica}_{\text{MIX}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BASE}} [\text{m}^3] \cdot \frac{\% \text{bitume}_{\text{MIX}}}{100}$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{MIX}} = 2,578 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BASE}} = 825 \text{ m}^3$;
- $\% \text{bitume}_{\text{MIX}} = 4,5 \%$.

Figura 5.25 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo

$(emissioni)_{produzione\ conglomerato} [kg\ CO_2eq]$

$$= GWP_{impianto\ produzione\ conglomerato} [kg\ CO_2eq/t] \cdot massa_{CONGLOMERATO} [t]$$

$$= 50971\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $GWP_{impianto\ produzione\ bitume}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di conglomerato bituminoso, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $massa_{CONGLOMERATO} = 2127\ t$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$massa_{CONGLOMERATO} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO} = 2,578\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BITUME} = 825\ m^3$.

$(emissioni)_{produzione} [kg\ CO_2eq]$

$$= (emissioni)_{produzione\ aggregati} + (emissioni)_{produzione\ bitume}$$

$$+ (emissioni)_{produzione\ conglomerato} = 4452 + 18316 + 50971 = 73739\ kg\ CO_2eq$$

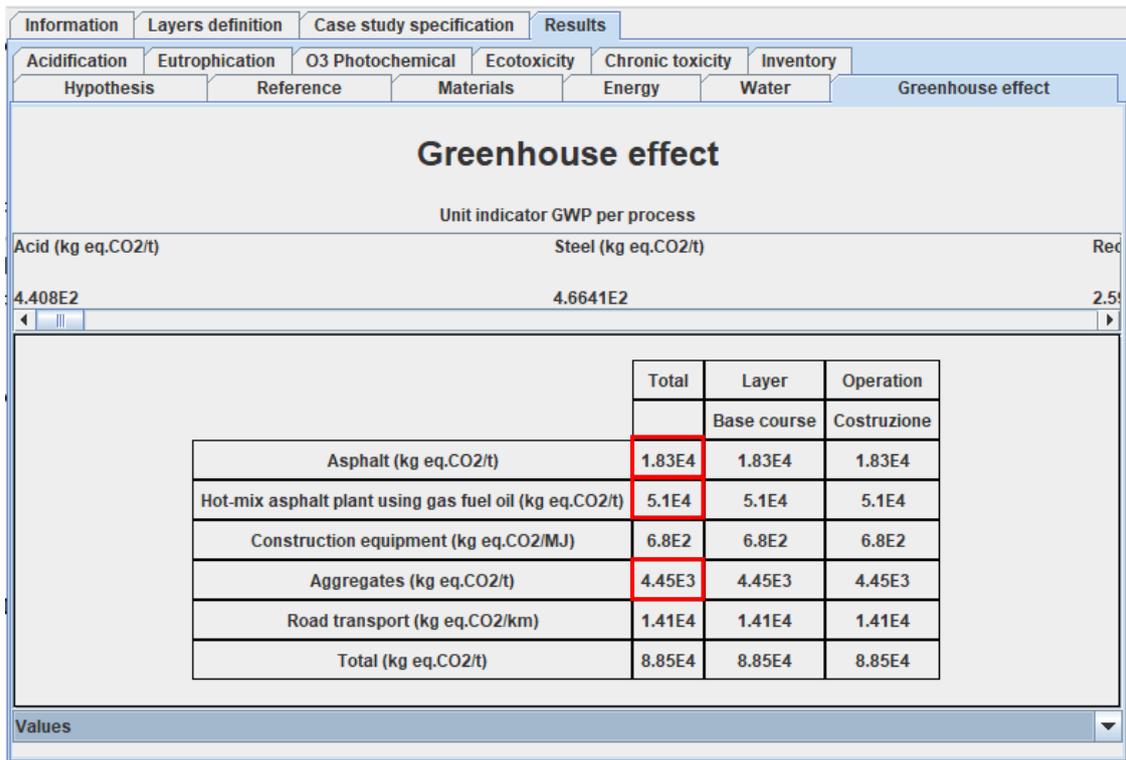


Figura 5.26 – Emissioni produzione materiali strato di base²⁹

STRATO DI FONDAZIONE

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione misto granulare}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = GWP_{\text{aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \cdot \text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} \text{ [t]} = 3329 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $GWP_{\text{aggregati}}$ = indicatore unitario di emissione relativo alla produzione di aggregati, definito attraverso l'espressione riportata in precedenza ed all'interno della **Tabella 5.8**;
- $\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}}$ = 1567 t, pari alla massa dello strato di fondazione ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = \text{densità volumica}_{\text{MISTO GRANULARE}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{FONDAZIONE}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{MISTO GRANULARE}} = 2,786 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{FONDAZIONE}} = 562 \text{ m}^3$.

²⁹ Il valore evidenziato corrispondente al termine *Asphalt* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di bitume; il valore evidenziato corrispondente al termine *Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso; il valore evidenziato corrispondente al termine *Aggregates* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di aggregati.

Information		Layers definition		Case study specification		Results																									
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																									
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																									
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																									
Greenhouse effect																															
Unit indicator GWP per process																															
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																											
4.408E2				4.6641E2																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Sub-base layer</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>8.72E3</td> <td>8.72E3</td> <td>8.72E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Sub-base layer	Costruzione	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3	Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4
	Total	Layer	Operation																												
		Sub-base layer	Costruzione																												
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2																												
Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3																												
Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3																												
Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4																												

Figura 5.27 – Emissioni produzione materiali strato di fondazione³⁰

5.1.3.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	990	4838	11432	17260

Tabella 5.9 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	1214	4995	13901	20110

Tabella 5.10 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento

BASE	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione			
	Produzione dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	4452	18316	50971	73739

Tabella 5.11 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base

³⁰ Il valore evidenziato corrispondente al termine *Asphalt* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di bitume; il valore evidenziato corrispondente al termine *Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di conglomerato bituminoso; il valore evidenziato corrispondente al termine *Aggregates* indica il valore di emissioni relativo alla produzione di aggregati.

FONDAZIONE	GWP (kg CO ₂ eq)	
	Fase di produzione	
	Produzione dei materiali	
	Misto granulare	Totale
ECORCE M	3329	3329

Tabella 5.12 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione

5.1.4 Athena Impact Estimator for Highways

Il contributo di emissioni di gas serra relativo alla produzione dei materiali che costituiscono gli strati della pavimentazione analizzata si ricava attraverso la formula empirica adottata dall'EPA (*United States Environmental Protection Agency*) ed inserita all'interno del manuale di utilizzo del *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI* - versione 2.1, 2012, EPA). La formulazione generica viene riportata di seguito:

$$\begin{aligned}
 GWP [kg CO_2eq] &= GWA_{CO_2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CO_2) [kg] + GWA_{CH_4} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] \\
 &\cdot (emissione\ in\ aria\ CH_4) [kg] + GWA_{N_2O} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg N_2O} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ N_2O) [kg]
 \end{aligned}$$

in cui:

- *GWP* = Global Warming Potential (Potenziale di Riscaldamento Globale);
- *GWA_{CO2}* = fattore di caratterizzazione Global Warming Air relativo alle emissioni in aria di CO₂ (anidride carbonica), pari a 1 kgCO₂eq/kgCO₂, come indicato all'interno di (TRACI – versione 2.1, 2012, EPA);
- *GWA_{CH4}* = fattore di caratterizzazione Global Warming Air relativo alle emissioni in aria di CH₄ (metano), pari a 25 kgCO₂eq/kgCH₄, come indicato all'interno di (TRACI – versione 2.1, 2012, EPA);
- *GWA_{N2O}* = fattore di caratterizzazione Global Warming Air relativo alle emissioni in aria di N₂O (ossido nitroso, protossido di azoto), pari a 298 kgCO₂eq/kgCO₂, come indicato all'interno di (TRACI – versione 2.1, 2012, EPA).

Per ciascuno strato della pavimentazione flessibile oggetto del presente lavoro, l'applicativo fornisce un dato di input relativo a ciascuna emissione in aria che comprende il contributo totale dovuto alla produzione di aggregati, alla produzione di bitume ed alla produzione della relativa miscela bituminosa³¹.

STRATO DI USURA

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per la produzione dei materiali utili alla costituzione dello strato di usura, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (emissioni)_{produzione} [kg CO_2eq] &= CO_{2,produzione} [kg] + 25 \cdot CH_{4,produzione} [kg] + 298 \cdot N_{2O,produzione} [kg] \\
 &= \mathbf{22333\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

³¹ Dati reperibili all'interno della scheda "Air Emissions" generata tra gli output dell'applicativo.

- $CO_{2,produzione} = 20933 \text{ kg}$;
- $CH_{4,produzione} = 56 \text{ kg}$;
- $N_2O_{,produzione} = 0,03 \text{ g}$.

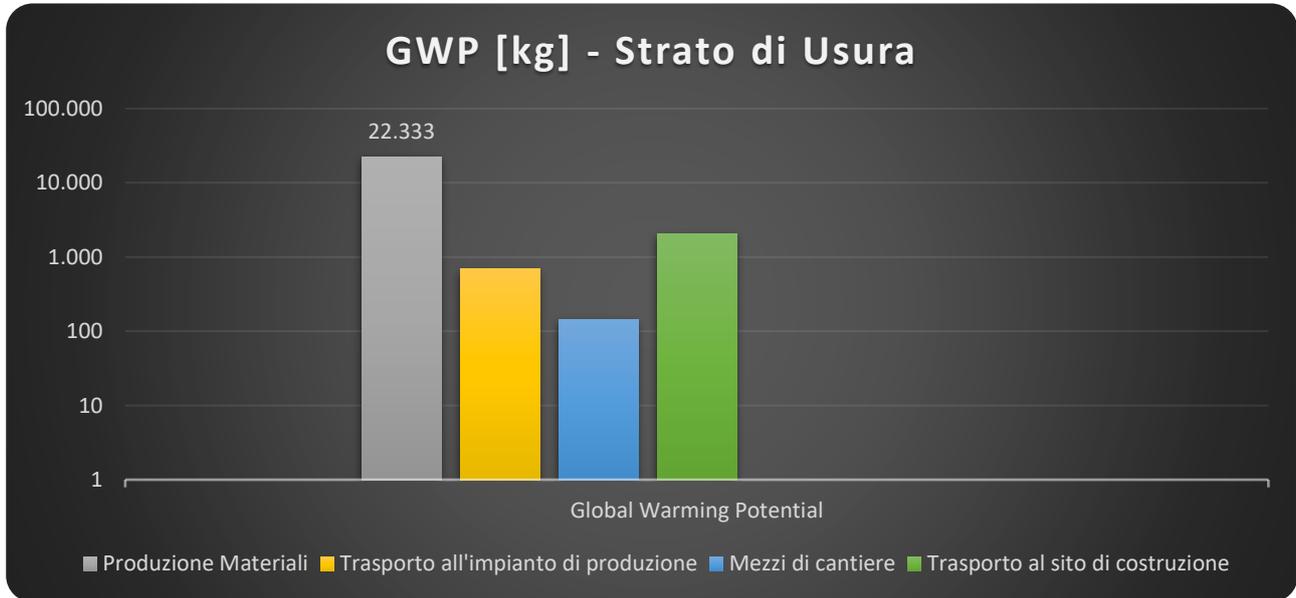


Figura 5.28 – GWP strato di usura (scala logaritmica)

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per la produzione dei materiali utili alla costituzione dello strato di collegamento, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione}} [\text{kg } CO_2eq] &= CO_{2,produzione} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,produzione} [\text{kg}] + 298 \cdot N_2O_{\text{produzione}} [\text{kg}] \\
 &= \mathbf{25107 \text{ kg } CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,produzione} = 23607 \text{ kg}$;
- $CH_{4,produzione} = 60 \text{ kg}$;
- $N_2O_{,produzione} = 0,04 \text{ g}$.

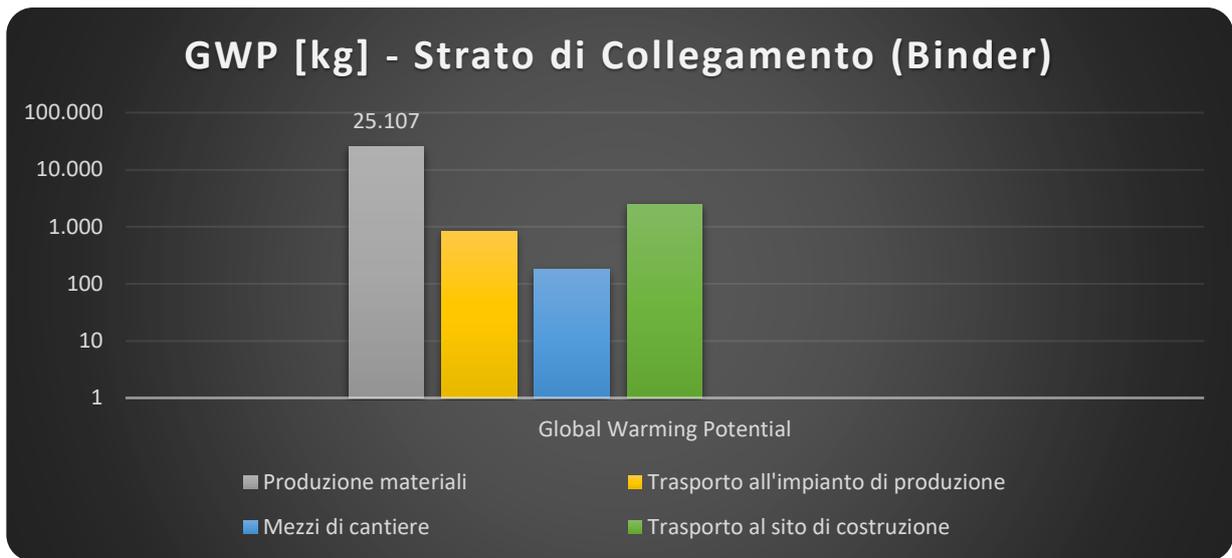


Figura 5.29 – GWP strato di collegamento (scala logaritmica)

STRATO DI BASE

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per la produzione dei materiali utili alla costituzione dello strato di base, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} &= CO_{2,\text{produzione}} \text{ [kg]} + 25 \cdot CH_{4,\text{produzione}} \text{ [kg]} + 298 \cdot N_{2}O_{\text{produzione}} \text{ [kg]} \\
 &= 77074 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{produzione}} = 72299 \text{ kg};$
- $CH_{4,\text{produzione}} = 191 \text{ kg};$
- $N_{2}O_{\text{produzione}} = 0,14 \text{ g}.$

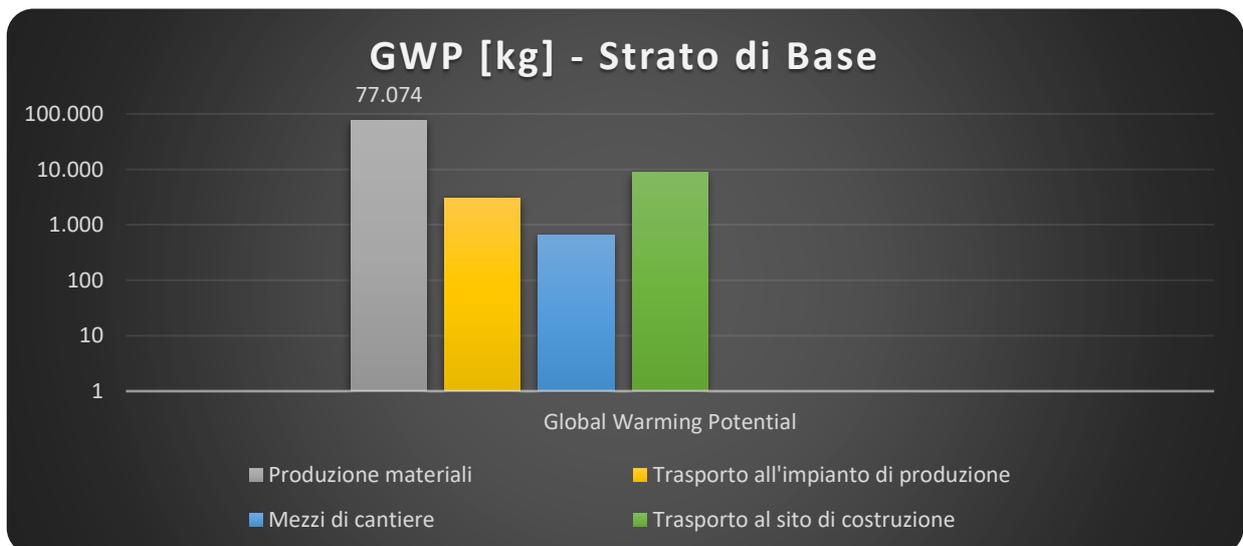


Figura 5.30 – GWP strato di base (scala logaritmica)

STRATO DI FONDAZIONE

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per la produzione dei materiali utili alla costituzione dello strato di fondazione, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{produzione}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= CO_{2,\text{produzione}}[\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{produzione}} [\text{kg}] + 298 \cdot N_2O_{\text{produzione}}[\text{kg}] \\
 &= 2430 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{produzione}} = 2422 \text{ kg}$;
- $CH_{4,\text{produzione}} = 0,31 \text{ kg}$;
- $N_2O_{\text{produzione}} = 2,50 \cdot 10^{-4} \text{ g}$.

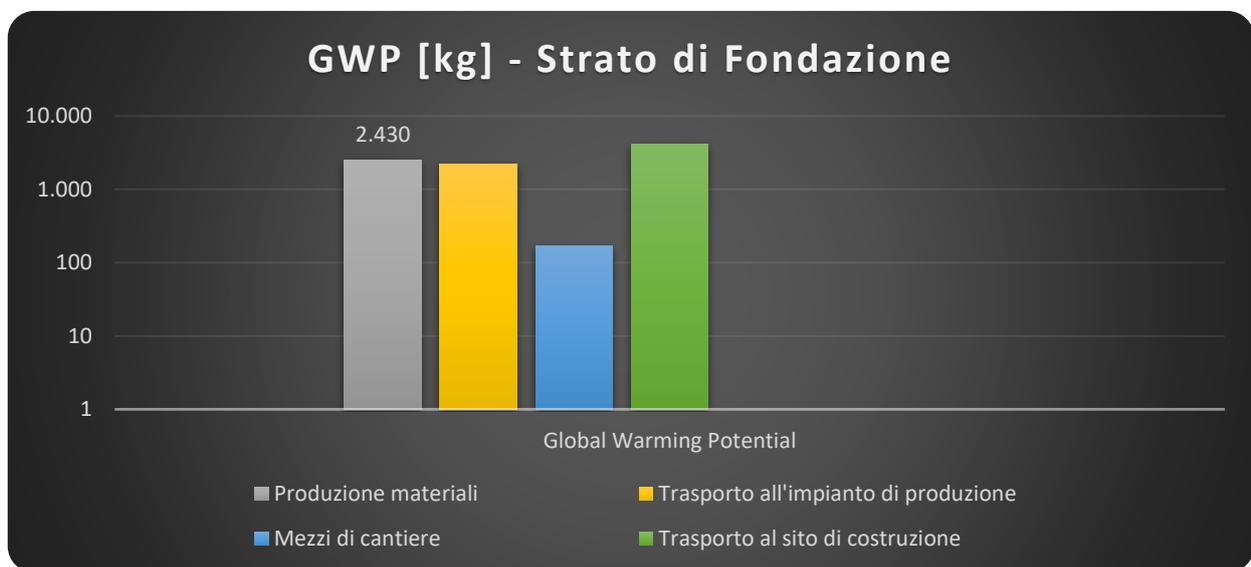


Figura 5.31 – GWP strato di fondazione (scala logaritmica)

5.1.4.1 Riepilogo dei risultati

Si riportano di seguito i risultati precedentemente ricavati, esposti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO ₂ eq)
	Fase di produzione
	Produzione dei materiali
	Totale
ATHENA	22333

Tabella 5.13 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO ₂ eq)
	Fase di produzione
	Produzione dei materiali
	Totale
ATHENA	25107

Tabella 5.14 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento

BASE	GWP (kg CO2eq)
	Fase di produzione
	Produzione dei materiali
	Totale
ATHENA	77074

Tabella 5.15 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO2eq)
	Fase di produzione
	Produzione dei materiali
	Totale
ATHENA	2430

Tabella 5.16 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione

5.2 Trasporto delle materie prime e delle miscele bituminose

In questa sezione si procede alla descrizione dei modelli matematici alla base della definizione delle emissioni di gas serra relative al trasporto dei materiali.

Il contributo di emissioni relativo al trasporto dei materiali interessa sia la fase di produzione che la fase di costruzione e si individuano le seguenti operazioni:

- trasporto delle materie prime per la produzione di conglomerato bituminoso, con destinazione il sito di produzione di conglomerato bituminoso → FASE DI PRODUZIONE;
- trasporto delle miscele bituminose prodotte all'interno del suddetto impianto al sito di costruzione, per la successiva costituzione degli strati legati della pavimentazione (usura, binder, base) → FASE DI COSTRUZIONE;
- trasporto degli aggregati necessari alla costituzione dello strato di fondazione della pavimentazione, in misto granulare, per il quale la distanza di trasporto considerata è unicamente quella al sito di costruzione, in quanto non risulta necessaria una lavorazione intermedia in impianto → FASE DI COSTRUZIONE.

In riferimento a quanto appena riportato, si considerano le seguenti distanze di trasporto:

- distanza per il trasporto degli aggregati utilizzati per la produzione del conglomerato bituminoso, dal sito di estrazione (Cava di Mollieres, comune di Cesana Torinese (TO)) al sito di produzione (impianto Sitalfa S.P.A.) pari a 14,5 km;
- distanza per il trasporto del bitume utilizzato per la produzione del conglomerato bituminoso, dalla raffineria (Iplom, comune di Busalla (GE)) al sito di produzione (impianto Sitalfa S.P.A.) pari a 229 km;
- distanza per il trasporto del conglomerato bituminoso, dal sito di produzione (impianto Sitalfa S.P.A.) al sito di costruzione (casello di Avigliana, A32 Torino-Bardonecchia), pari a 51,2 km;
- distanza per il trasporto degli aggregati utilizzati per la costituzione dello strato di fondazione, dal sito di estrazione (Cava di Mollieres, comune di Cesana Torinese (TO)) al sito di costruzione (casello di Avigliana, A32 Torino-Bardonecchia), pari a 65,7 km, ovvero si è considerata la somma delle distanze che intercorrono tra il sito di estrazione ed il sito di produzione (14,5 km) e tra il sito di produzione ed il sito di costruzione (51,2 km).

Per una migliore visualizzazione, si riportano nella seguente tabella le distanze di trasporto sopra descritte:

Distanza di trasporto [km]	
Aggregati (strati legati)	14,5
Bitume (strati legati)	229
Conglomerato bituminoso (strati legati)	51,2
Misto granulare (strato di fondazione)	65,7

Tabella 5.17 – Distanze di trasporto computate

5.2.1 PaLATE

Il computo delle emissioni di gas serra relative al trasporto dei materiali viene svolto attraverso i seguenti modelli matematici:

STRATO DI USURA

(emissioni)_{trasporto aggregati} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} [t]}{\text{capacità}_{\text{dumper}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\
 &\quad \left. \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \frac{\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g \text{ CO}_2\text{eq}}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\
 &+ \left(\frac{\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} [t]}{\text{capacità}_{\text{dumper}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\
 &\quad \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \\
 &\quad \left. \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \right) / 1000 = 515 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 98 \text{ kg CO}_2\text{eq} \\
 &= \mathbf{613 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = 480 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{AGGREGATI}} = \text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{AGGREGATI}} [m^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{AGGREGATI}} = 173 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{\text{dumper}}^{32} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{distanza trasporto} = 14,5 \text{ km}$, come descritto in precedenza;

³² Il mezzo utilizzato per il trasporto degli aggregati all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso è un dumper, ovvero un mezzo pesante con cassone autoribaltabile, per brevi distanze.

- consumo carburante *dumper* = 0,33 km/l, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- densità *DIESEL* = 848 g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo:

DIESEL CARBON CONTENT			
REFERENCE: Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996; http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf, Accessed 03/20/02 at 12PM			
Density	7,1 lb/gal	3223,4 g/gal	848,3 g/l
Weight Percent of Carbon Content	87%	0,0032234 Mg/gal	0,000848263 Mg/l
CO ₂ Efficiency Factor	99%		

Figura 5.32 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- contenuto CO_2eq_{DIESEL} = 3,16 g CO_2eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
 & \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\
 & = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ } C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } C}{g \text{ diesel}} \right] \\
 & \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 \text{ [\%]}}{100}
 \end{aligned}$$

dove:

- rapporto CO_2/C = 3,67 g CO_2/g C;
- contenuto carbonio $DIESEL$ = 0,87 g C/g diesel;
- fattore rendimento CO_2 = 99%.

DIESEL CARBON CONTENT			
REFERENCE: Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996; http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf, Accessed 03/20/02 at 12PM			
Density	7,1 lb/gal	3223,4 g/gal	848,3 g/l
Weight Percent of Carbon Content	87%	0,0032234 Mg/gal	0,000848263 Mg/l
CO ₂ Efficiency Factor	99%		

Figura 5.33 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- fattore emissione $DIESEL$ = 543404 g/shortons, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo:

INPUT PaLATE - DIESEL										
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
543.404	694.45	2.055.68	2.752	199	44.180	0.00	0.02	0.15	-	327.092

INPUT PaLATE - ACQUA										
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
145	1.05	0.34	0.37	0.12	5	0	0	0	-	0

Figura 5.34 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- o *fattore di conversione* = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

(emissioni)_{trasporto bitume} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{massa}_{\text{BITUME}} [t]}{\text{capacità}_{\text{tanker truck}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\
 &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{tanker truck}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\quad \left. \cdot \frac{\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g \text{ CO}_2\text{eq}}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\
 &+ \left(\frac{\text{massa}_{\text{BITUME}} [t]}{\text{capacità}_{\text{tanker truck}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\
 &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{tanker truck}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\
 &\quad \left. \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \right) / 1000 \\
 &= 150 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 28 \text{ kg CO}_2\text{eq} = \mathbf{178 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- o $\text{massa}_{\text{BITUME}} = 27 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{BITUME}} = \text{densità volumica}_{\text{BITUME}} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BITUME}} [m^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{BITUME}} = 0,998 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{BITUME}} = 27 \text{ m}^3$.
- o $\text{capacità}_{\text{tanker truck}}^{33} = 20 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;

³³ Il mezzo utilizzato per il trasporto del bitume all'impianto di produzione di conglomerato bituminoso è un tanker truck, ovvero un mezzo articolato per il trasporto di sostanze liquide o gassose.

- *distanza trasporto* = 229 km, come descritto in precedenza;
- *consumo carburante* *tanker truck* = 0,20 km/l, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;
- *densità* *DIESEL* = 848 g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- *contenuto CO₂eq* *DIESEL* = 3,16 g CO₂eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ } C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } C}{g \text{ diesel}} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 \text{ } [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- *rapporto CO₂/C* = 3,67 g CO₂/g C;
- *contenuto carbonio* *DIESEL* = 0,87 g C/g diesel;
- *fattore rendimento CO₂* = 99%.
- *fattore emissione* *DIESEL* = 543404 g/shortons, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- *fattore di conversione* = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

La totalità delle emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di produzione si ottengono come somma dei precedenti contributi:

$$\begin{aligned} (\text{emissioni } CO_2)_{\text{trasporto produzione}} \text{ [kg } CO_2eq] \\ = (\text{emissioni } CO_2)_{\text{trasporto aggregati}} \text{ [kg } CO_2eq] \\ + (\text{emissioni } CO_2)_{\text{trasporto bitume}} \text{ [kg } CO_2eq] = 791 \text{ kg } CO_2eq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{(emissioni)}_{\text{trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
& = \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \cdot \frac{\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{g diesel}} \right]}{1000} \right) \\
& + \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1000000} \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{\text{t}} \right] \right) / 1000 \\
& = 842 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 160 \text{ kg CO}_2\text{eq} = \mathbf{1002 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
\end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 477 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$\begin{aligned}
& \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \\
& = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{USURA}} \text{ [m}^3\text{]}
\end{aligned}$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,544 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{USURA}} = 188 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{\text{dumper}} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{distanza trasporto} = 51,2 \text{ km}$, come descritto in precedenza;
- $\text{consumo carburante}_{\text{dumper}} = 0,33 \text{ km/l}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{densità}_{\text{DIESEL}} = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- $\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} = 3,16 \text{ g CO}_2\text{eq/g diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
& \text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{g diesel}} \right] \\
& = \text{rapporto} \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} \left[\frac{\text{g CO}_2}{\text{g C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g C}}{\text{g diesel}} \right] \\
& \cdot \frac{\text{fattore rendimento CO}_2 \text{ [%]}}{100}
\end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/\text{g C}$;
 - contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
 - fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
 - fattore di conversione = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

Le emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di costruzione corrispondono al valore di emissione sopra riportato, coincidente con il trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione.

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

(emissioni)_{trasporto aggregati} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{massa}_{AGGREGATI} [t]}{\text{capacità}_{dumper} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\
 &\quad \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \frac{\text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \left. \right) \\
 &+ \left(\frac{\text{massa}_{AGGREGATI} [t]}{\text{capacità}_{dumper} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\
 &\quad \cdot \frac{\text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \\
 &\quad \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \left. \right) / 1000 = 598 \text{ kg } CO_2eq + 114 \text{ kg } CO_2eq \\
 &= \mathbf{712 \text{ kg } CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{AGGREGATI} = 586 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{AGGREGATI} = \text{densità volumica}_{AGGREGATI} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{AGGREGATI} [m^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{AGGREGATI} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
 - $\text{volume}_{AGGREGATI} = 210 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{dumper} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
 - $\text{distanza trasporto} = 14,5 \text{ km}$, come descritto in precedenza;
 - $\text{consumo carburante}_{dumper} = 0,33 \text{ km/l}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;

- densità $DIESEL = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato per il caso dello strato di usura.
- contenuto $CO_2eq_{DIESEL} = 3,16 \text{ g } CO_2eq/g \text{ diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ C}}{g \text{ diesel}} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 \text{ [\%]}}{100} \end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/g \text{ C}$;
- contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
- fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- fattore di conversione = $1,102 \text{ shortons/t}$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

(emissioni)_{trasporto bitume} [kg CO_2eq]

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{\text{massa}_{BITUME} [t]}{\text{capacità}_{tanker \text{ truck}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\ &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{tanker \text{ truck}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\ &\quad \left. \cdot \frac{\text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\ &+ \left(\frac{\text{massa}_{BITUME} [t]}{\text{capacità}_{tanker \text{ truck}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\ &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{tanker \text{ truck}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\ &\quad \left. \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \right) / 1000 \\ &= 154 \text{ kg } CO_2eq + 29 \text{ kg } CO_2eq = \mathbf{183 \text{ kg } CO_2eq} \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{BITUME} = 28 \text{ t}$, ottenuta come:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{BITUME} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BITUME} [m^3]$$

dove:

- $densità\ volumica_{BITUME} = 0,998\ t/m^3$;
- $volume_{BITUME} = 28\ m^3$.
- $capacità_{tanker\ truck} = 20\ t$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;
- $distanza\ trasporto = 229\ km$, come descritto in precedenza;
- consumo carburante $_{tanker\ truck} = 0,20\ km/l$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;
- $densità_{DIESEL} = 848\ g/l$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- $contenuto\ CO_2eq_{DIESEL} = 3,16\ g\ CO_2eq/g\ diesel$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g\ CO_2}{g\ C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g\ C}{g\ diesel} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- $rapporto\ CO_2/C = 3,67\ g\ CO_2/g\ C$;
- $contenuto\ carbonio_{DIESEL} = 0,87\ g\ C/g\ diesel$;
- $fattore\ rendimento\ CO_2 = 99\%$.
- $fattore\ emissione_{DIESEL} = 543404\ g/shortons$, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- $fattore\ di\ conversione = 1,102\ shortons/t$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

La totalità delle emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di produzione si ottengono come somma dei precedenti contributi:

$$\begin{aligned} (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ produzione} [kg\ CO_2eq] \\ = (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ aggregati} [kg\ CO_2eq] \\ + (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ bitume} [kg\ CO_2eq] = 895\ kg\ CO_2eq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{(emissioni)}_{\text{trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
& = \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \right. \\
& \quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \\
& \quad \left. \cdot \frac{\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{g diesel}} \right]}{1000} \right) \\
& + \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \right. \\
& \quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1000000} \\
& \quad \left. \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{\text{t}} \right] \right) / 1000 \\
& = 1018 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 194 \text{ kg CO}_2\text{eq} = \mathbf{1212 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
\end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 580 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$\begin{aligned}
& \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \\
& = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} \text{ [m}^3\text{]}
\end{aligned}$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,578 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{BINDER}} = 225 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{\text{dumper}} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{distanza trasporto} = 51,2 \text{ km}$, come descritto in precedenza;
- $\text{consumo carburante}_{\text{dumper}} = 0,33 \text{ km/l}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{densità}_{\text{DIESEL}} = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- $\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} = 3,16 \text{ g CO}_2\text{eq/g diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ } C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } C}{g \text{ diesel}} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/g \text{ } C$;
- contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g } C/g \text{ diesel}$;
- fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- *fattore emissione* $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- *fattore di conversione* = $1,102 \text{ shortons/t}$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

Le emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di costruzione corrispondono al valore di emissione sopra riportato, coincidente con il trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione.

STRATO DI BASE

(emissioni)_{trasporto aggregati} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{\text{massa}_{AGGREGATI} [t]}{\text{capacità}_{dumper} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\ &\quad \cdot \left. \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \frac{\text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\ &+ \left(\frac{\text{massa}_{AGGREGATI} [t]}{\text{capacità}_{dumper} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \cdot \text{consumo carburante}_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \right. \\ &\quad \cdot \frac{\text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \\ &\quad \left. \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \right) / 1000 = 1924 \text{ kg } CO_2eq + 367 \text{ kg } CO_2eq \\ &= \mathbf{2291 \text{ kg } CO_2eq} \end{aligned}$$

in cui:

- *massa* $AGGREGATI = 2138 \text{ t}$, ottenuta come:

$$\text{massa}_{AGGREGATI} = \text{densità volumica}_{AGGREGATI} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{AGGREGATI} [m^3]$$

dove:

- *densità volumica* $AGGREGATI = 2,786 \text{ t/m}^3$;

- $volume_{AGGREGATI} = 767 \text{ m}^3$.
- $capacità_{dumper} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $distanza_{trasporto} = 14,5 \text{ km}$, come descritto in precedenza;
- $consumo_{carburante}_{dumper} = 0,33 \text{ km/l}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $densità_{DIESEL} = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato per il caso dello strato di usura.
- $contenuto_{CO_2eq}_{DIESEL} = 3,16 \text{ g CO}_2\text{eq/g diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto}_{CO_2eq}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ CO}_2\text{eq}}{g \text{ diesel}} \right] \\ = \frac{\text{rapporto}_{\frac{CO_2}{C}} \left[\frac{g \text{ CO}_2}{g \text{ C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ C}}{g \text{ diesel}} \right]}{\text{fattore rendimento}_{CO_2} [\%]} \\ \cdot \frac{100}{100} \end{aligned}$$

dove:

- $\text{rapporto}_{CO_2/C} = 3,67 \text{ g CO}_2/\text{g C}$;
- $\text{contenuto carbonio}_{DIESEL} = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
- $\text{fattore rendimento}_{CO_2} = 99\%$.
- $\text{fattore emissione}_{DIESEL} = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- $\text{fattore di conversione} = 1,102 \text{ shortons/t}$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

(emissioni)_{trasporto bitume} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{\text{massa}_{BITUME} [t]}{\text{capacità}_{tanker truck} [t]} \cdot \text{distanza}_{trasporto} [km] \right. \\ &\quad \cdot \text{consumo}_{carburante}_{tanker truck} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\ &\quad \left. \cdot \frac{\text{contenuto}_{CO_2eq}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ CO}_2\text{eq}}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\ &+ \left(\frac{\text{massa}_{BITUME} [t]}{\text{capacità}_{tanker truck} [t]} \cdot \text{distanza}_{trasporto} [km] \right. \\ &\quad \cdot \text{consumo}_{carburante}_{tanker truck} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\ &\quad \left. \cdot \text{fattore}_{emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot \text{fattore}_{conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \right) / 1000 \\ &= 561 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 106 \text{ kg CO}_2\text{eq} = \mathbf{667 \text{ kg CO}_2\text{eq}} \end{aligned}$$

in cui:

- $massa_{BITUME} = 101$ t, ottenuta come:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{BITUME} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BITUME} [m^3]$$

dove:

- $densità\ volumica_{BITUME} = 0,998$ t/m³;
- $volume_{BITUME} = 101$ m³.
- $capacità_{tanker\ truck} = 20$ t, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;
- $distanza\ trasporto = 229$ km, come descritto in precedenza;
- $consumo\ carburante_{tanker\ truck} = 0,20$ km/l, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 3 assi MAN;
- $densità_{DIESEL} = 848$ g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- $contenuto\ CO_2eq_{DIESEL} = 3,16$ g CO₂eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} & \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] \\ &= \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g\ CO_2}{g\ C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g\ C}{g\ diesel} \right] \\ & \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- $rapporto\ CO_2/C = 3,67$ g CO₂/g C;
- $contenuto\ carbonio_{DIESEL} = 0,87$ g C/g diesel;
- $fattore\ rendimento\ CO_2 = 99\%$.
- $fattore\ emissione_{DIESEL} = 543404$ g/shortons, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- $fattore\ di\ conversione = 1,102$ shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

La totalità delle emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di produzione si ottengono come somma dei precedenti contributi:

$$\begin{aligned} & (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ produzione} [kg\ CO_2eq] \\ &= (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ aggregati} [kg\ CO_2eq] \\ &+ (emissioni\ CO_2)_{trasporto\ bitume} [kg\ CO_2eq] = \mathbf{2958\ kg\ CO_2eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{(emissioni)}_{\text{trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
& = \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \cdot \frac{\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{g diesel}} \right]}{1000} \right) \\
& + \left(\frac{\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \text{ [t]} \cdot \text{distanza trasporto} \text{ [km]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{\text{l}}{\text{km}} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1000000} \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g}}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{\text{t}} \right] \right) / 1000 \\
& = 3714 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 708 \text{ kg CO}_2\text{eq} = \mathbf{4422 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
\end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2127 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BASE}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,544 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{BASE}} = 825 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{\text{dumper}} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{distanza trasporto} = 51,2 \text{ km}$, come descritto in precedenza;
- $\text{consumo carburante}_{\text{dumper}} = 0,33 \text{ km/l}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{densità}_{\text{DIESEL}} = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato in precedenza;
- $\text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} = 3,16 \text{ g CO}_2\text{eq/g diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned}
& \text{contenuto CO}_2\text{eq}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{g diesel}} \right] \\
& = \text{rapporto} \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} \left[\frac{\text{g CO}_2}{\text{g C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{g C}}{\text{g diesel}} \right] \\
& \cdot \frac{\text{fattore rendimento CO}_2 \text{ [%]}}{100}
\end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/\text{g C}$;
- contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
- fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- fattore di conversione = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

Le emissioni relative al trasporto dei materiali per la fase di costruzione corrispondono al valore di emissione sopra riportato, coincidente con il trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione.

STRATO DI FONDAZIONE

(emissioni) *trasporto misto granulare* [**kg CO₂eq**]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} [t]}{\text{capacità}_{\text{dumper}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\
 &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\quad \left. \cdot \frac{\text{contenuto } CO_2eq_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right]}{1000} \right) \\
 &+ \left(\frac{\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} [t]}{\text{capacità}_{\text{dumper}} [t]} \cdot \text{distanza trasporto} [km] \right. \\
 &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{dumper}} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{\text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\
 &\quad \left. \cdot \text{fattore emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \right) / 1000 \\
 &= 2864 \text{ kg } CO_2eq + 546 \text{ kg } CO_2eq = \mathbf{3410 \text{ kg } CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = 1567 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di fondazione ed ottenuta come:

$$\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = \text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{MISTO GRANULARE}} [m^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{AGGREGATI}} = 2,786 \text{ t/m}^3$;
- $\text{volume}_{\text{AGGREGATI}} = 562 \text{ m}^3$.
- $\text{capacità}_{\text{dumper}} = 25 \text{ t}$, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- $\text{distanza trasporto} = 65,7 \text{ km}$, considerando un trasporto diretto dal sito di estrazione degli aggregati ed il sito di costruzione;

- consumo carburante $_{dumper} = 0,33$ km/l, come riportato all'interno della scheda tecnica relativa al modello 4 assi IVECO;
- densità $_{DIESEL} = 848$ g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo, come mostrato per il caso dello strato di usura.
- contenuto $CO_2eq_{DIESEL} = 3,16$ g CO_2eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ C}}{g \text{ diesel}} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67$ g CO_2/g C;
- contenuto carbonio $_{DIESEL} = 0,87$ g C/g diesel;
- fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $_{DIESEL} = 543404$ g/shortons, come definito precedentemente all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo;
- fattore di conversione = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

Le emissioni relative al trasporto dei materiali corrispondono al valore di emissione sopra riportato.

5.2.1.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	613	178	1002	1793

Tabella 5.18 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	712	183	1212	2107

Tabella 5.19 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
PALATE	2291	667	4422	7380

Tabella 5.20 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO ₂ eq)	
	Fase di costruzione	
	Trasporto dei materiali	
	Misto granulare	Totale
PALATE	3410	3410

Tabella 5.21 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione

5.2.2 asPECT

I valori di GWP relativi al trasporto dei materiali sono calcolati considerando i fattori di emissione “*activity plus well-to-tank*”³⁴. Il modello matematico utilizzato dall’applicativo per il computo delle suddette emissioni è il medesimo per il trasporto delle materie prime (aggregati, bitume) all’impianto di produzione di conglomerato bituminoso, sia per il trasporto delle miscele bituminose prodotte all’interno dell’impianto al sito di costruzione.

Nel caso del trasporto dei materiali relativo alla fase di produzione, ovvero il trasporto riguardante aggregati e bitume, il modello matematico utilizzato dall’applicativo si articola, in modo eguale per il trasporto di aggregati e trasporto di bitume, partendo dalla definizione delle emissioni relative ad un singolo viaggio del mezzo di trasporto, considerando come distanza percorsa la somma tra viaggio di andata e viaggio di ritorno; si definiscono successivamente delle emissioni adimensionalizzate rispetto alla capacità dei mezzi di trasporto, le quali sono in seguito combinate tra loro (media pesata rispetto alla percentuale di materiale all’interno della miscela bituminosa) in modo tale da ottenere un unico valore di emissione adimensionalizzata. Il prodotto tra tale emissione e la massa di materiale costituente lo strato via via considerato fornisce il valore finale di emissione per il trasporto dei materiali inerente alla fase di produzione.

Per quanto concerne la definizione delle emissioni relative al trasporto delle miscele bituminose dall’impianto di produzione al sito di costruzione, il modello matematico considerato dall’applicativo è il medesimo, con l’eccezione di non avere una combinazione tra valori di emissione adimensionalizzati, ma un unico valore relativo al trasporto della sola miscela bituminosa.

STRATO DI USURA

I modelli matematici applicati per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all’impianto di produzione si sviluppano come segue:

³⁴ BEIS’s Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, aggregati}} [kg CO_2eq] \\
 & = \text{distanza percorsa} [vkm] \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right) = 33,8 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

In cui:

- *distanza percorsa [vkm]* = doppio della distanza che intercorre tra il sito di partenza ed il sito di arrivo, in quanto si considera anche il viaggio di ritorno, pari a **29 vkm**;
- *Defra 50% load factor [Total GHG]* = emissione di GHG relativa ad un fattore medio di carico del 50% tra andata e ritorno, secondo quanto assunto dal *Department of Environment, Food & Rural Affairs (Defra)*, pari a **1,166 kgCO₂eq/vkm** per un mezzo rigido con capacità > 17t³⁵ (*Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*):

Annex 7 - Freight Transport Conversion Tables

Last updated: Apr-12

Table 7d

Diesel HGV Road Freight Conversion Factors: Vehicle km Basis					Scope 1 OR Scope 3				Scope 3	All Scopes
					CO ₂		CH ₄	N ₂ O	Total Direct GHG	Total Indirect GHG
	Gross Vehicle Weight (tonnes)	% weight laden	Total vehicle km travelled	x	kg CO ₂ per vehicle km	kg CO ₂ e per vehicle km				
Rigid	>3.5-7.5t	0%		x	0.54291	0.00022	0.00806	0.54919	0.11866	0.66585
		50%		x	0.59012	0.00022	0.00806	0.59640	0.12869	0.72309
		100%		x	0.63733	0.00022	0.00806	0.64361	0.13872	0.78033
		46%	(UK average load)	x	0.58635	0.00022	0.00806	0.59263	0.12589	0.71852
Rigid	>7.5-17t	0%		x	0.84930	0.00027	0.00746	0.85703	0.19957	0.79680
		50%		x	0.74206	0.00027	0.00746	0.74979	0.15928	0.90907
		100%		x	0.83482	0.00027	0.00746	0.84255	0.17898	1.02153
		39%	(UK average load)	x	0.72166	0.00027	0.00746	0.72939	0.15494	0.88433
Rigid	>17t	0%		x	0.78075	0.00036	0.00998	0.79109	0.16805	0.95914
		50%		x	0.95214	0.00036	0.00998	0.96248	0.20446	1.16694
		100%		x	1.12353	0.00036	0.00998	1.13387	0.24087	1.37474
		54%	(UK average load)	x	0.96632	0.00036	0.00998	0.97666	0.20747	1.18413
All rigid	UK average	53%		x	0.82475	0.00031	0.00852	0.83358	0.17708	1.01066
Articulated	>3.5-33t	0%		x	0.72374	0.00049	0.00912	0.73335	0.15578	0.88913
		50%		x	0.90468	0.00049	0.00912	0.91429	0.18422	1.10851
		100%		x	1.08562	0.00049	0.00912	1.09523	0.23266	1.32789
		44%	(UK average load)	x	0.88297	0.00049	0.00912	0.89258	0.18961	1.08219
Articulated	>33t	0%		x	0.69872	0.00055	0.01020	0.70947	0.15071	0.86018
		50%		x	0.93163	0.00055	0.01020	0.94238	0.20019	1.14257
		100%		x	1.16454	0.00055	0.01020	1.17529	0.24967	1.42496
		62%	(UK average load)	x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
All artics	UK average	61%		x	0.88753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
ALL HGVs	UK average	57%		x	0.90015	0.00043	0.00930	0.90988	0.19328	1.10316
Total										

Figura 5.35 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting

- *Defra 0% load factor [Total GHG]* = emissione di GHG relativa ad un fattore di carico dello 0% (viaggio di ritorno) secondo quanto assunto dal Department of Environment, Food & Rural Affairs (Defra), pari a **0,959 kgCO₂eq/vkm** per un mezzo rigido con capacità > 17t (*Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*):

³⁵ Tra le tipologie di mezzi di trasporto fornite dall'applicativo, si è scelto il mezzo più simile per tipologia ad un dumper, il quale corrisponde ad un mezzo rigido con capacità pari a 17 tonnellate.

Annex 7 - Freight Transport Conversion Tables

Last updated: Apr-12

Table 7d

Diesel HGV Road Freight Conversion Factors: Vehicle km Basis					Scope 1 OR Scope 3			Total Direct GHG	Scope 3 Total Indirect GHG	All Scopes Grand Total GHG
	Gross Vehicle Weight (tonnes)	% weight laden	Total vehicle km travelled		CO ₂ kg CO ₂ e per vehicle km	CH ₄ kg CO ₂ e per vehicle km	N ₂ O kg CO ₂ e per vehicle km	kg CO ₂ e per vehicle km	kg CO ₂ e per vehicle km	kg CO ₂ e per vehicle km
Rigid	>3.5-7.5t	0%		x	0.54291	0.00022	0.00006	0.54919	0.11666	0.86585
		50%		x	0.59012	0.00022	0.00006	0.59640	0.12669	0.72309
		100%		x	0.63733	0.00022	0.00006	0.64361	0.13672	0.78033
		46%	(UK average load)	x	0.58635	0.00022	0.00006	0.59263	0.12589	0.71852
Rigid	>7.5-17t	0%		x	0.64930	0.00027	0.00746	0.65703	0.13957	0.79660
		50%		x	0.74206	0.00027	0.00746	0.74979	0.15928	0.90907
		100%		x	0.83482	0.00027	0.00746	0.84255	0.17898	1.02153
		39%	(UK average load)	x	0.72166	0.00027	0.00746	0.72939	0.15494	0.88433
Rigid	>17t	0%		x	0.78075	0.00036	0.00998	0.79109	0.16805	0.95914
		50%		x	0.95214	0.00036	0.00998	0.96248	0.20446	1.16694
		100%		x	1.12353	0.00036	0.00998	1.13387	0.24087	1.37474
		54%	(UK average load)	x	0.96632	0.00036	0.00998	0.97666	0.20747	1.18413
All rigids	UK average	53%		x	0.82475	0.00031	0.00852	0.83358	0.17708	1.01066
Articulated	>3.5-33t	0%		x	0.72374	0.00049	0.00912	0.73335	0.15578	0.88913
		50%		x	0.90468	0.00049	0.00912	0.91429	0.19422	1.10551
		100%		x	1.08562	0.00049	0.00912	1.09523	0.23266	1.32789
		44%	(UK average load)	x	0.88297	0.00049	0.00912	0.89258	0.18961	1.08219
Articulated	>33t	0%		x	0.89872	0.00055	0.01020	0.90947	0.15071	0.86018
		50%		x	0.93163	0.00055	0.01020	0.94238	0.20019	1.14257
		100%		x	1.16454	0.00055	0.01020	1.17529	0.24967	1.42496
		62%	(UK average load)	x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
All artic	UK average	61%		x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
ALL HGVs	UK average	57%		x	0.90015	0.00043	0.00930	0.90988	0.19328	1.10316
Total										

Figura 5.36 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting

- o f = valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al **50%** in quanto si è supposto un viaggio di andata a pieno carico ed un viaggio di ritorno scarico.

$$(emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio, aggregati} [kg\ CO_2eq/t] = \frac{(emissioni)_{singolo\ viaggio, aggregati} [kg\ CO_2eq]}{2 \cdot Capacità_{rigid > 17t} [t]} = 0,99\ kg\ CO_2eq/t$$

In cui:

- o $Capacità_{rigid > 17t} [t] = 34\ t$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

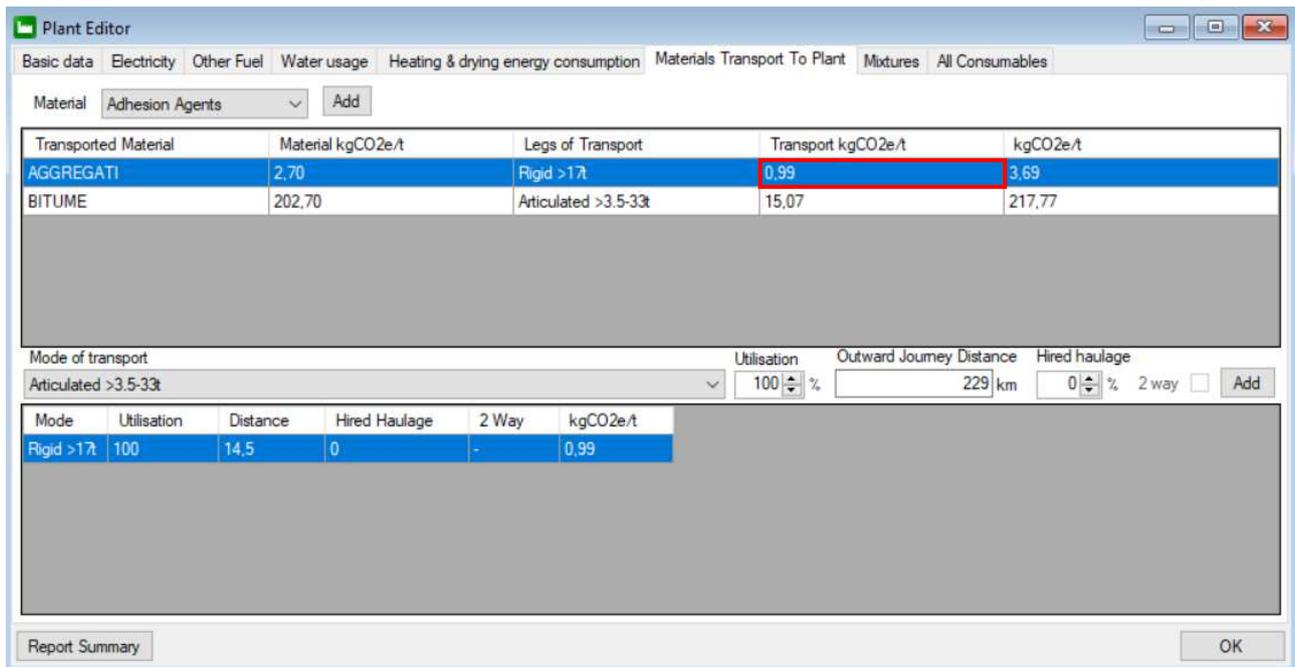


Figura 5.37 – Interfaccia asPECT emissione media

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{dist. percorsa [vkm]} \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor articulated} > 3,5\text{t}-33\text{t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor articulated} > 3,5\text{t}-33\text{t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right) \\
 & = 507,9 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

In cui:

- *distanza percorsa [vkm] = 458 vkm*, pari al doppio della distanza che intercorre tra la raffineria fornitrice di bitume e l'impianto di produzione di conglomerato bituminoso;
- *Defra 50% load factor [Total GHG]* = emissione di GHG relativa ad un fattore medio di carico del 50% tra andata e ritorno, secondo quanto assunto dal *Department of Environment, Food & Rural Affairs (Defra)*, **1,109 kgCO₂eq/vkm** per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t³⁶ (*Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*):

Annex 7 - Freight Transport Conversion Tables

Last updated: Apr-12

Table 7d

Diesel HGV Road Freight Conversion Factors: Vehicle km Basis					Scope 1 OR Scope 3				Scope 3 Total Indirect GHG	All Scopes Grand Total GHG
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total Direct GHG		
	Gross Vehicle Weight (tonnes)	% weight laden	Total vehicle km travelled	x	kg CO ₂ e per vehicle km					
Rigid	>3.5-7.5t	0%		x	0.54291	0.00022	0.00606	0.54919	0.11666	0.66585
		50%		x	0.59012	0.00022	0.00606	0.59640	0.12668	0.72309
		100%		x	0.63733	0.00022	0.00606	0.64361	0.13672	0.78033
		46%	(UK average load)	x	0.58635	0.00022	0.00606	0.59263	0.12589	0.71852
Rigid	>7.5-17t	0%		x	0.64930	0.00027	0.00746	0.65703	0.13957	0.79660
		50%		x	0.74206	0.00027	0.00746	0.74979	0.15928	0.90907
		100%		x	0.83482	0.00027	0.00746	0.84255	0.17898	1.02153
		39%	(UK average load)	x	0.72166	0.00027	0.00746	0.72939	0.15494	0.88433
Rigid	>17t	0%		x	0.78075	0.00036	0.00998	0.79109	0.16805	0.95914
		50%		x	0.95214	0.00036	0.00998	0.96248	0.20446	1.16694
		100%		x	1.12353	0.00036	0.00998	1.13387	0.24087	1.37474
		54%	(UK average load)	x	0.96632	0.00036	0.00998	0.97666	0.20747	1.18413
All rigid	UK average	53%		x	0.82475	0.00031	0.00852	0.83358	0.17708	1.01066
Articulated	>3.5-33t	0%		x	0.72374	0.00049	0.00912	0.73335	0.15578	0.88913
		50%		x	0.90468	0.00049	0.00912	0.91429	0.19422	1.10851
		100%		x	1.08562	0.00049	0.00912	1.09523	0.23266	1.32789
		44%	(UK average load)	x	0.88297	0.00049	0.00912	0.89258	0.16967	1.06219
Articulated	>33t	0%		x	0.69872	0.00055	0.01020	0.70947	0.15071	0.86018
		50%		x	0.93163	0.00055	0.01020	0.94238	0.20019	1.14257
		100%		x	1.16454	0.00055	0.01020	1.17529	0.24967	1.42496
		62%	(UK average load)	x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
All artics	UK average	61%		x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
ALL HGVs	UK average	57%		x	0.90015	0.00043	0.00930	0.90988	0.19328	1.10316
Total										

Figura 5.38 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting

- *Defra 0% load factor [Total GHG]* = emissione di GHG relativa ad un fattore medio di carico del 50% tra andata e ritorno, secondo quanto assunto dal *Department of Environment, Food & Rural Affairs (Defra)*, **0,889 kgCO₂eq/vkm** per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t (*Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*):

³⁶ Tra le tipologie di mezzi di trasporto fornite dall'applicativo, si è scelto il mezzo più simile per tipologia ad un tanker truck, il quale corrisponde ad un mezzo articolato con capacità compresa tra le 3,5 tonnellate e le 33 tonnellate.

Annex 7 - Freight Transport Conversion Tables

Last updated: Apr-12

Table 7d

Diesel HGV Road Freight Conversion Factors: Vehicle km Basis					Scope 1 OR Scope 3				Scope 3 Total Indirect GHG	All Scopes Grand Total GHG
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total Direct GHG		
	Gross Vehicle Weight (tonnes)	% weight laden	Total vehicle km travelled	x	kg CO ₂ e per vehicle km					
Rigid	>3.5-7.5t	0%		x	0.54291	0.00022	0.00006	0.54919	0.11666	0.86585
		50%		x	0.59012	0.00022	0.00006	0.59640	0.12669	0.72309
		100%		x	0.63733	0.00022	0.00006	0.64361	0.13672	0.78033
		46%	(UK average load)	x	0.58635	0.00022	0.00006	0.59263	0.12589	0.71852
Rigid	>7.5-17t	0%		x	0.64930	0.00027	0.00746	0.65703	0.13957	0.79660
		50%		x	0.74206	0.00027	0.00746	0.74979	0.15928	0.90907
		100%		x	0.83482	0.00027	0.00746	0.84255	0.17898	1.02153
		39%	(UK average load)	x	0.72166	0.00027	0.00746	0.72939	0.15494	0.88433
Rigid	>17t	0%		x	0.78075	0.00036	0.00998	0.79109	0.16805	0.95914
		50%		x	0.95214	0.00036	0.00998	0.96248	0.20446	1.16694
		100%		x	1.12353	0.00036	0.00998	1.13387	0.24087	1.37474
		54%	(UK average load)	x	0.96632	0.00036	0.00998	0.97666	0.20747	1.18413
All rigids	UK average	53%		x	0.82475	0.00031	0.00852	0.83358	0.17708	1.01066
Articulated	>3.5-33t	0%		x	0.72374	0.00049	0.00912	0.73335	0.15578	0.88913
		50%		x	0.90468	0.00049	0.00912	0.91429	0.18422	1.10551
		100%		x	1.08562	0.00049	0.00912	1.09523	0.23266	1.32789
		44%	(UK average load)	x	0.88297	0.00049	0.00912	0.89258	0.18961	1.08219
Articulated	>33t	0%		x	0.89872	0.00055	0.01020	0.70947	0.15071	0.86018
		50%		x	0.93163	0.00055	0.01020	0.94238	0.20019	1.14257
		100%		x	1.16454	0.00055	0.01020	1.17529	0.24967	1.42496
		62%	(UK average load)	x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
All artics	UK average	61%		x	0.98753	0.00055	0.01020	0.99828	0.21206	1.21034
ALL HGVs	UK average	57%		x	0.90015	0.00043	0.00930	0.90988	0.19328	1.10316
Total										

Figura 5.39 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting

- o f = valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al **50%** in quanto si è supposto un viaggio di andata a pieno carico ed un viaggio di ritorno scarico.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5t-33t} \text{ [t]}} = 15,07 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- o $\text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5t-33t} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

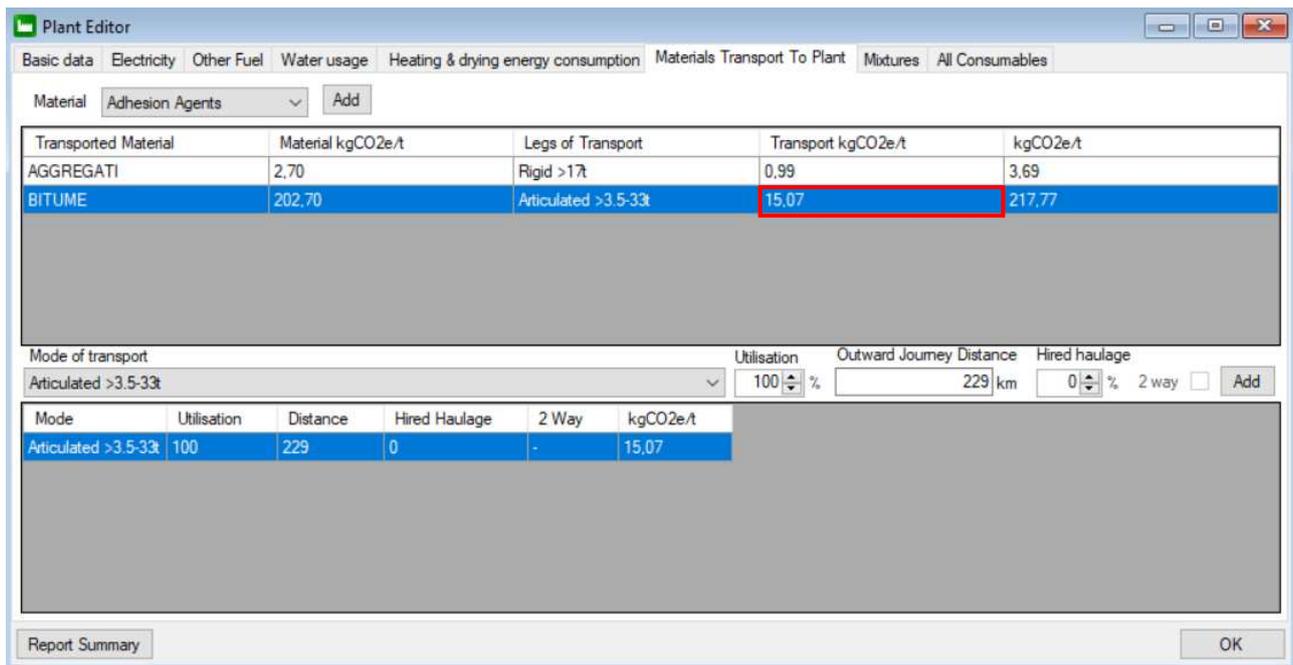


Figura 5.40 – Interfaccia asPECT emissione media

$$\begin{aligned}
 & (emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio} [kg\ CO_2eq/t] \\
 &= \frac{\%aggregati_{miscela}}{100} \cdot (emissione\ media)_{singolo\ viaggio,aggregati} [kg\ CO_2eq/t] \\
 &+ \frac{\%bitume_{miscela}}{100} \cdot (emissione\ media)_{singolo\ viaggio,bitume} [kg\ CO_2eq/t] \\
 &= 0,947 \cdot 0,99 + 0,053 \cdot 15,07 = 1,78\ kg\ CO_2eq/t
 \end{aligned}$$

in cui:

- % *aggregati* = 94,7% come definito all'interno del mix design;
- % *bitume* = 5,3% come definito all'interno del mix design;
- (*emissione media*) *singolo viaggio,aggregati* = 0,99 kg CO₂eq/t, calcolata al passo precedente;
- (*emissione media*) *singolo viaggio,bitume* = 15,07 kg CO₂eq/t, calcolata al passo precedente.

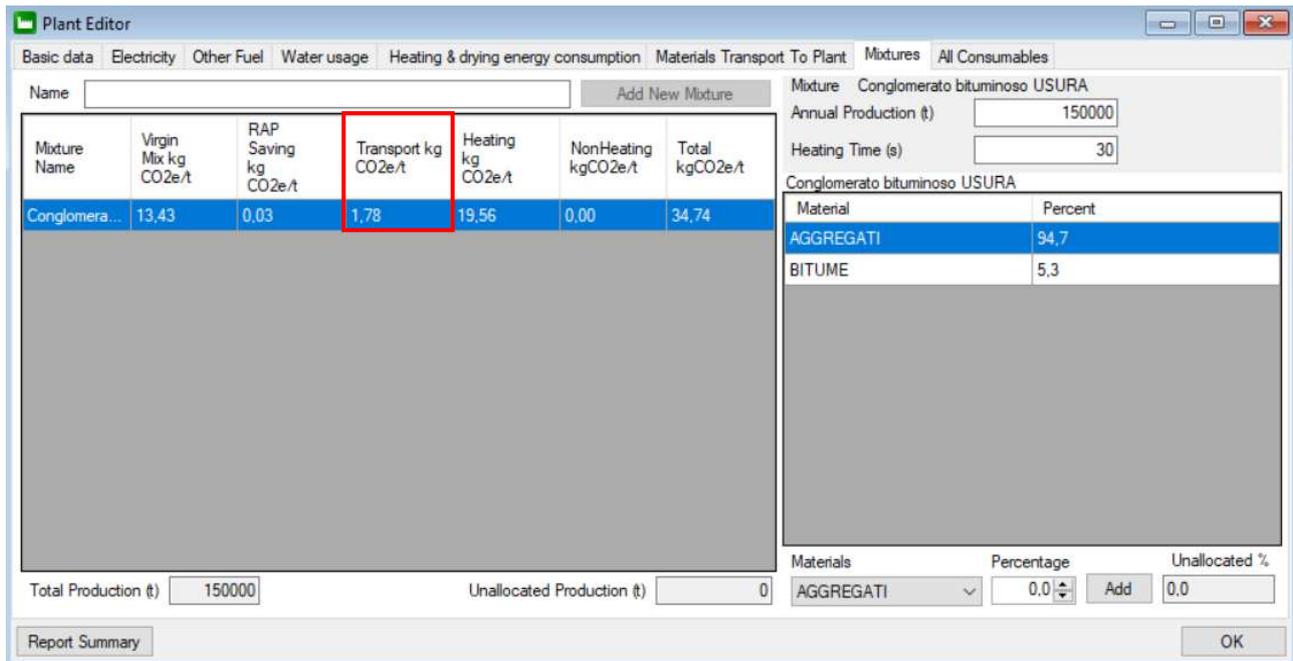


Figura 5.41 – Interfaccia asPECT emissione media

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto impianto}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= \text{massa}_{\text{USURA}} \cdot (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \\
 &= 848 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{USURA}} = 477 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{USURA}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{USURA}} [\text{m}^3]$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,544 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{USURA}} = 188 \text{ m}^3$.
- $(\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio}} = 1,78 \text{ kgCO}_2\text{eq}$, calcolato al passo precedente.

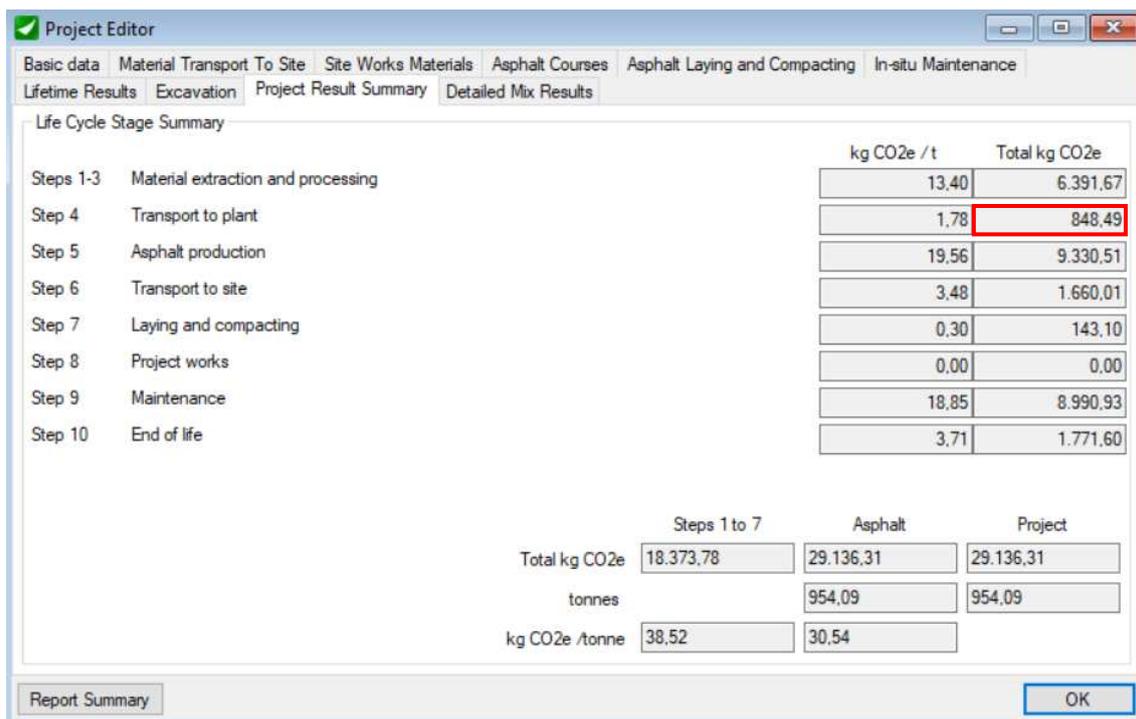


Figura 5.42 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali

Il modello matematico applicato per il calcolo delle emissioni relative alla miscela bituminosa prodotta all'interno dell'impianto si definisce come segue:

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{trasporto\ singolo\ viaggio, conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq] \\
 & = distanza\ percorsa [vkm] \\
 & \cdot \left(\left(Defra\ 50\% \ load\ factor\ rigid > 17t \left[\frac{kg\ CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot Defra\ 0\% \ load\ factor_{rigid > 17t} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right) = 119,4\ kg\ CO_2eq
 \end{aligned}$$

In cui:

- *distanza percorsa [vkm]* = 102,4 vkm, pari al doppio della distanza che intercorre tra l'impianto di produzione ed il sito di costruzione;
- *Defra 50% load factor [Total GHG]* = 1,166 per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;
- *Defra 0% load factor [Total GHG]* = 0,959 per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;
- *f* = 50%, valendo le stesse considerazioni effettuate precedentemente.

$$\begin{aligned}
 & (emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio, conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq/t] \\
 & = \frac{(emissioni)_{singolo\ viaggio, conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq]}{2 \cdot Capacità_{rigid > 17t} [t]} = 3,48\ kg\ CO_2eq/t
 \end{aligned}$$

in cui:

- $Capacità_{rigid>17t} [t] = 34$ t, considerando equivalentemente a quanto riportato in precedenza 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

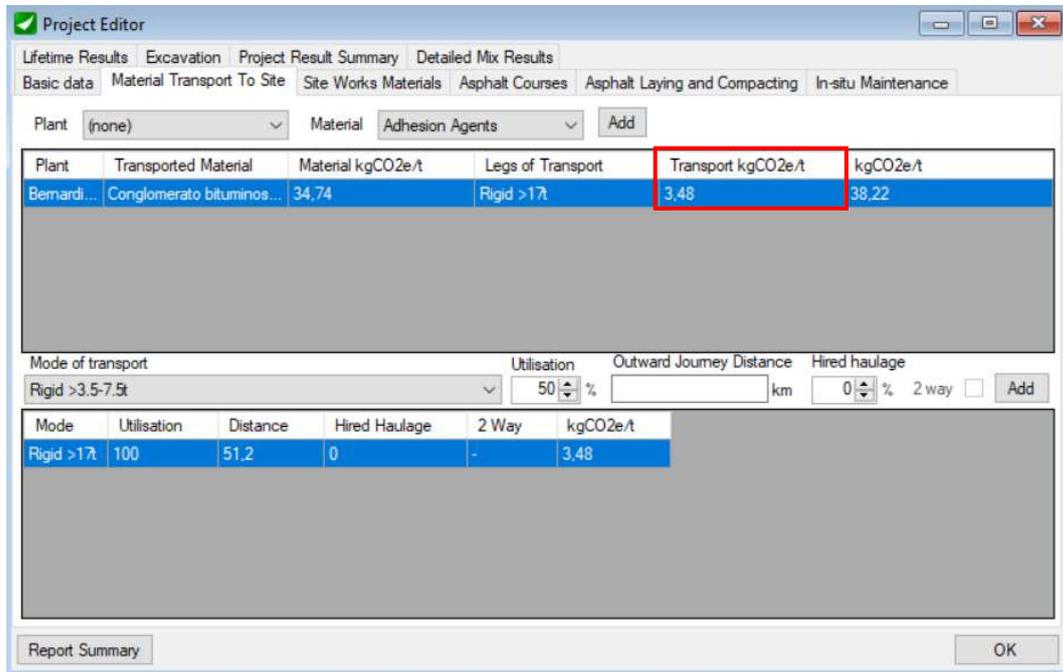


Figura 5.43 – Interfaccia asPECT emissione media

$(emissioni)_{trasporto\ sito\ costruzione} [kg\ CO_2eq]$

$$= massa_{USURA}$$

$$\cdot (emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio, conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq/t]$$

$$= 1660\ kg\ CO_2eq$$

in cui:

- $massa_{USURA} = 477$ t, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$massa_{USURA} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,544\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{USURA} = 188\ m^3$.
- $(emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio, conglomerato\ bituminoso} = 1,78\ kgCO_2eq$, calcolato al passo precedente.

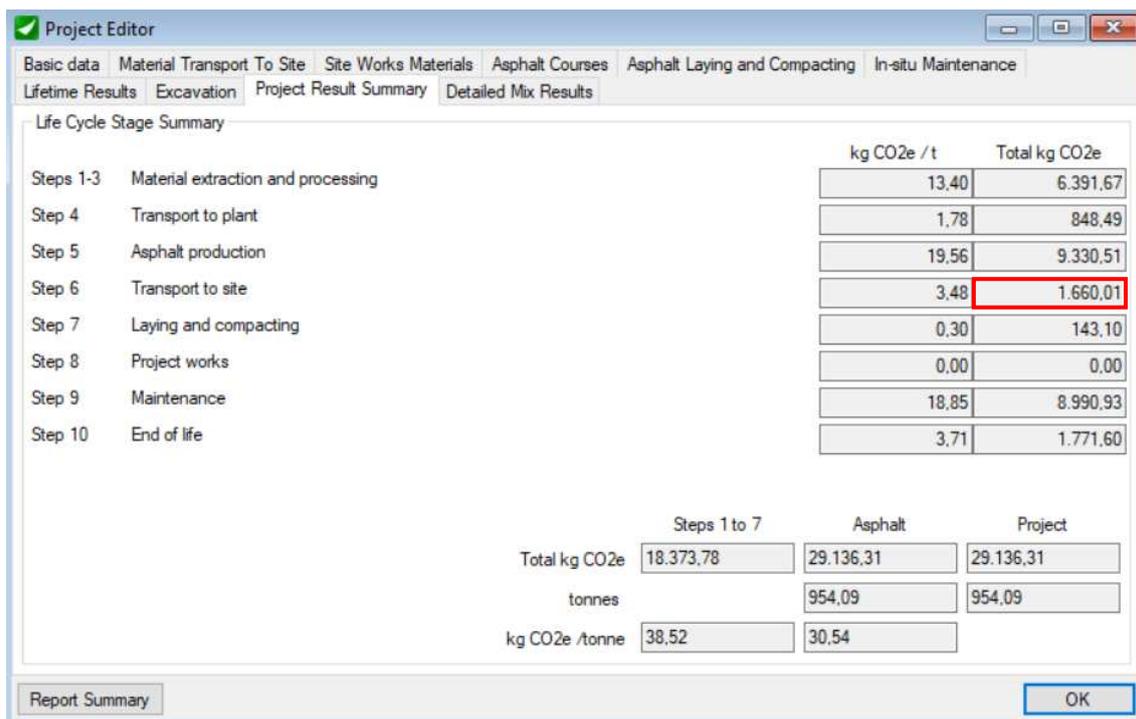


Figura 5.44 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali³⁷

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

I modelli matematici applicati per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all’impianto di produzione seguono quanto riportato precedentemente per l’analisi dello strato di usura e si sviluppano come segue:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, aggregati}} [kg CO_2eq] &= \text{distanza percorsa} [vkm] \\
 &\cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right. \\
 &\left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right) = 33,8 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

in cui:

- *distanza percorsa [vkm] = 29 vkm;*
- *Defra 50% load factor [Total GHG] = 1,166 kgCO₂eq/vkm* per un mezzo rigido con capacità > 17t;
- *Defra 0% load factor [Total GHG] = 0,959 kgCO₂eq/vkm* per un mezzo rigido con capacità > 17t;
- *f = valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al 50%.*

³⁷ Il risultato fornito dall’applicativo sotto la dicitura *Transport to plant* corrisponde al contributo totale di trasporto di aggregati e bitume presso l’impianto di produzione.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]}} = 0,99 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 &= \text{dist. percorsa [vkm]} \\
 &\cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right) \\
 &= 507,9 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{distanza percorsa [vkm]} = 458 \text{ vkm}$;
- $\text{Defra 50\% load factor [Total GHG]} = 1,109 \text{ kgCO}_2\text{eq/vkm}$ per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t;
- $\text{Defra 0\% load factor [Total GHG]} = 0,889 \text{ kgCO}_2\text{eq/vkm}$ per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t;
- $f =$ valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al **50%**.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \text{ [t]}} = 15,07 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= \frac{\% \text{aggregati}_{\text{miscela}}}{100} \cdot (\text{emissione media})_{\text{singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &+ \frac{\% \text{bitume}_{\text{miscela}}}{100} \cdot (\text{emissione media})_{\text{singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= 0,955 \cdot 0,99 + 0,045 \cdot 15,07 = 1,67 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\% \text{aggregati} = 95,5\%$ come definito all'interno del mix design;

- % bitume = 4,5% come definito all'interno del mix design;
- (emissione media) *singolo viaggio, aggregati* = 0,99 kg CO₂eq/t, calcolata al passo precedente;
- (emissione media) *singolo viaggio, bitume* = 15,07 kg CO₂eq/t, calcolata al passo precedente.

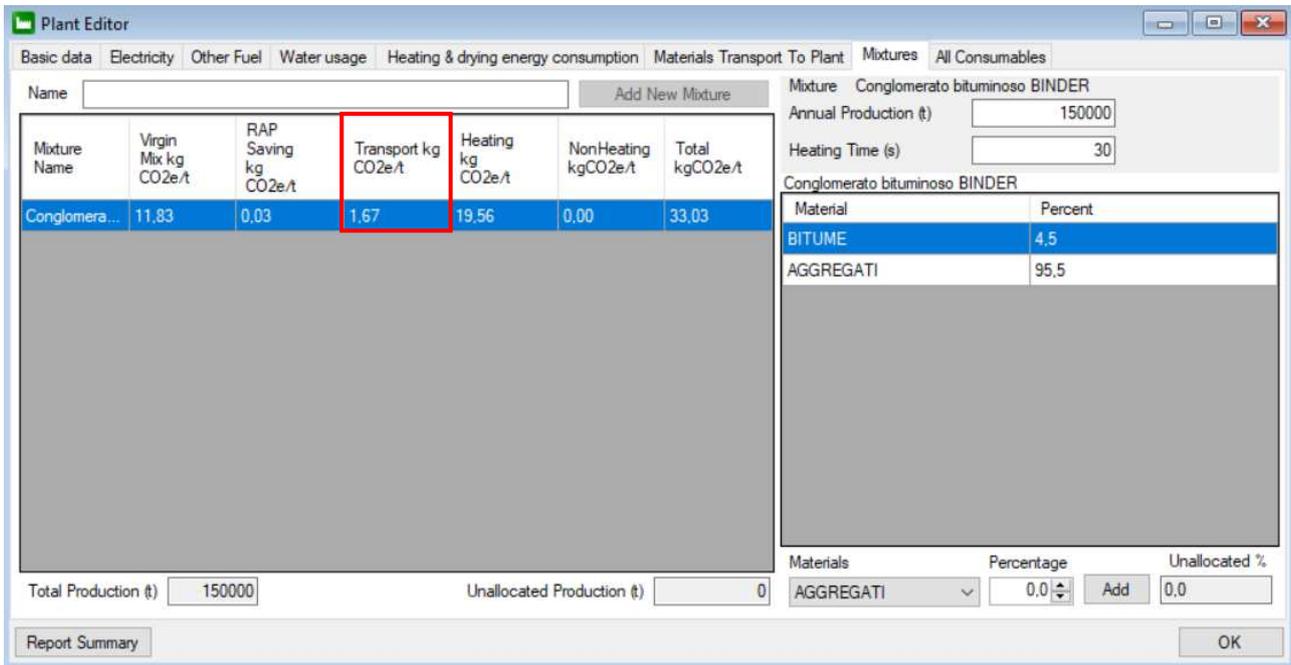


Figura 5.45 – Interfaccia asPECT emissione media

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto impianto}} & [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 &= \text{massa}_{\text{BINDER}} \cdot (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \\
 &= 967 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{BINDER}} = 580 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{BINDER}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} [\text{m}^3]$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,578 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{BINDER}} = 225 \text{ m}^3$.
- (emissione media) *trasporto singolo viaggio* = 1,67 kg CO₂eq, calcolato al passo precedente.

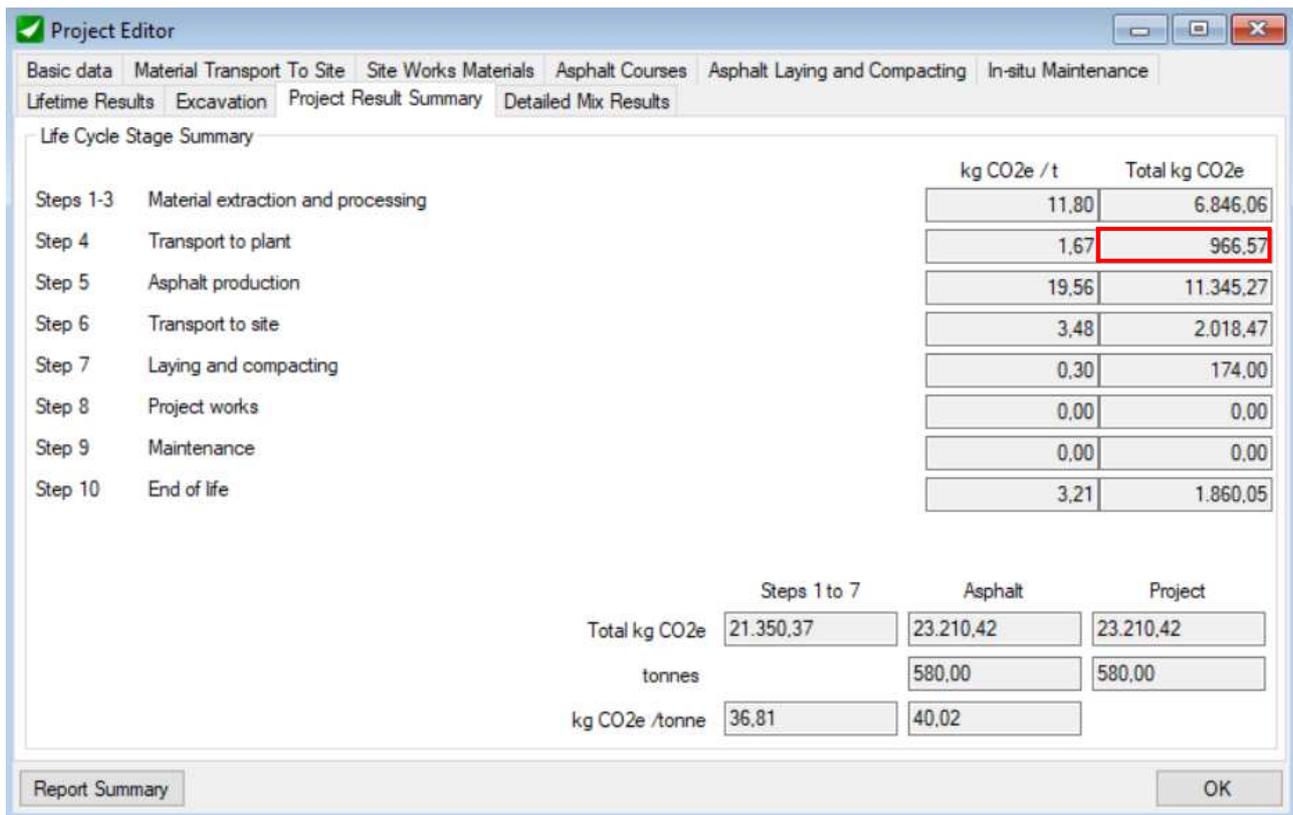


Figura 5.46 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali³⁸

Il modello matematico applicato per il calcolo delle emissioni relative alla miscela bituminosa prodotta all'interno dell'impianto si basa sulle medesime considerazioni effettuate per lo strato di usura, definendosi come segue:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} & [kg CO_2eq] \\
 & = \text{distanza percorsa} [vkm] \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{kg CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right) = 119,4 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

In cui:

- *distanza percorsa* [vkm] = **102,4 vkm**, pari al doppio della distanza che intercorre tra l'impianto di produzione ed il sito di costruzione;
- *Defra 50% load factor* [Total GHG] = **1,166** per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;
- *Defra 0% load factor* [Total GHG] = **0,959** per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;

³⁸ Il risultato fornito dall'applicativo sotto la dicitura *Transport to plant* corrisponde al contributo totale di trasporto di aggregati e bitume presso l'impianto di produzione.

- $f = 50\%$, valendo le stesse considerazioni effettuate precedentemente.

$$\begin{aligned} & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\ &= \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]}} = 3,48 \text{ kg CO}_2\text{eq/t} \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando equivalentemente a quanto riportato in precedenza 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned} & (\text{emissioni})_{\text{trasporto sito costruzione}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\ &= \text{massa}_{\text{BINDER}} \\ &\cdot (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\ &= \mathbf{2018 \text{ kg CO}_2\text{eq}} \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{\text{BINDER}} = 580 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{BINDER}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BINDER}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} = 2,578 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $\text{volume}_{\text{BINDER}} = 225 \text{ m}^3$.
- $(\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} = 1,67 \text{ kgCO}_2\text{eq}$, calcolato al passo precedente.

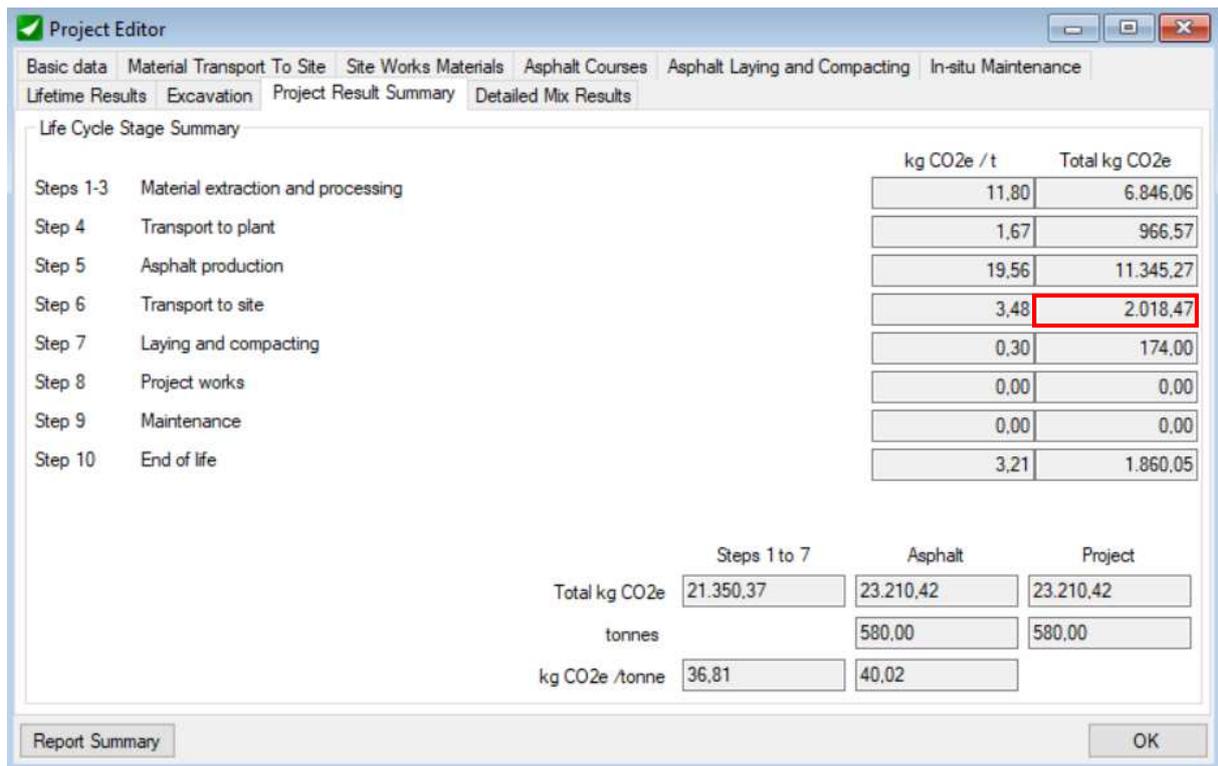


Figura 5.47 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali

STRATO DI BASE

I modelli matematici applicati per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all'impianto di produzione seguono quanto riportato all'interno dell'analisi dello strato di collegamento e si sviluppano come segue:

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{distanza percorsa [vkm]} \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right) = 33,8 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *distanza percorsa [vkm] = 29 vkm;*
- *Defra 50% load factor [Total GHG] = 1,166 kgCO₂eq/vkm* per un mezzo rigido con capacità > 17t;
- *Defra 0% load factor [Total GHG] = 0,959 kgCO₂eq/vkm* per un mezzo rigido con capacità > 17t;
- *f = valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al 50%.*

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]}} = 0,99 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{Capacità}_{\text{rigid}>17\text{t}} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{dist. percorsa [vkm]} \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right) \\
 & = 507,9 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{distanza percorsa [vkm]} = 458 \text{ vkm}$;
- $\text{Defra 50\% load factor [Total GHG]} = 1,109 \text{ kgCO}_2\text{eq/vkm}$ per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t;
- $\text{Defra 0\% load factor [Total GHG]} = 0,889 \text{ kgCO}_2\text{eq/vkm}$ per un mezzo articolato con capacità > 3,5t-33t;
- $f =$ valore medio del fattore di utilizzazione del mezzo di trasporto tra viaggio di andata e viaggio di ritorno, pari al **50%**.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \text{ [t]}} = 15,07 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5\text{t}-33\text{t}} \text{ [t]} = 34 \text{ t}$, considerando 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = \frac{\% \text{aggregati}_{\text{miscela}}}{100} \cdot (\text{emissione media})_{\text{singolo viaggio, aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & + \frac{\% \text{bitume}_{\text{miscela}}}{100} \cdot (\text{emissione media})_{\text{singolo viaggio, bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = 0,955 \cdot 0,99 + 0,045 \cdot 15,07 = 1,67 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\% \text{aggregati} = 95,5\%$ come definito all'interno del mix design;

- % bitume = 4,5% come definito all'interno del mix design;
- $(emissione\ media)_{singolo\ viaggio, aggregati} = 0,99\ kg\ CO_2eq/t$, calcolata al passo precedente;
- $(emissione\ media)_{singolo\ viaggio, bitume} = 15,07\ kg\ CO_2eq/t$, calcolata al passo precedente.

$(emissioni)_{trasporto\ impianto} [kg\ CO_2eq]$

$$= massa_{BASE} \cdot (emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio} [kg\ CO_2eq/t]$$

$$= 3545\ kg\ CO_2eq/t$$

in cui:

- $massa_{BASE} = 2127\ t$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$massa_{BASE} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,578\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BASE} = 825\ m^3$.
- $(emissione\ media)_{trasporto\ singolo\ viaggio} = 1,67\ kgCO_2eq$, calcolato al passo precedente.

Life Cycle Stage	kg CO2e / t	Total kg CO2e
Steps 1-3 Material extraction and processing	11,80	25.106,15
Step 4 Transport to plant	1,67	3.544,66
Step 5 Asphalt production	19,56	41.605,85
Step 6 Transport to site	3,48	7.402,21
Step 7 Laying and compacting	0,30	638,10
Step 8 Project works	0,00	0,00
Step 9 Maintenance	0,00	0,00
Step 10 End of life	3,21	6.821,24

	Steps 1 to 7	Asphalt	Project
Total kg CO2e	78.296,96	85.118,20	85.118,20
tonnes		2.127,00	2.127,00
kg CO2e /tonne	36,81	40,02	

Figura 5.48 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali³⁹

³⁹ Il risultato fornito dall'applicativo sotto la dicitura *Transport to plant* corrisponde al contributo totale di trasporto di aggregati e bitume presso l'impianto di produzione.

Il modello matematico applicato per il calcolo delle emissioni relative alla miscela bituminosa prodotta all'interno dell'impianto si basa anch'esso sulle medesime considerazioni effettuate per lo strato di collegamento, definendosi come segue:

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{distanza percorsa [vkm]} \\
 & \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
 & \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right) = 119,4 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

In cui:

- *distanza percorsa [vkm]* = **102,4 vkm**, pari al doppio della distanza che intercorre tra l'impianto di produzione ed il sito di costruzione;
- *Defra 50% load factor [Total GHG]* = **1,166** per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;
- *Defra 0% load factor [Total GHG]* = **0,959** per un mezzo rigido con capacità > 17t, ugualmente a quanto definito in precedenza;
- *f* = **50%**, valendo le stesse considerazione effettuate precedentemente.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = \frac{(\text{emissioni})_{\text{singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{rigid}>17t} \text{ [t]}} = 3,48 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *Capacità_{rigid>17t} [t]* = 34 t, considerando equivalentemente a quanto riportato in precedenza 17 t per il viaggio di andata e 17 t per il viaggio di ritorno.

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{trasporto sito costruzione}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = \text{massa}_{\text{BASE}} \\
 & \cdot (\text{emissione media})_{\text{trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & = \mathbf{7402 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- *massa_{BASE}* = 2127 t, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{\text{BASE}} = \text{densità volumica}_{\text{CONGLOMERATO BITUMINOSO}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{BASE}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

- ❖ *densità volumica_{CONGLOMERATO BITUMINOSO}* = 2,578 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ *volume_{BASE}* = 825 m³.

- (emissione media) trasporto singolo viaggio, conglomerato bituminoso = 1,67 kgCO₂eq, calcolato al passo precedente.

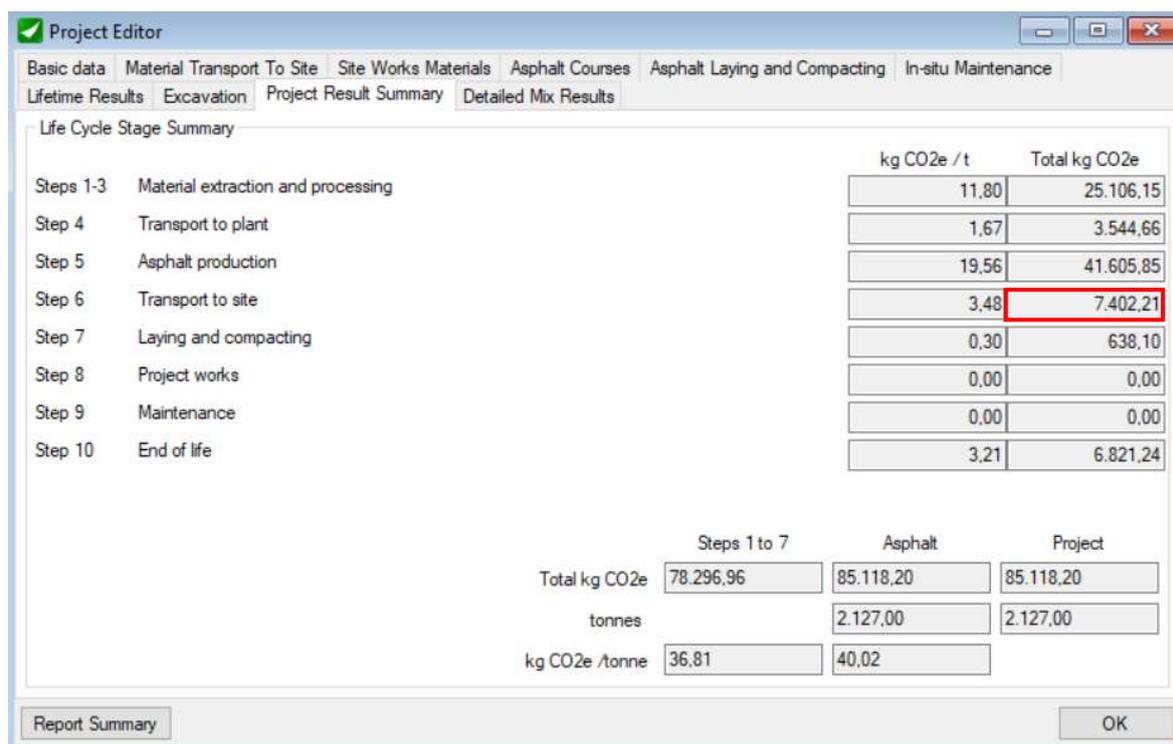


Figura 5.49 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali

Per lo strato di fondazione non è possibile valutare la quantità di emissioni di gas serra in quanto tale applicativo consente solo l'analisi di miscele legate a bitume.

5.2.2.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	804	44	1660	2508

Tabella 5.22 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	923	44	2018	2985

Tabella 5.23 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ASPECT	3385	160	7402	10947

Tabella 5.24 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base

5.2.3 ECORCE M

Le emissioni di gas serra relative al trasporto dei materiali per la produzione delle miscele bituminose (aggregati, bitume) ed il trasporto delle miscele finite dal sito di produzione al sito di costruzione segue un approccio chilometrico, ovvero si ricava a partire da un indicatore unitario fornito direttamente dall'applicativo in questione, che moltiplicato per il relativo valore di veicoli-chilometro fornisce le emissioni in termini di CO₂-equivalente per il trasporto dei materiali relativi allo strato considerato. Di seguito si riporta l'espressione che definisce l'indicatore unitario in questione, che risulta essere il medesimo per ciascuno strato di pavimentazione analizzato, sia che esso sia legato a bitume, sia che esso sia uno strato granulare, come nel caso dello strato di fondazione:

$$GWP [kgCO_2e/km] = \sum_{i=1}^n GWP_i = \sum_{i=1}^n \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt} = 1,1717$$

in cui:

- a_i = assorbimento della radiazione termica dovuta all'incremento della concentrazione del gas i-esimo;
- $c_i(t)$ = concentrazione del gas i-esimo rimanente al tempo t dopo il proprio rilascio;
- T = numero di anni sul quale viene sviluppato l'integrale, assunto pari a 100 anni, il quale corrisponde al ciclo di vita di una molecola di CO₂ in atmosfera.

Si riportano di seguito i passaggi matematici svolti dall'applicativo per la definizione delle emissioni di ciascuno strato di pavimentazione.

STRATO DI USURA

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all'impianto di produzione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] = \frac{M_{aggregati} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{aggregati} [km] + \frac{M_{bitume} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{bitume} [km] = 491\ km + 434\ km = 925\ km$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ impianto\ di\ produzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto dei materiali costituenti la miscela bituminosa di progetto all'impianto di produzione;
- $M_{aggregati}$ = massa degli aggregati trasportati all'impianto di produzione, pari al 94,7% della massa dello strato di usura, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **452 t** e valutata a

partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{AGGREGATI} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3] \cdot \frac{\%agggregati_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,544\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
 - $volume_{USURA} = 188\ m^3$;
 - $\%agggregati_{MIX} = 94,7\ \%$.
- M_{bitume} = massa di bitume trasportato all'impianto di produzione, pari al 5,3% della massa dello strato di usura, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **25 t** e valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3] \cdot \frac{\%bitume_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,544\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
 - $volume_{USURA} = 188\ m^3$;
 - $\%bitume_{MIX} = 5,3\ \%$.
- $Capacità_{mezzo\ trasporto}^{40}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t** sia per il trasporto di aggregati che per il trasporto di bitume;
- $D_{aggregati}$ = distanza percorsa per il trasporto degli aggregati dal sito di estrazione all'impianto di produzione, pari a **14,5 km**;
- D_{bitume} = distanza percorsa per il trasporto del bitume dalla raffineria all'impianto di produzione, pari a **229 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

$$(emissioni)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [kg\ CO_2eq] = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot (vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] = 1084\ kg\ CO_2eq$$

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [km] = \frac{M_{conglomerato\ bituminoso} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8 D_{conglomerato\ bituminoso} [km]$$

$$= 1832\ km$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ sito\ di\ costruzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto della miscela bituminosa costituente lo strato di usura al sito di costruzione;
- $M_{conglomerato\ bituminoso}$ = massa dello strato di usura, pari a **477 t** ed ottenuta come segue:

⁴⁰ L'applicativo considera un'unica tipologia di mezzo per il trasporto dei materiali.

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all'impianto di produzione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] = \frac{M_{aggregati} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{aggregati} [km] + \frac{M_{bitume} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{bitume} [km] = 602\ km + 448\ km = 1050\ km$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ impianto\ di\ produzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto dei materiali costituenti la miscela bituminosa di progetto all'impianto di produzione;
- $M_{aggregati}$ = massa degli aggregati trasportati all'impianto di produzione, pari al 95,5% della massa dello strato di collegamento, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **554 t** e valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{AGGREGATI} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3] \cdot \frac{\%aggregati_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,578\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{BINDER} = 225\ m^3$;
- $\%aggregati_{MIX} = 95,5\ \%$.
- M_{bitume} = massa di bitume trasportato all'impianto di produzione, pari al 4,5% della massa dello strato di collegamento, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **26 t** e valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3] \cdot \frac{\%bitume_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,544\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{BINDER} = 225\ m^3$;
- $\%bitume_{MIX} = 4,5\ \%$.
- $Capacità_{mezzo\ trasporto}^{42}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t** sia per il trasporto di aggregati che per il trasporto di bitume;
- $D_{aggregati}$ = distanza percorsa per il trasporto degli aggregati dal sito di estrazione all'impianto di produzione, pari a **14,5 km**;
- D_{bitume} = distanza percorsa per il trasporto del bitume dalla raffineria all'impianto di produzione, pari a **229 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

⁴² L'applicativo considera un'unica tipologia di mezzo per il trasporto dei materiali.

$$(emissioni)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [kg\ CO_2eq] \\ = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot (vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] = 1231\ kg\ CO_2eq$$

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [km] = \frac{M_{conglomerato\ bituminoso} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{conglomerato\ bituminoso} [km] \\ = 2227\ km$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ sito\ di\ costruzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto della miscela bituminosa costituente lo strato di collegamento al sito di costruzione;
- $M_{conglomerato\ bituminoso}$ = massa dello strato di collegamento, pari a **580 t** ed ottenuta come segue:

$$massa_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \\ = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,578\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;
- ❖ $volume_{BINDER} = 225\ m^3$.
- $Capacità_{mezzo\ trasporto}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t** (si veda la nota 19);
- $D_{conglomerato\ bituminoso}$ = distanza percorsa per il trasporto della miscela bituminosa dall'impianto di produzione al sito di costruzione, pari a **51,2 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

$$(emissioni)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [kg\ CO_2eq] \\ = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot (vkm)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [km] = 2610\ kg\ CO_2eq$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																	
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																																	
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																																	
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																																	
Greenhouse effect																																							
Unit indicator GWP per process																																							
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																																			
4.408E2				4.6641E2																																			
				2.5																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Binder course</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td>5E3</td> <td>5E3</td> <td>5E3</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.39E4</td> <td>1.39E4</td> <td>1.39E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.21E3</td> <td>1.21E3</td> <td>1.21E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Binder course	Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3	Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4
	Total	Layer	Operation																																				
		Binder course	Costruzione																																				
Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3																																				
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4																																				
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2																																				
Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3																																				
Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3																																				
Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4																																				

Figura 5.51 – Emissioni trasporto materiali strato di collegamento⁴³

STRATO DI BASE

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto delle materie prime all'impianto di produzione si sviluppa come segue:

$$\begin{aligned}
 (vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] &= \frac{M_{aggregati} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{aggregati} [km] + \frac{M_{bitume} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \\
 &\cdot 1,8D_{bitume} [km] = 2209km + 644 km = 2853 km
 \end{aligned}$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ impianto\ di\ produzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto dei materiali costituenti la miscela bituminosa di progetto all'impianto di produzione;
- $M_{aggregati}$ = massa degli aggregati trasportati all'impianto di produzione, pari al 95,5% della massa dello strato di base, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **2031 t** e valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{AGGREGATI} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3] \cdot \frac{\%aggregati_{MIX}}{100}$$

⁴³ ECORCE M mostra un risultato di output pari alla somma delle emissioni relative al trasporto dei materiali della fase di produzione e della fase di costruzione. I risultati parziali sono stati ricavati attraverso l'applicazione manuale dei modelli matematici sopra descritti.

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,578\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{BASE} = 825\ m^3$;
- $\%aggregati_{MIX} = 95,5\ \%$.

- M_{bitume} = massa di bitume trasportato all'impianto di produzione, pari al 4,5% della massa dello strato di base, secondo quanto riportato all'interno del mix design, pari a **96 t** e valutata a partire dalla massa della miscela bituminosa, la quale coincide con la massa dello strato considerato, come definito di seguito:

$$massa_{BITUME} = densità\ volumica_{MIX} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3] \cdot \frac{\%bitume_{MIX}}{100}$$

dove:

- $densità\ volumica_{MIX} = 2,544\ t/m^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $volume_{BASE} = 825\ m^3$;
- $\%bitume_{MIX} = 4,5\ \%$.

- $Capacità_{mezzo\ trasporto}^{44}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t** sia per il trasporto di aggregati che per il trasporto di bitume;
- $D_{aggregati}$ = distanza percorsa per il trasporto degli aggregati dal sito di estrazione all'impianto di produzione, pari a **14,5 km**;
- D_{bitume} = distanza percorsa per il trasporto del bitume dalla raffineria all'impianto di produzione, pari a **229 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

(emissioni)_{trasporto impianto di produzione} [kg CO₂eq]

$$= GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot (vkm)_{trasporto\ impianto\ di\ produzione} [km] = \mathbf{4514\ kg\ CO_2eq}$$

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto della miscela bituminosa al sito di costruzione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [km] = \frac{M_{conglomerato\ bituminoso} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8 D_{conglomerato\ bituminoso} [km]$$
$$= 8167\ km$$

in cui:

- $vkm_{trasporto\ sito\ di\ costruzione}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto della miscela bituminosa costituente lo strato di base al sito di costruzione;
- $M_{conglomerato\ bituminoso}$ = massa dello strato di base, pari a **2127 t** ed ottenuta come segue:

$$massa_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,578\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design;

⁴⁴ L'applicativo considera un'unica tipologia di mezzo per il trasporto dei materiali.

$$\diamond \quad \text{volume}_{BASE} = 825 \text{ m}^3.$$

- $Capacità_{mezzo\ trasporto}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t** (si veda la nota 21);
- $D_{conglomerato\ bituminoso}$ = distanza percorsa per il trasporto della miscela bituminosa dall'impianto di produzione al sito di costruzione, pari a **51,2 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

$$(\text{emissioni})_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [kg\ CO_2eq] \\ = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot (vkm)_{trasporto\ sito\ di\ costruzione} [km] = 9569 \text{ kg } CO_2eq$$

	Total	Layer	Operation
		Base course	Costruzione
Asphalt (kg eq.CO2/t)	1.83E4	1.83E4	1.83E4
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	5.1E4	5.1E4	5.1E4
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	6.8E2	6.8E2	6.8E2
Aggregates (kg eq.CO2/t)	4.45E3	4.45E3	4.45E3
Road transport (kg eq.CO2/km)	1.41E4	1.41E4	1.41E4
Total (kg eq.CO2/t)	8.85E4	8.85E4	8.85E4

Figura 5.52 – Emissioni trasporto materiali strato di base⁴⁵

STRATO DI FONDAZIONE

Il modello matematico applicato per la definizione delle emissioni relative al trasporto del misto granulare che costituisce lo strato di fondazione si sviluppa come segue:

$$(vkm)_{trasporto} [km] = \frac{M_{misto\ granulare} [t]}{Capacità_{mezzo\ trasporto} [t]} \cdot 1,8D_{misto\ granulare} [km] = 7484 \text{ km}$$

in cui:

- $vkm_{trasporto}$ = numero di chilometri equivalenti percorsi per il trasporto dei materiali costituenti lo strato in oggetto direttamente al sito di costruzione;

⁴⁵ ECORCE M mostra un risultato di output pari alla somma delle emissioni relative al trasporto dei materiali della fase di produzione e della fase di costruzione. I risultati parziali sono stati ricavati attraverso l'applicazione manuale dei modelli matematici sopra descritti.

- $M_{\text{misto granulare}}$ = massa del misto granulare trasportato al sito di costruzione, pari a **1519 t** e valutata come definito di seguito:

$$\text{massa}_{\text{MISTO GRANULARE}} = \text{densità volumica}_{\text{MISTO GRANULARE}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{volume}_{\text{FONDAZIONE}} [\text{m}^3]$$

dove:

- $\text{densità volumica}_{\text{MIX}} = 2,700 \text{ t/m}^3$, valutata secondo il mix design di progetto;
- $\text{volume}_{\text{FONDAZIONE}} = 563 \text{ m}^3$;
- $\text{Capacità}_{\text{mezzo trasporto}}$ = capacità del mezzo di trasporto a pieno carico, pari a **24 t**;
- $D_{\text{misto granulare}}$ = distanza percorsa per il trasporto del misto granulare dal sito di estrazione al sito di costruzione, pari a **65,3 km**;
- $1,8$ = coefficiente di andata e ritorno assunto dall'applicativo all'interno del modello matematico, assumendo un ritorno a carico vuoto.

$$(\text{emissioni})_{\text{trasporto}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] = \text{GWP} [\text{kg CO}_2\text{eq/km}] \cdot (vkm)_{\text{trasporto}} [\text{km}] = \mathbf{8720 \text{ kg CO}_2\text{eq}}$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																													
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																													
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																													
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																													
Greenhouse effect																																			
Unit indicator GWP per process																																			
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																															
4.408E2				4.6641E2																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Sub-base layer</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.5E3</td> <td>2.5E3</td> <td>2.5E3</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td style="border: 2px solid red;">8.72E3</td> <td>8.72E3</td> <td>8.72E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Sub-base layer	Costruzione	Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)	2.5E3	2.5E3	2.5E3	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3	Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4
	Total	Layer	Operation																																
		Sub-base layer	Costruzione																																
Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)	2.5E3	2.5E3	2.5E3																																
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2																																
Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3																																
Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3																																
Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4																																

Figura 5.53– Emissioni trasporto materiali strato di fondazione

5.2.3.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	575	509	2146	3230

Tabella 5.25 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	706	525	2610	3841

Tabella 5.26 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO ₂ eq)			
	Fase di produzione – Fase di costruzione			
	Trasporto dei materiali			
	Aggregati	Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ECORCE M	2588	1926	9186	13700

Tabella 5.27 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO ₂ eq)	
	Fase di costruzione	
	Trasporto dei materiali	
	Misto granulare	Totale
ECORCE M	8720	8720

Tabella 5.28 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione

5.2.4 Athena Impact Estimator for Highways

Il contributo di emissioni di gas serra relativo al trasporto dei materiali si ricava attraverso la medesima espressione empirica adottata dall'EPA (*United States Environmental Protection Agency*), la cui formulazione ne trova una descrizione accurata all'interno del **Paragrafo 5.1.4** di questo stesso elaborato.

Ugualmente a quanto riferito nel suddetto paragrafo, anche in questo caso per ciascuno strato della pavimentazione flessibile oggetto del presente lavoro, l'applicativo fornisce un dato di output relativo alle emissioni in aria di differenti sostanze, le quali si distinguono in emissioni dovute al trasporto delle materie prime (aggregati, bitume) necessarie alla produzione delle miscele bituminose ed in emissioni relative al trasporto di tali miscele al sito di costruzione⁴⁶.

STRATO DI USURA

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per il trasporto dei materiali che interessano lo strato in oggetto, sia per quanto riguarda la fase di produzione, sia per quanto riguarda la fase di costruzione, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto produzione}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= CO_{2,\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] + 298 \\
 &\cdot N_2O_{\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] = \mathbf{687 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{trasporto produzione}} = 668 \text{ kg};$
- $CH_{4,\text{trasporto produzione}} = 0,75 \text{ kg};$

⁴⁶ Dati reperibili all'interno della scheda "Air Emissions" generata tra gli output dell'applicativo.

- $N_2O_{trasporto\ produzione} = 0,66\text{ g.}$

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{trasporto\ costruzione} [kg\ CO_2eq] \\
 &= CO_{2,trasporto\ costruzione} [kg] + 25 \cdot CH_{4,trasporto\ costruzione} [kg] + 298 \\
 &\cdot N_2O_{trasporto\ costruzione} [kg] = \mathbf{2050\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,trasporto\ costruzione} = 1994\text{ kg};$
- $CH_{4,trasporto\ costruzione} = 2,24\text{ kg};$
- $N_2O_{trasporto\ costruzione} = 1,97\text{ g.}$

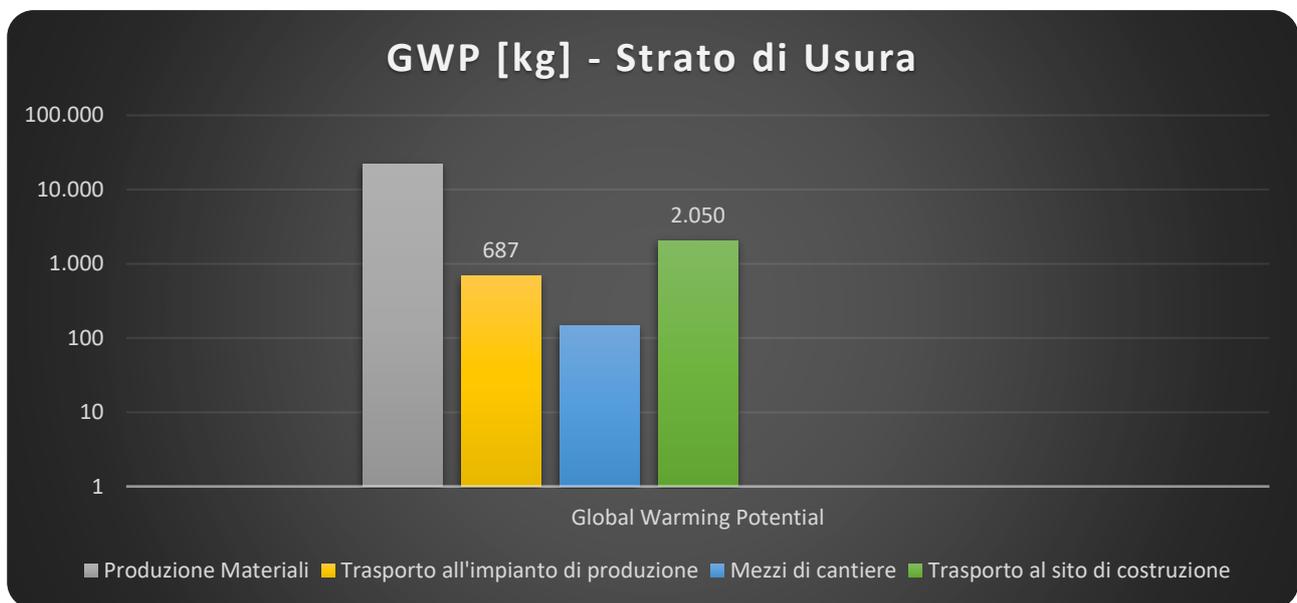


Figura 5.54 – GWP strato di usura (scala logaritmica)

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per il trasporto dei materiali che interessano lo strato in oggetto, sia per quanto riguarda la fase di produzione, sia per quanto riguarda la fase di costruzione, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{trasporto\ produzione} [kg\ CO_2eq] \\
 &= CO_{2,trasporto\ produzione} [kg] + 25 \cdot CH_{4,trasporto\ produzione} [kg] + 298 \\
 &\cdot N_2O_{trasporto\ produzione} [kg] = \mathbf{837\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,trasporto\ produzione} = 814\text{ kg};$
- $CH_{4,trasporto\ produzione} = 0,91\text{ kg};$
- $N_2O_{trasporto\ produzione} = 0,80\text{ g.}$

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto costruzione}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 &= CO_{2,\text{trasporto costruzione}} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{trasporto costruzione}} [\text{kg}] + 298 \\
 &\cdot N_2O_{\text{trasporto costruzione}} [\text{kg}] = \mathbf{2484 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{trasporto costruzione}} = 2416 \text{ kg};$
- $CH_{4,\text{trasporto costruzione}} = 2,71 \text{ kg};$
- $N_2O_{\text{trasporto costruzione}} = 2,39 \text{ g}.$

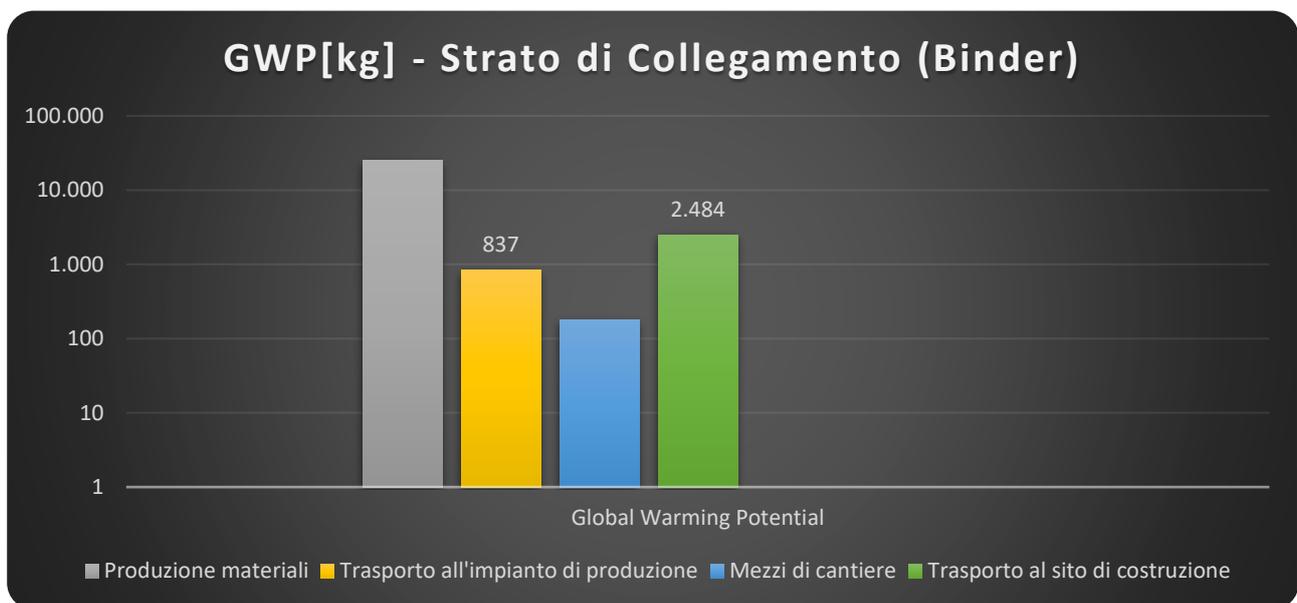


Figura 5.55– GWP strato di collegamento (scala logaritmica)

STRATO DI BASE

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per il trasporto dei materiali che interessano lo strato in oggetto, sia per quanto riguarda la fase di produzione, sia per quanto riguarda la fase di costruzione, con allegato il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{trasporto produzione}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] \\
 &= CO_{2,\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] + 298 \\
 &\cdot N_2O_{\text{trasporto produzione}} [\text{kg}] = \mathbf{3058 \text{ kg CO}_2\text{eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{trasporto produzione}} = 2974 \text{ kg};$
- $CH_{4,\text{trasporto produzione}} = 2,34 \text{ kg};$
- $N_2O_{\text{trasporto produzione}} = 2,94 \text{ g}.$

(emissioni) trasporto costruzione [kg CO₂eq]

$$= CO_{2,trasporto\ costruzione} [kg] + 25 \cdot CH_{4,trasporto\ costruzione} [kg] + 298 \cdot N_2O_{trasporto\ costruzione} [kg] = \mathbf{9002\ kg\ CO_2eq}$$

in cui:

- $CO_{2,trasporto\ costruzione} = 8756\ kg;$
- $CH_{4,trasporto\ costruzione} = 9,82\ kg;$
- $N_2O_{trasporto\ costruzione} = 8,64\ g.$

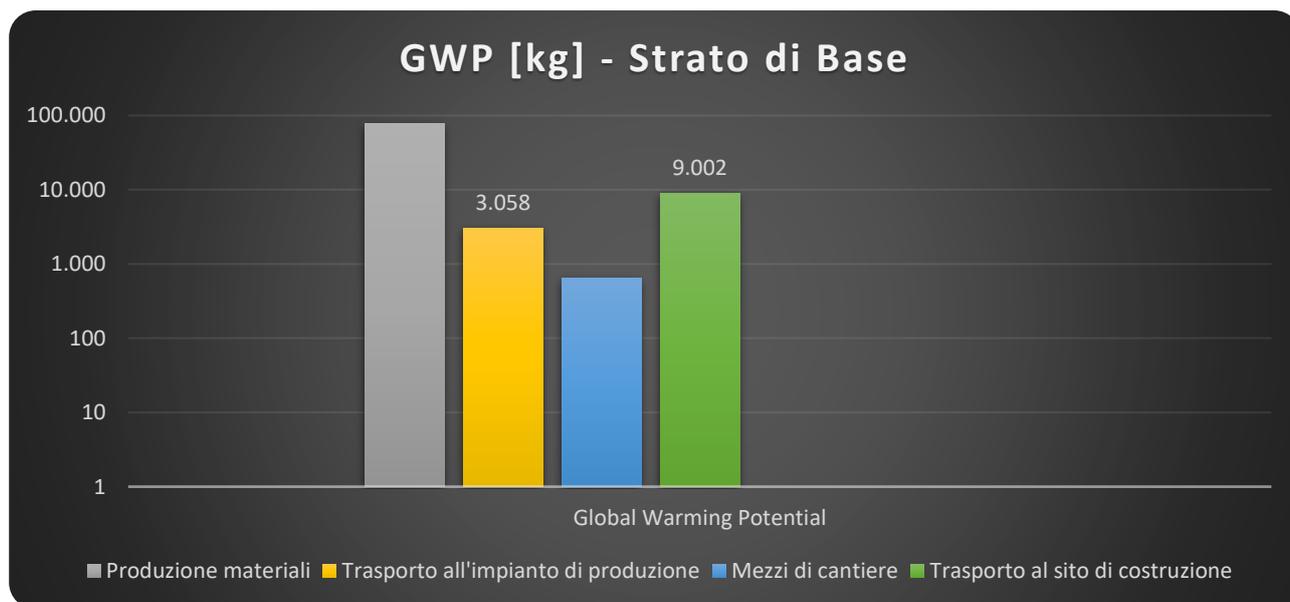


Figura 5.56 – GWP strato di base (scala logaritmica)

STRATO DI FONDAZIONE

Si riporta di seguito lo sviluppo della formula empirica descritta in precedenza per il trasporto dei materiali che interessano lo strato in oggetto, considerando la sola fase di costruzione, in quanto il materiale granulare che lo costituisce viene trasportato direttamente al sito di costruzione. Si allega inoltre, come in precedenza, il grafico di output dei risultati fornito dall'applicativo:

(emissioni) trasporto costruzione [kg CO₂eq]

$$= CO_{2,trasporto\ costruzione} [kg] + 25 \cdot CH_{4,trasporto\ costruzione} [kg] + 298 \cdot N_2O_{trasporto\ costruzione} [kg] = \mathbf{4110\ kg\ CO_2eq}$$

in cui:

- $CO_{2,trasporto\ costruzione} = 8756\ kg;$
- $CH_{4,trasporto\ costruzione} = 9,82\ kg;$
- $N_2O_{trasporto\ costruzione} = 8,64\ g.$

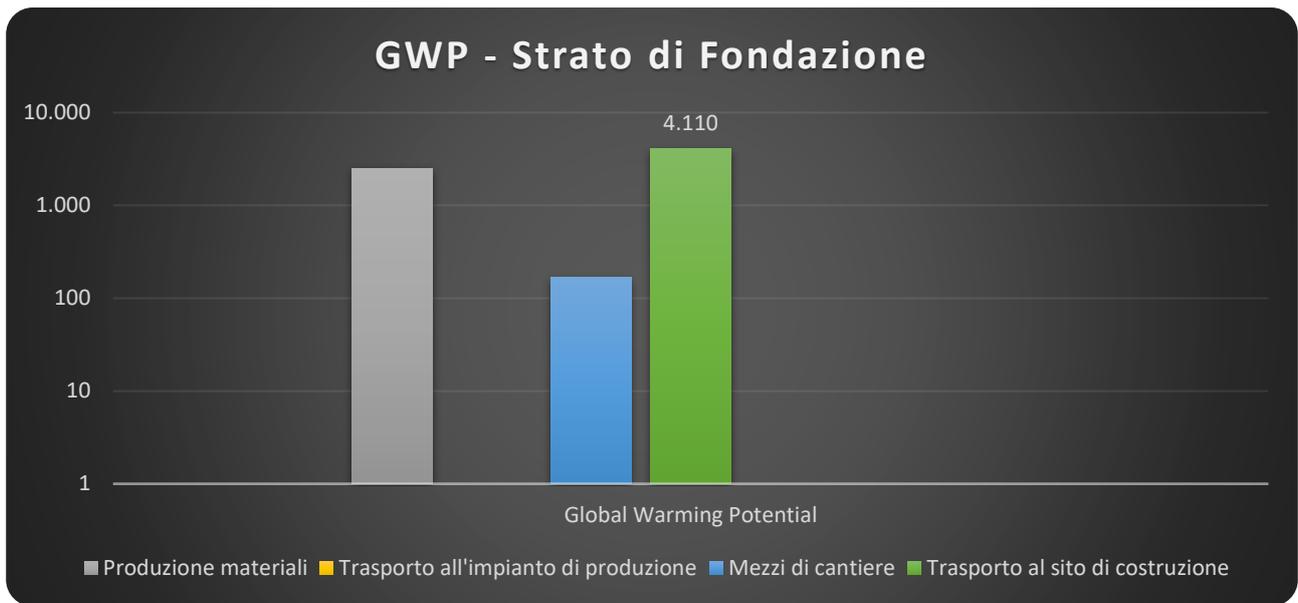


Figura 5.57 – GWP strato di fondazione (scala logaritmica)

5.2.4.1 Riepilogo dei risultati

Si riportano di seguito i risultati precedentemente ricavati, esposti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO ₂ eq)		
	Fase di produzione – Fase di costruzione		
	Trasporto dei materiali		
	Aggregati + Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ATHENA	687	2050	2737

Tabella 5.29 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura

BINDER	GWP (kg CO ₂ eq)		
	Fase di produzione – Fase di costruzione		
	Trasporto dei materiali		
	Aggregati + Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ATHENA	837	2484	3321

Tabella 5.30 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO ₂ eq)		
	Fase di produzione – Fase di costruzione		
	Trasporto dei materiali		
	Aggregati + Bitume	Conglomerato bituminoso	Totale
ATHENA	3058	9002	12060

Tabella 5.31 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO ₂ eq)	
	Fase di costruzione	
	Trasporto dei materiali	
	Misto granulare	Totale
ATHENA	4110	4110

Tabella 5.32 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione

5.3 Mezzi di cantiere

L'ultima sezione di analisi si occupa della descrizione dei modelli matematici alla base della definizione delle emissioni di gas serra relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere per stendere e compattare le miscele bituminose precedentemente prodotte all'interno dell'apposito impianto e trasportate dall'impianto stesso al sito di costruzione. Queste operazioni si collocano all'interno della fase di costruzione e concludono la definizione complessiva delle emissioni relative al ciclo di vita della pavimentazione, in base a quelli che sono i confini di sistema adottati per tale analisi.

Per ciascuno strato della pavimentazione analizzata si utilizzano diversi mezzi di cantiere, i quali hanno specifiche funzioni operative e specifiche caratteristiche, ricavate dal lavoro di (Celauro, et al., 2017). Si riporta di seguito l'elenco dei mezzi di cantiere supposti operare all'interno delle operazioni di stesura e compattazione delle miscele bituminose:

- Grader (livellatrice), modello CAT 12M2, utilizzato per livellare e stendere il materiale in misto granulare costituente lo strato di fondazione della pavimentazione;
- Rullo gommato, modello Bomag BW 226 dh-4, utilizzato per la compattazione del misto granulare dello strato di fondazione della pavimentazione;
- Paver (finitrice), modello Bomag BF 600, utilizzato per la stesura delle miscele bituminose costituenti gli strati legati (usura, binder, base) della pavimentazione;
- Rullo compattatore, modello Bomag BW 203 ad-4, utilizzato per la compattazione delle miscele bituminose costituenti gli strati legati della pavimentazione.

Si riportano nella seguente tabella le caratteristiche tecniche dei mezzi di cantiere sopra descritti:

Mezzo	Modello	Potenza motore [hp ⁴⁷]	Produttività [t/h]	Consumo carburante [l/h]
Grader (livellatrice)	CAT 12M2	176	5992	40,0
Paver (finitrice)	Bomag BF 600	163	1344	43,1
Rullo gommato	Bomag BW 226 dh-4	201	1198	37,6
Rullo compattatore	Bomag BW 203 ad-4	134	448	33,0

Tabella 5.33 – Dati di inventario mezzi di cantiere

5.3.1 PaLATE

Le emissioni di gas serra relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere per la costituzione degli strati della pavimentazione flessibile oggetto del presente studio si ricavano attraverso le seguenti formule:

⁴⁷ hp = cavallo vapore britannico, corrispondente a circa 0,75 kW.

STRATO DI USURA

(emissioni)_{mezzi} [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]} \right. \\
 &\quad \cdot \text{contenuto } CO_{2DIESEL} \left[\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq}}{g \text{ diesel}} \right] + \frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \\
 &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\quad \left. \cdot \text{contenuto } CO_{2DIESEL} \left[\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq}}{g \text{ diesel}} \right] \right) / 1000 \\
 &+ \left(\frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]} \right. \\
 &\quad \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \\
 &\quad + \frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \\
 &\quad \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{\text{shortons}} \right] \\
 &\quad \left. \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{\text{shortons}}{t} \right] \right) / 1000000 / 1000 = 143 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 28 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \\
 &= \mathbf{171 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{USURA} = 477 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{USURA} = \text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} = 2,544 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di usura;
- ❖ $\text{volume}_{USURA} = 188 \text{ m}^3$.
- $\text{produttività}_{FINITRICE} = 1344 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{consumo carburante}_{FINITRICE} = 43,1 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} = 448 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} = 33 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;

Instructions - Equipment						
Design	Materials Production	Construction	Use/ Operation*	Maintenance		
ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Asphalt Paving	Paver (finitrice)	Bomag BF 600	5 163 hp	1.344 tons/h	43,1 l/h	diesel
	Tandem roller (Rullo cb)	Bomag BW 203 ad-4	6 134 hp	448 tons/h	32,7 l/h	diesel
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Wirtgen 2200 CR	800 hp	1.713 tons/h	150,00 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25,1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	Wirtgen WR 2500 S	670 hp	4.800 tons/h	120,0 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1.832 tons/h	37,6 l/h	diesel
Hot In Place Recycling	Heating machine	Wirtgen HM4500	49 hp	256 tons/h	9,1 l/h	diesel
	Asphalt remixer	Wirtgen 4500	295 hp	208 tons/h	55,0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26,1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel

Figura 5.58 – Foglio di calcolo Equipment: dati di inventario mezzi di cantiere per strati legati

- densità $DIESEL = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo:

DIESEL CARBON CONTENT			
REFERENCE: Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996; http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf , Accessed 03/20/02 at 12PM			
Density	7,1 lb/gal	3223,4 g/gal	848,3 g/l
Weight Percent of Carbon Content	87%	0,0032234 Mg/gal	0,000848263 Mg/l
CO ₂ Efficiency Factor	99%		

Figura 5.59 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- contenuto $CO_2Eq_{DIESEL} = 3,16 \text{ g } CO_2Eq/g \text{ diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione:

$$\text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] = \frac{\text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g CO_2}{g C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g C}{g diesel} \right]}{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]} \cdot 100$$

dove:

- $\text{rapporto } CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/g \text{ C};$
- $\text{contenuto carbonio}_{DIESEL} = 0,87 \text{ g C/g diesel};$
- $\text{fattore rendimento } CO_2 = 99\%.$

DIESEL CARBON CONTENT			
REFERENCE: Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996; http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgddocs/b03s03.pdf , Accessed 03/20/02 at 12PM			
Density		7.1 lb/gal	
Weight Percent of Carbon Content		87%	
CO ₂ Efficiency Factor		99%	

Figura 5.60 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- $\text{fattore emissione}_{DIESEL} = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo:

INPUT PaLATE - DIESEL											
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption	
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	
543.404	694.45	2.055.68	2.752	199	44.180	0.00	0.02	0.15	-	327.092	

INPUT PaLATE - ACQUA											
CO2eq	CO	NOX	SO2	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption	
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	
145	1.05	0.34	0.37	0.12	5	0	0	0	-	0	

Figura 5.61 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport

- $\text{fattore di conversione} = 1,102 \text{ shortons/t}$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

$(emissioni)_{mezzi}$ [kg CO₂eq]

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\
 &\cdot contenuto\ CO_{2DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] + \frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{RULLO} \left[\frac{t}{h} \right]} \\
 &\cdot consumo\ carburante_{RULLO} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\left. \cdot contenuto\ CO_{2DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] \right) / 1000 \\
 &+ \left(\frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\
 &\cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot fattore\ conversione \left[\frac{shortons}{t} \right] \\
 &+ \frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{RULLO} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot cons.\ carb.\ RULLO \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\left. \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot fattore\ conversione \left[\frac{shortons}{t} \right] \right) / 1000000 \\
 &/ 1000 = 173\ kg\ CO_2eq + 33\ kg\ CO_2eq = \mathbf{206\ kg\ CO_2eq}
 \end{aligned}$$

in cui:

- $massa_{BINDER} = 580$ t, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$massa_{BINDER} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,578$ t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di usura;
- ❖ $volume_{BINDER} = 225$ m³.
- $produttività_{FINITRICE} = 1344$ t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $consumo\ carburante_{FINITRICE} = 43,1$ l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $produttività_{RULLO\ COMPATTATORE} = 448$ t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE} = 33$ l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $densità_{DIESEL} = 848$ g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato in **Figura 5.54**;
- $contenuto\ CO_{2eq}\ DIESEL = 3,16$ g CO₂eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione (si veda **Figura 5.55**):

$$\begin{aligned} \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] \\ = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g CO_2}{g C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g C}{g diesel} \right] \\ \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 [\%]}{100} \end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/g \text{ C}$;
 - contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
 - fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo (si veda **Figura 5.56**);
 - fattore di conversione = $1,102 \text{ shortons/t}$, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

STRATO DI BASE

$$\begin{aligned} (\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [kg CO_2eq] \\ = \left(\frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\ \cdot \text{contenuto } CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] + \frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{RULLO} \left[\frac{t}{h} \right]} \\ \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \text{contenuto } CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] \left. \right) \\ /1000 \\ + \left(\frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\ \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot \text{fatt. conv.} \left[\frac{shortons}{t} \right] \\ + \frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{RULLO} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\ \cdot \text{fattore emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot \text{fattore conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \left. \right) /1000000 \\ /1000 = 632 \text{ kg } CO_2eq + 120 \text{ kg } CO_2eq = \mathbf{752 \text{ kg } CO_2eq} \end{aligned}$$

in cui:

- $\text{massa}_{BASE} = 2127 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{BASE} = \text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ *densità volumica* CONGLOMERATO BITUMINOSO = 2,578 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di usura;
- ❖ *volume* BASE = 825 m³.
- *produttività* FINITRICE = 1344 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante* FINITRICE = 43,1 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *produttività* RULLO COMPATTATORE = 448 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante* RULLO COMPATTATORE = 33 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *densità* DIESEL = 848 g/l, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato in **Figura 5.54**;
- *contenuto CO₂eq* DIESEL = 3,16 g CO₂eq/g diesel, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione (si veda **Figura 5.55**):

$$\begin{aligned}
 \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\
 = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ } C} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } C}{g \text{ diesel}} \right] \\
 \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 \text{ } [\%]}{100}
 \end{aligned}$$

dove:

- *rapporto* CO₂/C = 3,67 g CO₂/g C;
- *contenuto carbonio* DIESEL = 0,87 g C/g diesel;
- *fattore rendimento* CO₂ = 99%.
- *fattore emissione* DIESEL = 543404 g/shortons, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo (si veda **Figura 5.56**);
- *fattore di conversione* = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

STRATO DI FONDAZIONE

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{mezzi} [kg CO_2eq] \\
 &= \left(\frac{massa_{FONDAZIONE} [t]}{produttività_{GRADER} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{GRADER} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\
 &\quad \cdot contenuto\ CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] + \frac{massa_{FONDAZIONE} [t]}{produttività_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{t}{h} \right]} \\
 &\quad \cdot consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\quad \left. \cdot contenuto\ CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right] \right) / 1000 \\
 &+ \left(\frac{massa_{FONDAZIONE} [t]}{produttività_{GRADER} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{GRADER} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \right. \\
 &\quad \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot fattore\ conversione \left[\frac{shortons}{t} \right] \\
 &\quad + \frac{massa_{FONDAZIONE} [t]}{produttività_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{l}{h} \right] \\
 &\quad \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \\
 &\quad \left. \cdot fattore\ conversione \left[\frac{shortons}{t} \right] \right) / 1000000 / 1000 \\
 &= 144\ kg\ CO_2eq + 28\ kg\ CO_2eq = 172\ kg\ CO_2eq
 \end{aligned}$$

in cui:

- $massa_{FONDAZIONE} = 1567\ t$, pari alla massa dello strato di fondazione ed ottenuta come:

$$massa_{FONDAZIONE} = densità\ volumica_{MISTO\ GRANULARE} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{FONDAZIONE} [m^3]$$

dove:

- $densità\ volumica_{AGGREGATI} = 2,786\ t/m^3$;
- $volume_{FONDAZIONE} = 562\ m^3$.
- $produttività_{GRADER} = 5992\ t/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $consumo\ carburante_{GRADER} = 40\ l/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $produttività_{RULLO\ GOMMATO} = 1198\ t/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO} = 37,6\ l/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;

Instructions - Equipment						
ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Excavation, placing and compaction	GRADER	CAT 12M2	176 hp	5.992 tons/h	40,0 l/h	diesel
	PNEUMATIC ROLLER Vibratory soil compactor	Bomag BW 226 dh-4	201 hp	1.198 tons/h	37,6 l/h	diesel
Tire Recycling	Shredder + Granulator + Classifier + Aspirator System	Wendt Corporation	630 hp	3,00 tons/h	104,73 kWh/ton	105 hp
Glass Recycling	Hopper + Conveyor + Shredder System	Andela GP-05 Pulverizer	10 hp	1,00 tons/h	7,46 kWh/ton	17 hp
HMA Production	asphalt mixer	Fabric Filter-Controlled Batch-		214,00 tons/h		oil

Figura 5.62 – Foglio di calcolo Equipment: dati di inventario mezzi di cantiere per strato granulare

- densità $DIESEL = 848 \text{ g/l}$, come riportato all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* e riportato in **Figura 5.54**;
- contenuto $CO_2eq_{DIESEL} = 3,16 \text{ g } CO_2eq/g \text{ diesel}$, definito all'interno del *Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996* attraverso la seguente espressione (si veda **Figura 5.55**):

$$\begin{aligned}
 & \text{contenuto } CO_2eq_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ } CO_2eq}{g \text{ diesel}} \right] \\
 & = \text{rapporto } \frac{CO_2}{C} \left[\frac{g \text{ } CO_2}{g \text{ C}} \right] \cdot \text{contenuto di carbonio}_{DIESEL} \left[\frac{g \text{ C}}{g \text{ diesel}} \right] \\
 & \cdot \frac{\text{fattore rendimento } CO_2 \text{ [\%]}}{100}
 \end{aligned}$$

dove:

- rapporto $CO_2/C = 3,67 \text{ g } CO_2/g \text{ C}$;
- contenuto carbonio $DIESEL = 0,87 \text{ g C/g diesel}$;
- fattore rendimento $CO_2 = 99\%$.
- fattore emissione $DIESEL = 543404 \text{ g/shortons}$, come definito all'interno della scheda *EMF Transport* del foglio di calcolo dell'applicativo (si veda **Figura 5.56**);
- fattore di conversione = 1,102 shortons/t, applicato per coerenza riguardo le unità di misura utilizzate.

Come si evince dal modello matematico appena esposto, le emissioni relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere sono calcolate tenendo in considerazione sia un fattore di emissione che riflette la percentuale di contenuto di carbonio all'interno del peso del diesel (espresso in $g \text{ } CO_2eq/g \text{ diesel}$), sia un fattore di emissione che riflette l'analisi d'inventario relativa al diesel (espresso in $g/shortons$).

5.3.1.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO₂eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
PALATE	171

Tabella 5.34 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura

BINDER	GWP (kg CO₂eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
PALATE	206

Tabella 5.35 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO₂eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
PALATE	752

Tabella 5.36 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO₂eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
PALATE	172

Tabella 5.37 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione

5.3.2 asPECT

Il contributo di GWP relativo all'utilizzo dei mezzi di cantiere per la costituzione degli strati legati della pavimentazione si ricava calcolando un coefficiente di stesura e compattazione per ciascuno strato costituente la pavimentazione, il quale moltiplicato per la massa di ciascuno strato di pavimentazione fornisce il relativo valore di emissione:

STRATO DI USURA

*coefficiente laying and compacting*_{USURA} [kg CO₂eq/t]⁴⁸

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\ &\quad \cdot \text{fattore conversione}_{DIESEL} \left[\frac{kg CO_2eq}{l} \right] + \frac{\text{massa}_{USURA} [t]}{\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \\ &\quad \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \\ &\quad \left. \cdot \text{fattore conversione}_{DIESEL} \left[\frac{kg CO_2eq}{l} \right] \right) / \text{massa}_{USURA} [t] = 0,19 \text{ kg CO}_2\text{eq/t} \end{aligned}$$

in cui:

- *massa*_{USURA} = 477 t, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{USURA} = \text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ *densità volumica*_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} = 2,544 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di usura;
- ❖ *volume*_{USURA} = 187,5 m³.
- *produttività*_{FINITRICE} = 1344 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante*_{FINITRICE} = 43,1 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *produttività*_{RULLO COMPATTATORE} = 448 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante*_{RULLO COMPATTATORE} = 33 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *fattore di conversione* = 2,687 kgCO₂eq/l, il quale permette passare da una grandezza espressa in litri ad un'emissione espressa in kgCO₂eq, coerentemente con quanto riportato all'interno del *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019*.

(emissioni)_{mezzi} [kg CO₂eq]

$$= \text{coefficiente laying and compacting}_{USURA} [kg CO_2eq/t] \cdot \text{massa}_{USURA} [t]$$

$$= \mathbf{143 \text{ kg CO}_2\text{eq}}$$

⁴⁸ Il valore utilizzato all'interno dell'applicativo è arrotondato alla prima cifra decimale, per cui ai fini dei calcoli si è assunto un valore pari a 0,2 kg CO₂eq/t

Project Editor

Basic data | Material Transport To Site | Site Works Materials | Asphalt Courses | Asphalt Laying and Compacting | In-situ Maintenance

Lifetime Results | Excavation | Project Result Summary | Detailed Mix Results

Life Cycle Stage Summary

		kg CO2e / t	Total kg CO2e
Steps 1-3	Material extraction and processing	13,40	6.391,67
Step 4	Transport to plant	1,78	848,49
Step 5	Asphalt production	19,56	9.330,51
Step 6	Transport to site	3,48	1.660,01
Step 7	Laying and compacting	0,30	143,10
Step 8	Project works	0,00	0,00
Step 9	Maintenance	18,85	8.990,93
Step 10	End of life	3,71	1.771,60

	Steps 1 to 7	Asphalt	Project
Total kg CO2e	18.373,78	29.136,31	29.136,31
tonnes		954,09	954,09
kg CO2e /tonne	38,52	30,54	

Report Summary OK

Figura 5.63 – Risultati in output strato di usura

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

coefficiente laying and compacting $_{BINDER}$ [kg CO₂eq/t]⁴⁹

$$= \left(\frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot fattore\ conversione_{DIESEL} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{l} \right] + \frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{RULLO\ COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot fattore\ conversione_{DIESEL} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{l} \right] \right) / massa_{BINDER} [t] = 0,19\ kg\ CO_2eq/t$$

in cui:

- $massa_{BINDER} = 580$ t, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$massa_{BINDER} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

⁴⁹ Il valore utilizzato all'interno dell'applicativo è arrotondato alla prima cifra decimale, per cui ai fini dei calcoli si è assunto un valore pari a 0,2 kg CO₂eq/t

- ❖ *densità volumica* CONGLOMERATO BITUMINOSO = 2,578 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di collegamento;
- ❖ *volume* BINDER = 225 m³.
- *produttività* FINITRICE = 1344 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante* FINITRICE = 43,1 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *produttività* RULLO COMPATTATORE = 448 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *consumo carburante* RULLO COMPATTATORE = 33 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- *fattore di conversione* = 2,687 kgCO₂eq/l, il quale permette passare da una grandezza espressa in litri ad un'emissione espressa in kgCO₂eq, coerentemente con quanto riportato all'interno del BEIS's *Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019*.

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= \text{coefficiente laying and compacting}_{\text{BINDER}} [\text{kg CO}_2\text{eq/t}] \cdot \text{massa}_{\text{BINDER}} [\text{t}] \\
 &= 174 \text{ kg CO}_2\text{eq}
 \end{aligned}$$

Life Cycle Stage Summary		kg CO2e / t	Total kg CO2e
Steps 1-3	Material extraction and processing	11.80	6.846,06
Step 4	Transport to plant	1,67	966,57
Step 5	Asphalt production	19,56	11.345,27
Step 6	Transport to site	3,48	2.018,47
Step 7	Laying and compacting	0,30	174,00
Step 8	Project works	0,00	0,00
Step 9	Maintenance	0,00	0,00
Step 10	End of life	3,21	1.860,05

	Steps 1 to 7	Asphalt	Project
Total kg CO2e	21.350,37	23.210,42	23.210,42
tonnes		580,00	580,00
kg CO2e /tonne	36,81	40,02	

Figura 5.64 – Risultati in output strato di collegamento (binder)

STRATO DI BASE

coefficiente laying and compacting_{BASE} [kg CO₂eq/t]⁵⁰

$$= \left(\frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{fattore conversione}_{DIESEL} \left[\frac{kg CO_2eq}{l} \right] + \frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{fattore conversione}_{DIESEL} \left[\frac{kg CO_2eq}{l} \right] \right) / \text{massa}_{BASE} [t] = 0,19 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}$$

in cui:

- $\text{massa}_{BASE} = 2127 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{BASE} = \text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ $\text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} = 2,578 \text{ t/m}^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di collegamento;
- ❖ $\text{volume}_{BASE} = 825 \text{ m}^3$.
- $\text{produttività}_{FINITRICE} = 1344 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{consumo carburante}_{FINITRICE} = 43,1 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{produttività}_{RULLO COMPATTATORE} = 448 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{consumo carburante}_{RULLO COMPATTATORE} = 33 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $\text{fattore di conversione} = 2,687 \text{ kgCO}_2\text{eq/l}$, il quale permette passare da una grandezza espressa in litri ad un'emissione espressa in kgCO₂eq, coerentemente con quanto riportato all'interno del *BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019*.

(emissioni)_{mezzi} [kg CO₂eq]

$$= \text{coefficiente laying and compacting}_{BASE} [kg CO_2eq/t] \cdot \text{massa}_{BASE} [t]$$

$$= 427 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

⁵⁰ Il valore utilizzato all'interno dell'applicativo è arrotondato alla prima cifra decimale, per cui ai fini dei calcoli si è assunto un valore pari a 0,2 kg CO₂eq/t

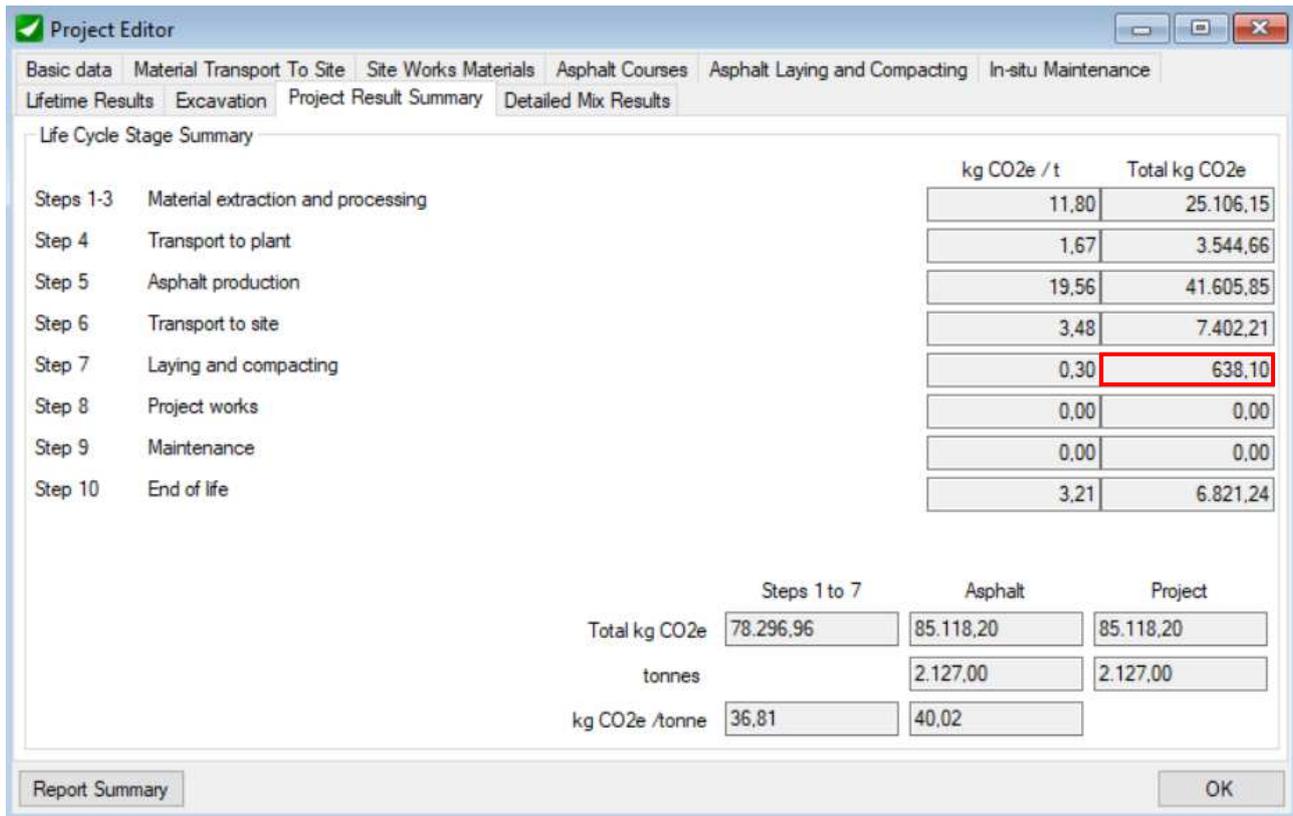


Figura 5.65 – Risultati in output strato di base

Per lo strato di fondazione non è possibile valutare la quantità di emissioni di gas serra in quanto tale applicativo consente solo l'analisi di miscele legate a bitume.

5.3.2.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ASPECT	143

Tabella 5.38 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ASPECT	174

Tabella 5.39 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO2eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ASPECT	638

Tabella 5.40 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base

5.3.3 ECORCE M

Le emissioni di gas serra relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere per la costituzione degli strati della pavimentazione segue un approccio energetico, ovvero si ricava a partire da un indicatore unitario fornito direttamente dal software (espresso in kg CO₂eq/MJ), che moltiplicato per il relativo valore di energia fornisce le emissioni di CO₂-equivalente per il processo considerato. Di seguito si riportano le formule utili ad ottenere il valore dell'indicatore unitario GWP (uguale per tutti gli strati della pavimentazione), il valore di energia utilizzato ed il valore delle emissioni totali:

$$GWP [kgCO_2eq/MJ] = \sum_{i=1}^n GWP_i = \sum_{i=1}^n \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt} = 0,085$$

in cui:

- a_i = assorbimento della radiazione termica dovuta all'incremento della concentrazione del gas i -esimo;
- $c_i(t)$ = concentrazione del gas i -esimo rimanente al tempo t dopo il proprio rilascio;
- T = numero di anni sul quale viene sviluppato l'integrale, assunto pari a 100 anni, il quale corrisponde al ciclo di vita di una molecola di CO₂ in atmosfera.

STRATO DI USURA

$$\begin{aligned} (energia)_{mezzi} [MJ] &= contenuto\ calore_{diesel} [MJ/l] \\ &\cdot \left(tempo\ operazione_{FINITRICE} [h] \cdot consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\ &+ tempo\ operazione_{RULLO\ COMPATTATORE} [h] \\ &\cdot consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \left. \right) = 1789 MJ \end{aligned}$$

in cui:

- $contenuto\ calore_{diesel} = 35,7 MJ/l$;
- $tempo\ operazione_{FINITRICE} = 0,35 h$, ottenuto come:

$$tempo\ operazione_{FINITRICE} [h] = \frac{massa_{USURA} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

dove:

- $massa_{USURA} = 477 t$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come segue:

$$massa_{USURA} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{USURA} [m^3]$$

dove:

- ❖ $densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,544 t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di usura;
- ❖ $volume_{USURA} = 187,5 m^3$.

- $produttività_{FINITRICE} = 1344 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- $consumo \text{ carburante}_{FINITRICE} = 43,1 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**;
- $tempo \text{ operazione}_{RULLO \text{ COMPATTATORE}} = 1,06 \text{ h}$, ottenuto come:

$$tempo \text{ operazione}_{RULLO \text{ COMPATTATORE}} [h] = \frac{massa_{USURA} [t]}{produttività_{RULLO \text{ COMPATTATORE}} [\frac{t}{h}]}$$

dove:

- $massa_{USURA} = 477 \text{ t}$, pari alla massa dello strato di usura ed ottenuta come al passo precedente;
- $produttività_{RULLO \text{ COMPATTATORE}} = 448 \text{ t/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- $consumo \text{ carburante}_{RULLO \text{ COMPATTATORE}} = 33 \text{ l/h}$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input: "Usura"	
Operation name or year:	Costruzione				
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Wearing course	Usura	5.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation		Laying			
Employed equipments					
	Type of equipment	Brand / Model	Operating time (h)	Fuel (L/h)	
✘ Suppress the line	Compactor	Bomag BW 203 ad-4	1.06	32.7	
✘ Suppress the line	Paver	Bomag BF 600	0.35	43.1	
Add an equipment					
Confirm layer					

Figura 5.66 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario

$$(emissioni)_{mezzi} [kg \text{ CO}_2eq] = GWP [kg \text{ CO}_2eq/MJ] \cdot energia_{mezzi} [MJ] = 151 \text{ kg CO}_2eq$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																																
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																																
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																																
Greenhouse effect																																						
Unit indicator GWP per process																																						
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																																		
4.408E2				4.6641E2																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Wearing course</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td>4.84E3</td> <td>4.84E3</td> <td>4.84E3</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.14E4</td> <td>1.14E4</td> <td>1.14E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.51E2</td> <td>1.51E2</td> <td>1.51E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>9.9E2</td> <td>9.9E2</td> <td>9.9E2</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>3.23E3</td> <td>3.23E3</td> <td>3.23E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.06E4</td> <td>2.06E4</td> <td>2.06E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation		Wearing course	Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	4.84E3	4.84E3	4.84E3	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.14E4	1.14E4	1.14E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.51E2	1.51E2	1.51E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	9.9E2	9.9E2	9.9E2	Road transport (kg eq.CO2/km)	3.23E3	3.23E3	3.23E3	Total (kg eq.CO2/t)	2.06E4	2.06E4	2.06E4
	Total	Layer	Operation																																			
		Wearing course	Costruzione																																			
Asphalt (kg eq.CO2/t)	4.84E3	4.84E3	4.84E3																																			
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.14E4	1.14E4	1.14E4																																			
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.51E2	1.51E2	1.51E2																																			
Aggregates (kg eq.CO2/t)	9.9E2	9.9E2	9.9E2																																			
Road transport (kg eq.CO2/km)	3.23E3	3.23E3	3.23E3																																			
Total (kg eq.CO2/t)	2.06E4	2.06E4	2.06E4																																			

Figura 5.67 – Risultati in output strato di usura

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

$$\begin{aligned}
 (energia)_{mezzi} [MJ] &= contenuto\ calore_{diesel} \left[\frac{MJ}{l} \right] \\
 &\cdot \left(tempo\ operazione_{FINITRICE} [h] \cdot consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 &\left. + tempo\ operazione_{RULLO} [h] \cdot consumo\ carburante_{RULLO} \left[\frac{l}{h} \right] \right) = 2183 MJ
 \end{aligned}$$

in cui:

- contenuto calore_{diesel} = 35,7 MJ/l;
- tempo operazione_{FINITRICE} = 0,43 h, ottenuto come:

$$tempo\ operazione_{FINITRICE} [h] = \frac{massa_{BINDER} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

dove:

- massa_{BINDER} = 580 t, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come segue:

$$massa_{BINDER} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{BINDER} [m^3]$$

dove:

- ❖ *densità volumica* CONGLOMERATO BITUMINOSO = 2,578 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di collegamento;
- ❖ *volume* BINDER = 225 m³.
 - *produttività* FINITRICE = 1344 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* FINITRICE = 43,1 l/h;
- *tempo operazione* RULLO COMPATTATORE = 1,29 h, ottenuto come:

$$\text{tempo operazione}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} [h] = \frac{\text{massa}_{\text{BINDER}} [t]}{\text{produttività}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} \left[\frac{t}{h}\right]}$$

dove:

- *massa* BINDER = 580 t, pari alla massa dello strato di collegamento ed ottenuta come al passo precedente;
- *produttività* RULLO COMPATTATORE = 448 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* RULLO COMPATTATORE = 33 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input: "Binder"	
Operation name or year:	Costruzione				
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m ²)	Deconstruction	Type of material
Binder course	Binder	6.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation Laying					
Employed equipments					
	Type of equipment	Brand / Model	Operating time (h)	Fuel (L/h)	
✘ Suppress the line	Compactor	Bomag BW 203 ad-4	1.29	32.7	
✘ Suppress the line	Paver	Bomag BF 600	0.43	43.1	
Add an equipment					
Confirm layer					

Figura 5.68 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario

$$(\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [kg CO_2eq] = GWP [kg CO_2eq/MJ] \cdot \text{energia}_{\text{mezzi}} [MJ] = 185 kg CO_2eq$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																	
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																																	
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																																	
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																																	
Greenhouse effect																																							
Unit indicator GWP per process																																							
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																																			
4.408E2				4.6641E2																																			
				2.59																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Binder course</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td>5E3</td> <td>5E3</td> <td>5E3</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.39E4</td> <td>1.39E4</td> <td>1.39E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> <td>1.85E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.21E3</td> <td>1.21E3</td> <td>1.21E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> <td>3.84E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> <td>2.41E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Binder course	Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3	Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4
	Total	Layer	Operation																																				
		Binder course	Costruzione																																				
Asphalt (kg eq.CO2/t)	5E3	5E3	5E3																																				
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	1.39E4	1.39E4	1.39E4																																				
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.85E2	1.85E2	1.85E2																																				
Aggregates (kg eq.CO2/t)	1.21E3	1.21E3	1.21E3																																				
Road transport (kg eq.CO2/km)	3.84E3	3.84E3	3.84E3																																				
Total (kg eq.CO2/t)	2.41E4	2.41E4	2.41E4																																				

Figura 5.69 – Risultati in output strato di collegamento (binder)

STRATO DI BASE

$(energia)_{mezzi} [MJ]$

$$\begin{aligned}
 &= \text{contenuto di calore}_{diesel} \left[\frac{MJ}{l} \right] \\
 &\cdot \left(\text{tempo di operazione}_{FINITRICE} [h] \cdot \text{consumo carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 &\left. + \text{tempo di operazione}_{RULLO} [h] \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO} \left[\frac{l}{h} \right] \right) = 8033 MJ
 \end{aligned}$$

in cui:

- contenuto calore $_{diesel} = 35,7 MJ/l$;
- tempo operazione $_{FINITRICE} = 1,58 h$, ottenuto come:

$$\text{tempo operazione}_{FINITRICE} [h] = \frac{\text{massa}_{BASE} [t]}{\text{produttività}_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

dove:

- $massa_{BASE} = 2127 t$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$\text{massa}_{BASE} = \text{densità volumica}_{CONGLOMERATO BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot \text{volume}_{BASE} [m^3]$$

dove:

- ❖ *densità volumica* CONGLOMERATO BITUMINOSO = 2,578 t/m³, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di collegamento;
- ❖ *volume* BASE = 825 m³.
 - *produttività* FINITRICE = 1344 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* FINITRICE = 43,1 l/h;
- *tempo operazione* RULLO COMPATTATORE = 4,75 h, ottenuto come:

$$\text{tempo operazione}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} [h] = \frac{\text{massa}_{\text{BASE}} [t]}{\text{produttività}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} \left[\frac{t}{h}\right]}$$

dove:

- *massa* BASE = 2127 t, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come al passo precedente;
- *produttività* RULLO COMPATTATORE = 448 t/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* RULLO COMPATTATORE = 33 l/h, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.

Information	Layers definition	Case study specification	Results	Data input : "Base"	
Operation name or year:	Costruzione				
Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m ²)	Deconstruction	Type of material
Base course	Base	22.0	3750.0	false	Asphalt material
Asphalt material formulation Laying					
Employed equipments					
	Type of equipment	Brand / Model	Operating time (h)	Fuel (L/h)	
✘ Suppress the line	Compactor	Bomag BW 203 dh-4	4.75	32.7	
✘ Suppress the line	Paver	Bomag BF 600	1.58	43.1	
Add an equipment					
Confirm layer					

Figura 5.70 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario

$$(\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [kg CO_2eq] = GWP [kg CO_2eq/MJ] \cdot \text{energia}_{\text{mezzi}} [MJ] = 680 kg CO_2eq$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																																	
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																																	
Chronic toxicity		Inventory		Greenhouse effect																																			
Hypothesis		Reference		Materials		Energy																																	
Water																																							
Greenhouse effect																																							
Unit indicator GWP per process																																							
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																																			
4.408E2				4.6641E2																																			
				2.59																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Base course</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Asphalt (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.83E4</td> <td>1.83E4</td> <td>1.83E4</td> </tr> <tr> <td>Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)</td> <td>5.1E4</td> <td>5.1E4</td> <td>5.1E4</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>6.8E2</td> <td>6.8E2</td> <td>6.8E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>4.45E3</td> <td>4.45E3</td> <td>4.45E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>1.41E4</td> <td>1.41E4</td> <td>1.41E4</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>8.85E4</td> <td>8.85E4</td> <td>8.85E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Base course	Costruzione	Asphalt (kg eq.CO2/t)	1.83E4	1.83E4	1.83E4	Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	5.1E4	5.1E4	5.1E4	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	6.8E2	6.8E2	6.8E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	4.45E3	4.45E3	4.45E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	1.41E4	1.41E4	1.41E4	Total (kg eq.CO2/t)	8.85E4	8.85E4	8.85E4
	Total	Layer	Operation																																				
		Base course	Costruzione																																				
Asphalt (kg eq.CO2/t)	1.83E4	1.83E4	1.83E4																																				
Hot-mix asphalt plant using gas fuel oil (kg eq.CO2/t)	5.1E4	5.1E4	5.1E4																																				
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	6.8E2	6.8E2	6.8E2																																				
Aggregates (kg eq.CO2/t)	4.45E3	4.45E3	4.45E3																																				
Road transport (kg eq.CO2/km)	1.41E4	1.41E4	1.41E4																																				
Total (kg eq.CO2/t)	8.85E4	8.85E4	8.85E4																																				

Figura 5.71 – Risultati in output strato di base

STRATO DI FONDAZIONE

$(energia)_{mezzi} [MJ]$

$$= contenuto\ di\ calore_{diesel} \left[\frac{MJ}{l} \right]$$

$$\cdot \left(tempo\ di\ operazione_{GRADER} [h] \cdot consumo\ carburante_{GRADER} \left[\frac{l}{h} \right] \right)$$

$$+ tempo\ di\ operazione_{RULLO\ GOMMATO} [h] \cdot consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{l}{h} \right]$$

$$= 2076 MJ$$

in cui:

- contenuto calore $_{diesel} = 35,7 MJ/l$;
- tempo operazione $_{GRADER} = 0,25 h$, ottenuto come:

$$tempo\ operazione_{GRADER} [h] = \frac{massa_{FONDAZIONE} [t]}{produttività_{GRADER} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

dove:

- $massa_{FONDAZIONE} = 1567 t$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come segue:

$$massa_{FONDAZIONE} = densità\ volumica_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot volume_{FONDAZIONE} [m^3]$$

dove:

- ❖ *densità volumica* $_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO} = 2,786\ t/m^3$, secondo quanto assunto all'interno del mix design per la miscela relativa allo strato di collegamento;
- ❖ *volume* $_{FONDAZIONE} = 562\ m^3$.
 - *produttività* $_{GRADER} = 5992\ t/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* $_{GRADER} = 40\ l/h$;
- *tempo operazione* $_{RULLO\ GOMMATO} = 1,27\ h$, ottenuto come:

$$tempo\ operazione_{RULLO\ GOMMATO}\ [h] = \frac{massa_{FONDAZIONE}\ [t]}{produttività_{RULLO\ GOMMATO}\ [\frac{t}{h}]}$$

dove:

- *massa* $_{FONDAZIONE} = 1567\ t$, pari alla massa dello strato di base ed ottenuta come al passo precedente;
- *produttività* $_{RULLO\ GOMMATO} = 1198\ t/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.
- *consumo carburante* $_{RULLO\ COMPATTATORE} = 37,6\ l/h$, come riportato all'interno della **Tabella 5.32**.

The screenshot shows the 'Data input: Fondazione' tab in the ECORCE M software. It contains the following information:

Operation name or year: **Costruzione**

Type of layer	Name of the material	Thickness(cm)	Surface (m²)	Deconstruction	Type of material
Sub-base layer	Fondazione	15.0	3750.0	false	Bank-run gravel

Bank-run gravel formulation: **Laying**

Employed equipments:

Type of equipment	Brand / Model	Operating time (h)	Fuel (L/h)
✘ Suppress the line Compactor	Bomag BW 226 dh-4	1.27	37.6
✘ Suppress the line Grader	CAT 12M2	0.25	40.0

Buttons: **Add an equipment**, **Confirm layer**

Figura 5.72 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario

$$(emissioni)_{mezzi}\ [kg\ CO_2eq] = GWP\ [kg\ CO_2eq/MJ] \cdot energia_{mezzi}\ [MJ] = 176\ kg$$

Information		Layers definition		Case study specification		Results																													
Acidification		Eutrophication		O3 Photochemical		Ecotoxicity																													
Chronic toxicity		Inventory		Hypothesis		Reference																													
Materials		Energy		Water		Greenhouse effect																													
Greenhouse effect																																			
Unit indicator GWP per process																																			
Acid (kg eq.CO2/t)				Steel (kg eq.CO2/t)																															
4.408E2				4.6641E2																															
				2.55																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Layer</th> <th>Operation</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Sub-base layer</th> <th>Costruzione</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)</td> <td>2.5E3</td> <td>2.5E3</td> <td>2.5E3</td> </tr> <tr> <td>Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> <td>1.76E2</td> </tr> <tr> <td>Aggregates (kg eq.CO2/t)</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> <td>3.33E3</td> </tr> <tr> <td>Road transport (kg eq.CO2/km)</td> <td>8.72E3</td> <td>8.72E3</td> <td>8.72E3</td> </tr> <tr> <td>Total (kg eq.CO2/t)</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> <td>1.47E4</td> </tr> </tbody> </table>									Total	Layer	Operation			Sub-base layer	Costruzione	Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)	2.5E3	2.5E3	2.5E3	Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2	Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3	Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3	Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4
	Total	Layer	Operation																																
		Sub-base layer	Costruzione																																
Stabilisation plant (kg eq.CO2/t)	2.5E3	2.5E3	2.5E3																																
Construction equipment (kg eq.CO2/MJ)	1.76E2	1.76E2	1.76E2																																
Aggregates (kg eq.CO2/t)	3.33E3	3.33E3	3.33E3																																
Road transport (kg eq.CO2/km)	8.72E3	8.72E3	8.72E3																																
Total (kg eq.CO2/t)	1.47E4	1.47E4	1.47E4																																

Figura 5.73 – Risultati in output strato di fondazione

5.3.3.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO2eq)	
	Fase di costruzione	
	Mezzi di cantiere	
ECORCE M	151	

Tabella 5.41 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura

BINDER	GWP (kg CO2eq)	
	Fase di costruzione	
	Mezzi di cantiere	
ECORCE M	185	

Tabella 5.42 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO2eq)	
	Fase di costruzione	
	Mezzi di cantiere	
ECORCE M	680	

Tabella 5.43 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO2eq)	
	Fase di costruzione	
	Mezzi di cantiere	
ECORCE M	176	

Tabella 5.44 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione

5.3.4 Athena Impact Estimator for Highways

Il contributo di emissioni di gas serra relativo al trasporto dei materiali si ricava attraverso la medesima espressione empirica adottata dall'EPA (*United States Environmental Protection Agency*), la cui formulazione ne trova una descrizione accurata all'interno del **Paragrafo 5.1.4** di questo stesso elaborato.

Uguualmente a quanto riferito nel suddetto paragrafo, anche in questo caso per ciascuno strato della pavimentazione flessibile oggetto del presente lavoro, l'applicativo fornisce un dato di output relativo alle emissioni in aria di differenti sostanze⁵¹.

STRATO DI USURA

$$\begin{aligned} (\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= CO_{2,\text{mezzi}} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{mezzi}} [\text{kg}] + 298 \cdot N_2O_{\text{mezzi}} [\text{kg}] \\ &= 145 \text{ kg CO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{mezzi}} = 142 \text{ kg}$;
- $CH_{4,\text{mezzi}} = 0,16 \text{ kg}$;
- $N_2O_{\text{mezzi}} = 0,14 \text{ g}$.

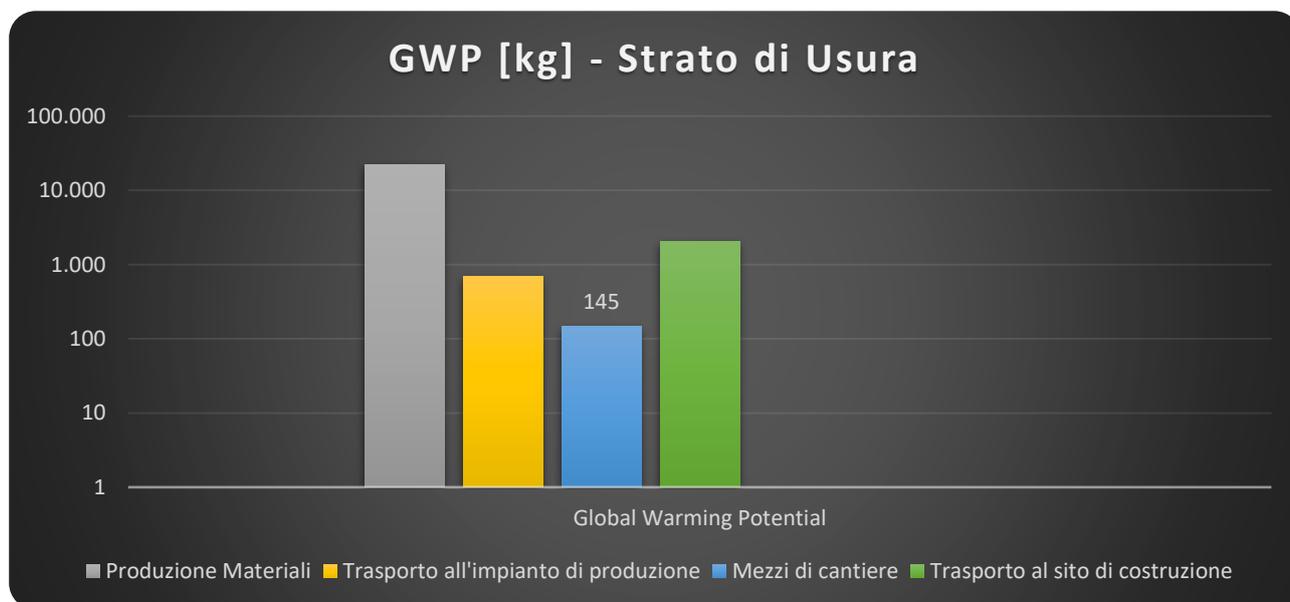


Figura 5.74 – GWP strato di usura (scala logaritmica)

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

$$\begin{aligned} (\text{emissioni})_{\text{mezzi}} [\text{kg CO}_2\text{eq}] &= CO_{2,\text{mezzi}} [\text{kg}] + 25 \cdot CH_{4,\text{mezzi}} [\text{kg}] + 298 \cdot N_2O_{\text{mezzi}} [\text{kg}] \\ &= 177 \text{ kg CO}_2\text{eq} \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,\text{mezzi}} = 172 \text{ kg}$;
- $CH_{4,\text{mezzi}} = 0,19 \text{ kg}$;

⁵¹ Dati reperibili all'interno della scheda "Air Emissions" generata tra gli output dell'applicativo.

- $N_2O_{mezzi} = 0,17 \text{ g}$.

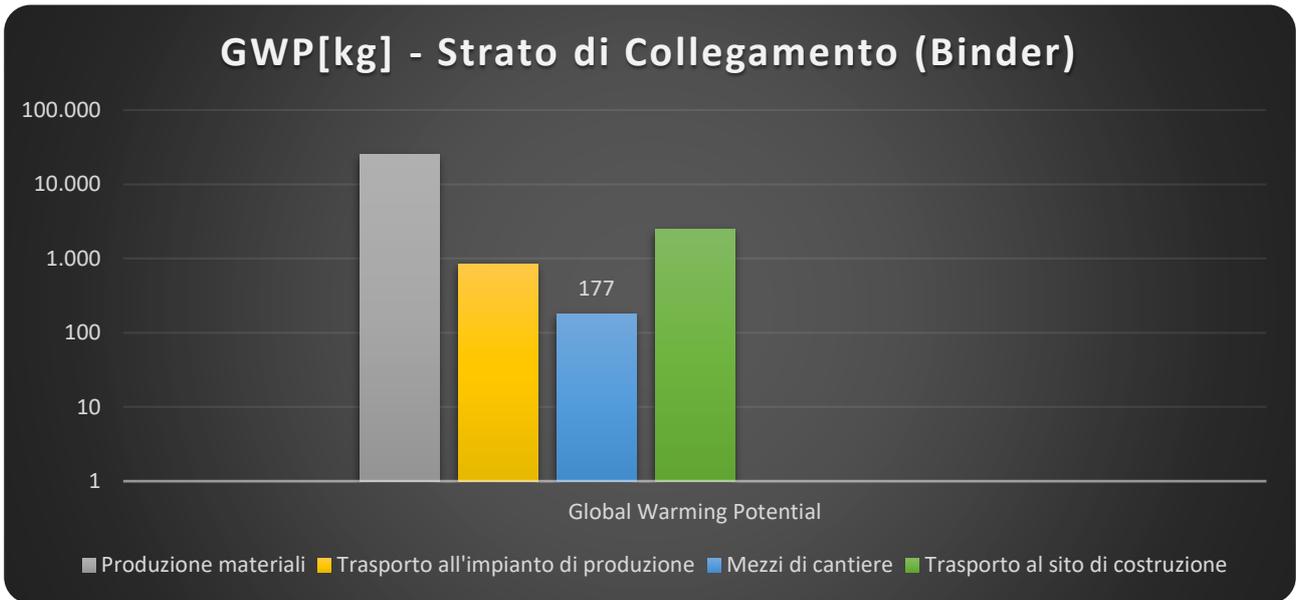


Figura 5.75 – GWP strato di collegamento (scala logaritmica)

STRATO DI BASE

$$\begin{aligned}
 (\text{emissioni})_{mezzi} [kg CO_2eq] &= CO_{2,mezzi} [kg] + 25 \cdot CH_{4,mezzi} [kg] + 298 \cdot N_2O_{mezzi} [kg] \\
 &= 649 kg CO_2eq
 \end{aligned}$$

in cui:

- $CO_{2,mezzi} = 631 \text{ kg}$;
- $CH_{4,mezzi} = 0,71 \text{ kg}$;
- $N_2O_{mezzi} = 0,62 \text{ g}$.

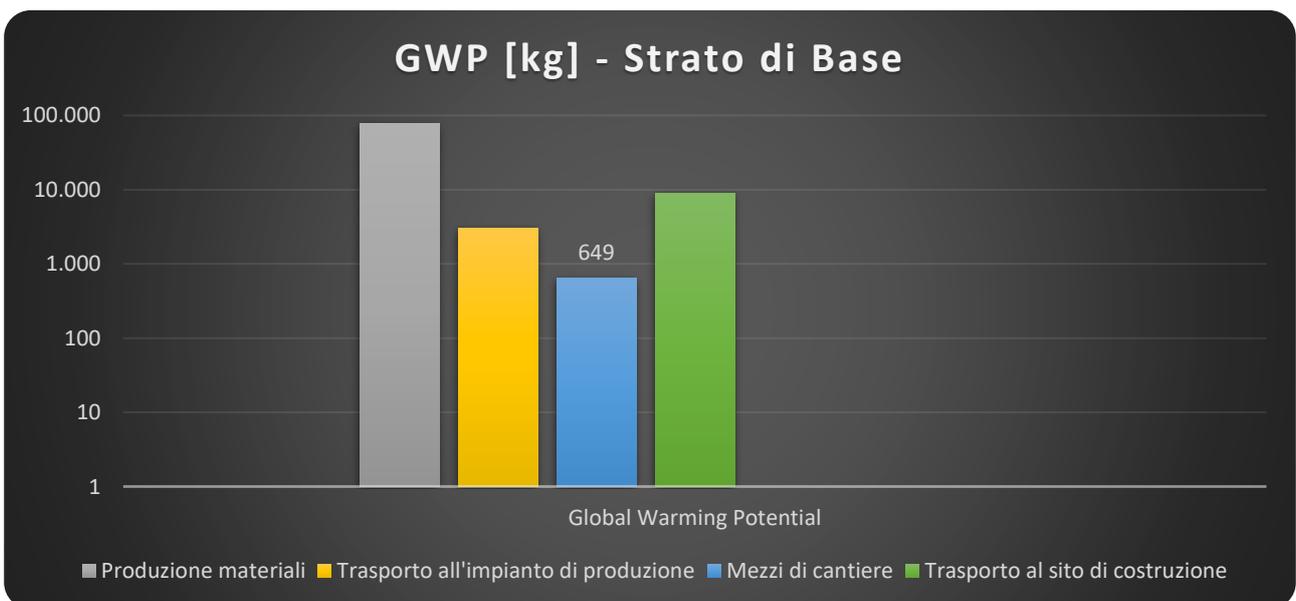


Figura 5.76 – GWP strato di base

STRATO DI FONDAZIONE

$$(emissioni)_{mezzi} [kg CO_2eq] = CO_{2,mezzi} [kg] + 25 \cdot CH_{4,mezzi} [kg] + 298 \cdot N_2O_{mezzi} [kg]$$

$$= 168 kg CO_2eq$$

= 649 kg CO₂eq

in cui:

- CO_{2,mezzi} = 163 kg;
- CH_{4,mezzi} = 0,18 kg;
- N₂O_{mezzi} = 0,16 g.

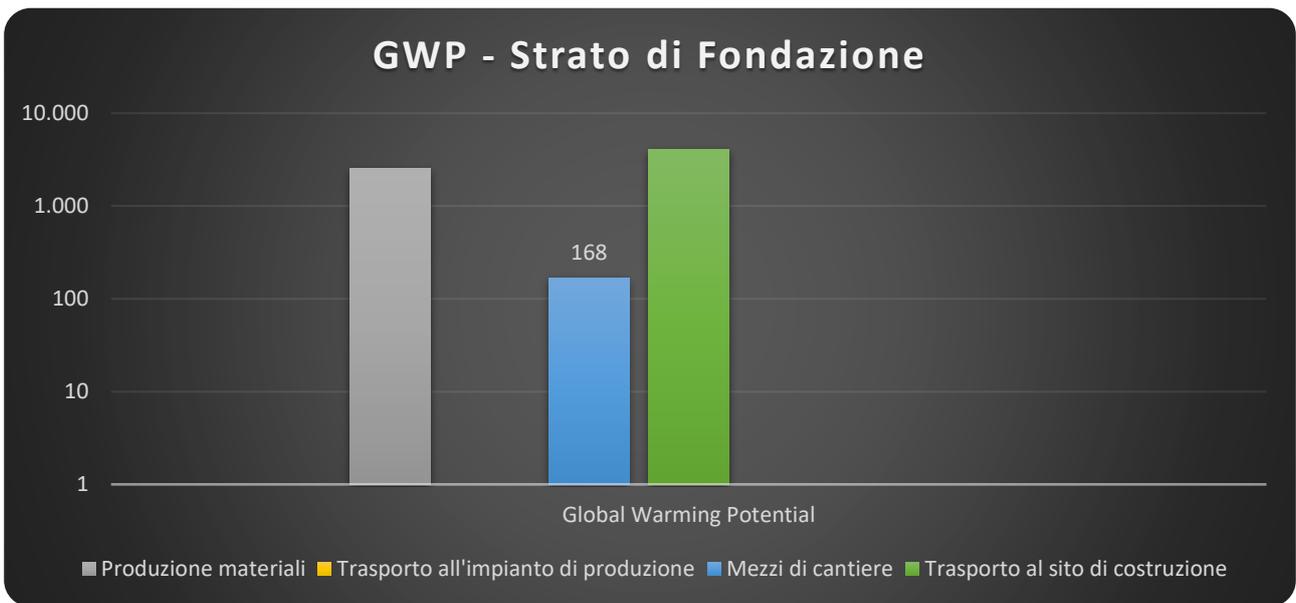


Figura 5.77 – GWP strato di fondazione

5.3.4.1 Riepilogo risultati

Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati precedentemente esposti, riassunti nelle seguenti tabelle:

USURA	GWP (kg CO ₂ eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ATHENA	145

Tabella 5.45 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura

BINDER	GWP (kg CO ₂ eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ATHENA	177

Tabella 5.46 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

BASE	GWP (kg CO2eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ATHENA	649

Tabella 5.47 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base

FONDAZIONE	GWP (kg CO2eq)
	Fase di costruzione
	Mezzi di cantiere
ATHENA	168

Tabella 5.48 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione

6. Inventario dei dati di input

Ciascuno degli applicativi utilizzati per l'analisi di LCA presenta dei dati di input che possono essere forniti di default dall'applicativo stesso, e quindi non modificabili o personalizzabili da parte dell'utente, oppure possono essere inseriti direttamente dall'utente e quindi personalizzabili a seconda del riferimento bibliografico scelto. In entrambe le casistiche, i dati di input di ciascun applicativo possono derivare da database esterni stilati ed aggiornati da enti o associazioni nazionali e internazionali, oppure dalla consultazione di articoli di ricerca scientifica.

In questo capitolo si propone una discussione riguardo i dati di input utilizzati da ciascun applicativo, i quali possono essere oggetto di confronto all'interno delle rispettive analisi di LCA, dando per acquisiti e coincidenti i dati di input di base, quali, ad esempio, le masse dei materiali utilizzati o le distanze di trasporto percorse. Tale confronto si riflette successivamente sui dati di output rilasciati da ciascun applicativo, i quali saranno ugualmente confrontati tra loro come i dati di input. Nello specifico, si esegue un confronto tra i dati di input relativi ai programmi di calcolo *PaLATE*, il quale viene considerato come applicativo di riferimento, *ECORCE M* nella versione 2.0 ed *asPECT*, mentre per l'applicativo *Athena Impact Estimator for Highways* è riportato solamente un confronto con i dati di output, in quanto non è stato possibile dedurre un modello matematico oltre alla formula empirica basata sulla quantità di sostanze emesse in aria.

La scelta di utilizzare *PaLATE* come applicativo di riferimento per il confronto dei risultati ottenuti si riconduce a quanto riportato all'interno del capitolo di introduzione del presente lavoro, ovvero la possibilità di effettuare analisi di LCA sulle pavimentazioni stradali con applicativi differenti da quello normalmente utilizzato negli anni passati dal gruppo di lavoro del Politecnico di Torino, Dipartimento di Infrastrutture.

6.1 Dati di input per la produzione dei materiali

Come anticipato nella precedente sezione introduttiva, si riportano di seguito i dati di input relativi ai differenti programmi di calcolo, omettendo i valori di massa dei materiali, i quali risultano essere i medesimi.

Per gli applicativi *PaLATE* ed *ECORCE M* il modello matematico alla base del calcolo delle emissioni di CO₂ equivalente per la produzione dei materiali è il medesimo, mentre per l'applicativo *asPECT* il modello matematico è differente e più complesso. Nel caso di *Athena Impact Estimator for Highways* non è disponibile un modello matematico confrontabile con quelli degli altri applicativi poiché la determinazione delle emissioni si effettua attraverso l'utilizzo di una formula empirica adottata dall'*EPA (United States Environmental Protection Agency)*, la quale si basa su dati di emissioni in aria di sostanze quali CO₂, CH₄, N₂O.

6.1.1 *PaLATE* ed *ECORCE M*

Il modello matematico utilizzato all'interno di *PaLATE* ed *ECORCE M* per il calcolo delle emissioni relative alla produzione dei materiali necessari a costituire gli strati legati è il seguente⁵²:

$$\begin{aligned} (\text{emissioni})_{\text{produzione aggregati, strato } i\text{-esimo}} [kg CO_2eq] \\ = \text{massa}_{AGGREGATI, \text{strato } i\text{-esimo}} [t] \cdot \text{indicatore di emissione}_{\text{aggregati}} \left[\frac{kg CO_2eq}{t \text{ aggregati}} \right] \end{aligned}$$

⁵² Per il valore dei singoli termini si consultino il **Paragrafo 5.1.1** ed il **Paragrafo 5.1.3**

$$(emissioni)_{produzione\ bitume, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq]$$

$$= massa_{BITUME, strato\ i-esimo} [t] \cdot indicatore\ di\ emissione_{bitume} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ bitume} \right]$$

$$(emissioni)_{produzione\ conglomerato\ bituminoso, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq]$$

$$= massa_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO, strato\ i-esimo} [t]$$

$$\cdot indicatore\ di\ emissione_{conglomerato\ bituminoso} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ conglomerato\ bituminoso} \right]$$

Il modello matematico utilizzato all'interno dei due applicativi per il calcolo delle emissioni relative alla produzione del misto granulare necessario a costituire lo strato di fondazione è il seguente:

$$(emissioni)_{produzione\ aggregati, fondazione} [kg\ CO_2eq]$$

$$= massa_{fondazione} [t] \cdot indicatore\ di\ emissione_{aggregati} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t\ aggregati} \right]$$

I dati di input relativi agli indicatori di emissione di ciascun materiale considerato sono i seguenti:

PALATE	
Produzione materiali	
<i>indicatore di emissione aggregati (sand and gravel) [kg CO₂eq/t aggregati]</i>	2,47
<i>indicatore di emissione bitume (bitumen) [kg CO₂eq/t bitume]</i>	183,96
<i>indicatore di emissione conglomerato bituminoso (Controlled Batch mix plant) [kg CO₂eq/t conglomerato]</i>	16,80

Tabella 6.1 – Indicatori di emissione PaLATE

ECORCE M	
Produzione materiali	
<i>indicatore unitario di emissione (aggregati) [kg CO₂eq/t aggregati]</i>	2,19
<i>indicatore unitario di emissione (bitume) [kg CO₂eq/t bitume]</i>	181,38
<i>indicatore unitario di emissione (conglomerato) [kg CO₂eq/t conglomerato]</i>	23,97

Tabella 6.2 – Indicatori di emissione ECORCE M

All'interno di PaLATE, per la definizione dei dati di inventario relativi alla produzione dei materiali, il gruppo di lavoro del Politecnico di Torino precedentemente menzionato utilizza il metodo Economic Input Output-LCA fornito dalla *Carneige Mellon University*, eseguito sulla base dei dati risalenti al 1997, per la definizione degli indicatori di emissione relativi alla produzione di bitume ed aggregati. Il metodo EIO-LCA utilizza la tabella nazionale EIO composta dai vettori ambientali, i quali sono successivamente combinati con il costo di

un certo settore economico ottenendo una conversione simile ad un fattore di emissione. Per la definizione dell'indicatore di emissione relativo alla produzione di conglomerato bituminoso invece ci si riferisce al modello di impianto di produzione fornito dall'EPA (US *Environmental Protection Agency*).

ECORCE M, invece, per la stessa fase di LCA fa riferimento a (*Life Cycle Inventory for Bitumen – Eurobitume, 2020*) per la produzione di bitume; per la produzione di aggregati i dati di inventario sono estrapolati dalla pubblicazione scientifica (*Environmental evaluation of natural aggregate production during quarry operations: Indicators, Models and Tools, Martaud, 2008*); per la produzione di conglomerato bituminoso l'applicativo utilizza dati di inventario presentati all'interno della pubblicazione scientifica (*Environmental assessment of a hot mix asphalt process, Jullien, 2008*).

6.1.2 asPECT

Il modello matematico utilizzato all'interno di asPECT per il calcolo delle emissioni relative alla produzione di aggregati e bitume per gli strati legati è il seguente⁵³:

$$\begin{aligned} & (emissioni)_{produzione\ aggregati, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\ &= emissione_{LCI, aggregato} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t} \right] \cdot \frac{\%aggregati_{mix, strato\ i-esimo}}{100} \\ &\cdot massa_{strato\ i-esimo} [t] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (emissioni)_{produzione\ bitume, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\ &= emissione_{LCI, bitume} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t} \right] \cdot \frac{\%bitume_{mix, strato\ i-esimo}}{100} \cdot massa_{strato\ i-esimo} [t] \end{aligned}$$

Il modello matematico utilizzato all'interno dell'applicativo per il calcolo delle emissioni relative alla produzione di conglomerato bituminoso per gli strati legati procede alla definizione dell'indicatore di emissione ed in seguito alla definizione delle emissioni, come segue:

$$\begin{aligned} & (consumo\ energia\ annuo)_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} [kWh] \\ &= PCI_{combustibile\ fossile} \left[\frac{kcal}{kg} \right] \cdot fattore\ conversione \left[\frac{kg}{t} \right] \cdot consumo\ annuo [t] \\ &\cdot fattore\ conversione \left[\frac{kWh}{kcal} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (emissione\ annua)_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq] \\ &= consumo\ energia\ annuo_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} [kWh] \\ &\cdot fattore\ emissione_{combustibile\ fossile} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{kWh} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (indicatore\ emissione)_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{t} \right] \\ &= \frac{(emissione\ annua)_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} [kg\ CO_2eq]}{produzione\ annua_{impianto\ produzione\ conglomerato\ bituminoso} [t]} \end{aligned}$$

⁵³ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.1.2**

$$\begin{aligned}
 & (\text{emissioni})_{\text{produzione conglomerato bituminoso, strato } i\text{-esimo}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 & = (\text{indicatore emissione})_{\text{impianto produzione conglomerato bituminoso}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right] \\
 & \cdot \text{massa}_{\text{CONGLOMERATO, strato } i\text{-esimo}} \text{ [t]}
 \end{aligned}$$

I dati di input relativi agli indicatori di emissione di ciascun materiale considerato sono i seguenti:

ASPECT	
Produzione materiali	
<i>indicatore di emissione aggregati [kg CO₂eq/t aggregati]</i>	2,70
<i>indicatore di emissione bitume [kg CO₂eq/t bitume]</i>	202,70
<i>indicatore di emissione conglomerato bituminoso [kg CO₂eq/t conglomerato bituminoso]</i>	19,60

Tabella 6.3 – Indicatori di emissione asPECT

Nel caso dell'analisi effettuata con tale applicativo non sono disponibili dati nel dettaglio a proposito dello strato di fondazione in misto granulare, in quanto non è possibile definire un materiale differente da una miscela bituminosa.

Nella definizione dell'indicatore di emissione di CO₂ equivalente relativa alla produzione di conglomerato bituminoso, si è utilizzato il modello di impianto discontinuo di produzione di proprietà della *Bernardi Impianti International SPA*, con sede amministrativa a Zibido San Giacomo (Milano) e situato nella località di Caprie (Torino). Per la definizione dell'indicatore di emissione relativo alla produzione di bitume si è fatto riferimento ai dati contenuti in (*Life Cycle Inventory for Bitumen* - Eurobitume, 2020).

Per la definizione dell'indicatore di emissione relativo alla produzione di aggregati si è fatto riferimento ai dati contenuti nel lavoro di (Blengini, et al., 2010) attraverso l'utilizzo del software OpenLCA. L'analisi di inventario include gli oneri ambientali legati all'estrazione delle materie prime dalla cava ed alla frantumazione e vagliatura degli aggregati, adottando un approccio *cradle-to-gate*.

6.1.3 Athena Impact Estimator for Highways

Come già riportato all'interno della sezione introduttiva del paragrafo, si riporta la formula empirica utilizzata per ricavare le emissioni in output fornite dall'applicativo, espresse da un unico valore comprendente i contributi dovuti alla produzione di aggregati, bitume e miscela bituminosa⁵⁴:

⁵⁴ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.1.4**

$$\begin{aligned}
& GWP [kg CO_2eq] \\
& = GWA_{CO_2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CO_2)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
& + GWA_{CH_4} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CH_4)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
& + GWA_{N_2O} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg N_2O} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ N_2O)_{strato\ i-esimo} [kg]
\end{aligned}$$

La definizione dei fattori di emissione GWA segue quanto riportato all'interno del database TRACI – versione 2.1, 2012, EPA.

6.2 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative alla produzione dei materiali

Si procede al confronto diretto dei dati di input relativi alla produzione dei materiali, seguito da un confronto delle emissioni ottenute attraverso i diversi applicativi, con particolare attenzione alle differenze che sussistono nel caso di utilizzo dei dati di inventario (o dati di input) definiti in precedenza e nel caso di utilizzo per tutti gli applicativi dei dati di inventario relativi a PaLATE, in modo tale da poter confrontare i risultati nel modo più omogeneo possibile.

Di seguito si riporta il confronto diretto degli indicatori di emissione relativi alla produzione di ciascun materiale per ciascun applicativo utilizzato nell'analisi di LCA⁵⁵:

Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>indicatore di emissione aggregati [kg CO₂eq/t aggregati]</i>	2,47	2,19	2,70
<i>indicatore di emissione bitume [kg CO₂eq/t bitume]</i>	183,96	191,38	202,70
<i>indicatore di emissione conglomerato bituminoso [kg CO₂eq/t conglomerato]</i>	16,80	23,97	19,56

Tabella 6.4 – Confronto indicatori di emissione

Come si evince dalla tabella, per ciascun applicativo i valori degli indicatori di emissione sono differenti, ciò è dovuto alla differente natura di origine dei dati alla base della loro definizione.

Di seguito si riporta invece il confronto riguardante le emissioni di CO₂ equivalente relative alla produzione di aggregati, bitume e conglomerato bituminoso. Come precedentemente riportato, le tabelle che seguono offrono due possibili letture:

- La prima riguarda il confronto delle emissioni tra i diversi applicativi, utilizzando ciascuno di essi i propri dati di input definiti in precedenza;
- La seconda riguarda il confronto tra le emissioni ottenute attraverso ciascun applicativo utilizzando come dati di input esclusivamente quelli definiti per PALATE, in modo tale da poter effettuare un confronto con i dati di input i più omogenei possibili.

⁵⁵ Escluso l'applicativo *Athena Impact Estimator for Highway*.

USURA				
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
emissione CO ₂ eq aggregati [kg CO ₂ eq]	1186	990	1245	-
emissione CO ₂ eq bitume [kg CO ₂ eq]	4946	4838	5147	-
emissione CO ₂ eq conglomerato bituminoso [kg CO ₂ eq]	8522	11432	9331	-
Totale [kg CO₂eq]	14654	17260	15723	22333

Tabella 6.5 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei

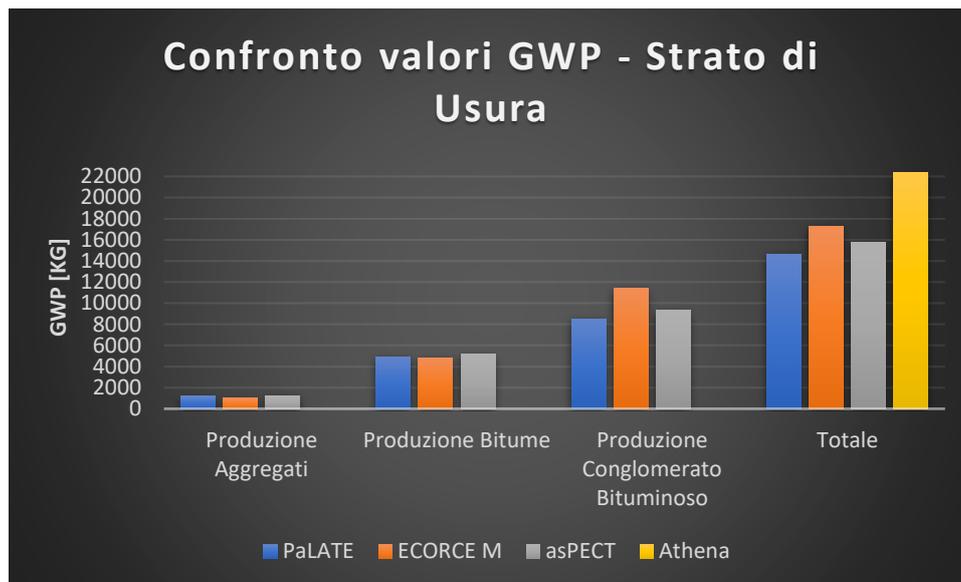


Figura 6.1 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei

USURA			
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
emissione CO ₂ eq aggregati [kg CO ₂ eq]	1186	1186	1186
emissione CO ₂ eq bitume [kg CO ₂ eq]	4946	4946	4946
emissione CO ₂ eq conglomerato bituminoso [kg CO ₂ eq]	8522	8522	8522
Totale [kg CO₂eq]	14654	14654	14487

Tabella 6.6 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE)⁵⁶

⁵⁶ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto

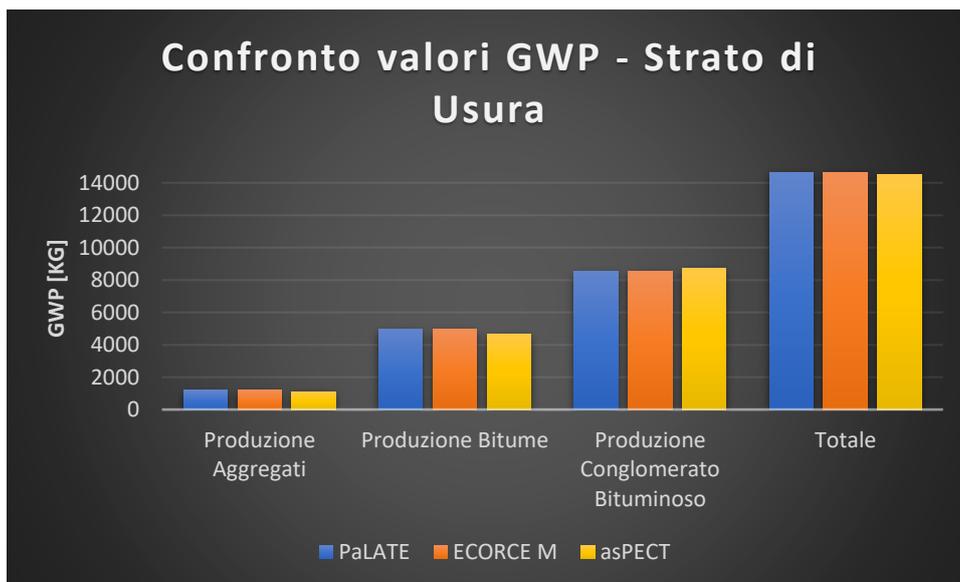


Figura 6.2 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE)

BINDER				
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq aggregati [kg CO₂eq]</i>	1446	1214	1526	-
<i>emissione CO₂eq bitume [kg CO₂eq]</i>	5080	4995	5320	-
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	10308	13901	11404	-
Totale [kg CO₂eq]	16834	20110	18250	25107

Tabella 6.7 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei

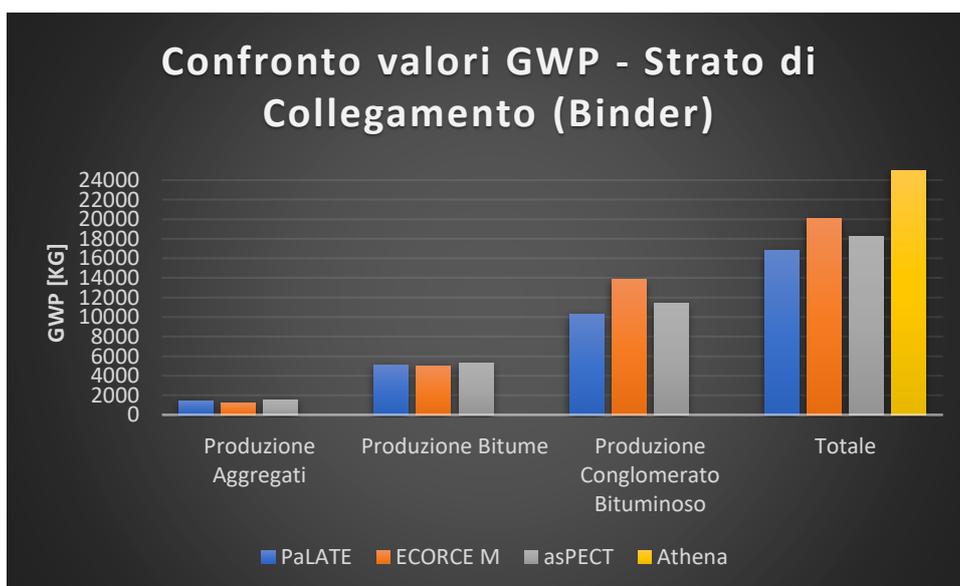


Figura 6.3 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei

BINDER			
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq aggregati [kg CO₂eq]</i>	1446	1446	1375
<i>emissione CO₂eq bitume [kg CO₂eq]</i>	5080	5080	4826
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	10308	10308	9794
Totale [kg CO₂eq]	16834	16834	15996

Tabella 6.8 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE)⁵⁷

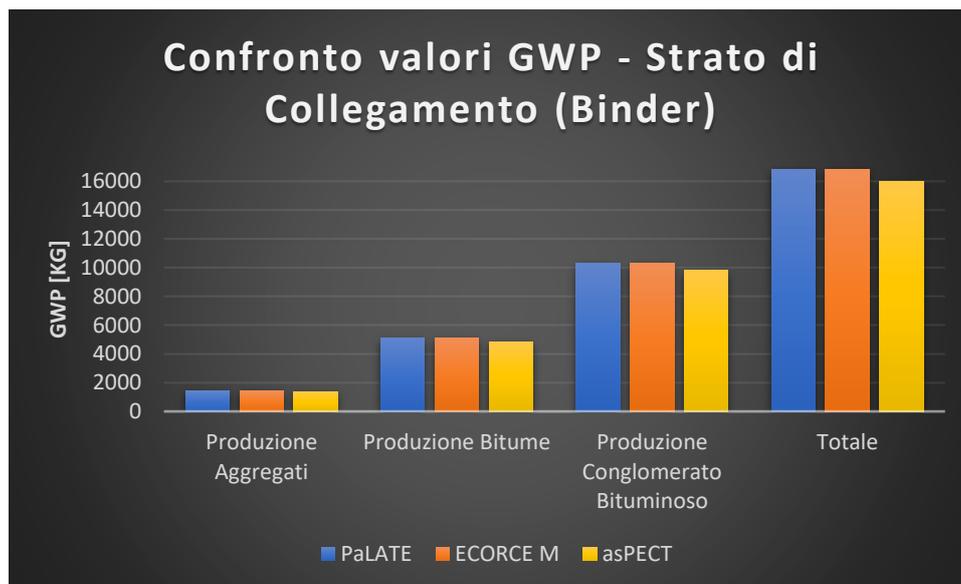


Figura 6.4 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE)

BASE				
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq aggregati [kg CO₂eq]</i>	5275	4452	5595	-
<i>emissione CO₂eq bitume [kg CO₂eq]</i>	18529	18316	19511	-
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	37599	50971	41606	-
Totale [kg CO₂eq]	61403	73739	66712	77074

Tabella 6.9 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input eterogenei

⁵⁷ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto

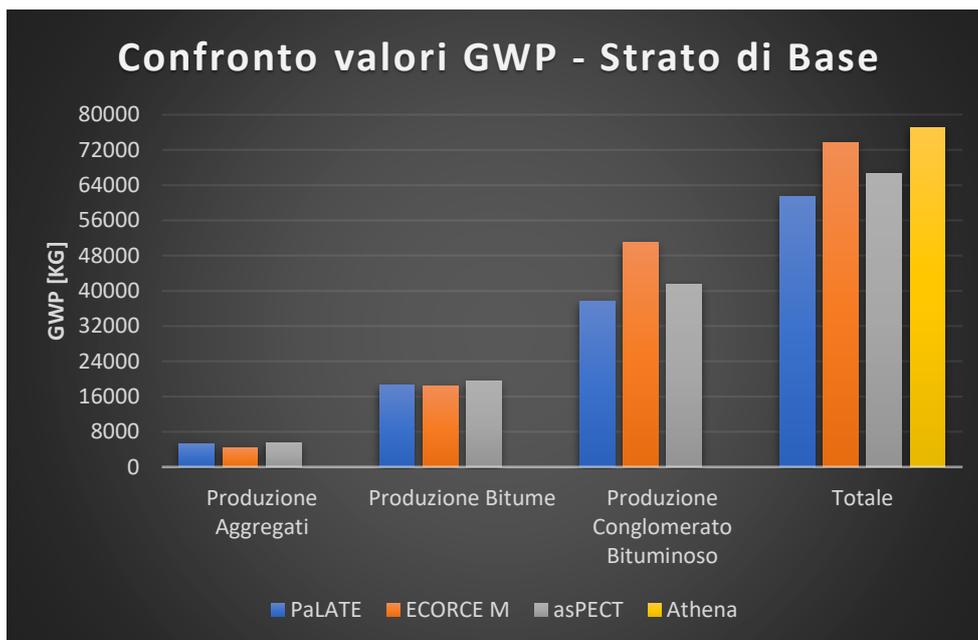


Figura 6.5 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input eterogenei

BASE			
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq aggregati [kg CO₂eq]</i>	5275	5275	5039
<i>emissione CO₂eq bitume [kg CO₂eq]</i>	18529	18529	17682
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	37599	37599	35885
Totale [kg CO₂eq]	61403	61403	58606

Tabella 6.10 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE)⁵⁸

⁵⁸ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto

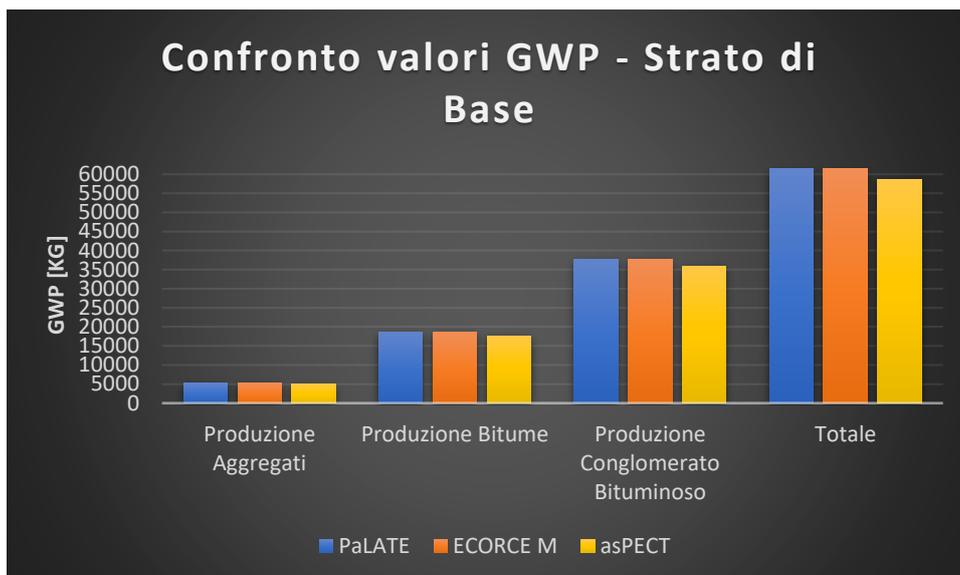


Figura 6.6 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE)

FONDAZIONE				
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
emissione CO ₂ eq misto granulare [kg CO ₂ eq]	3320	3329	-	2430

Tabella 6.11 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei

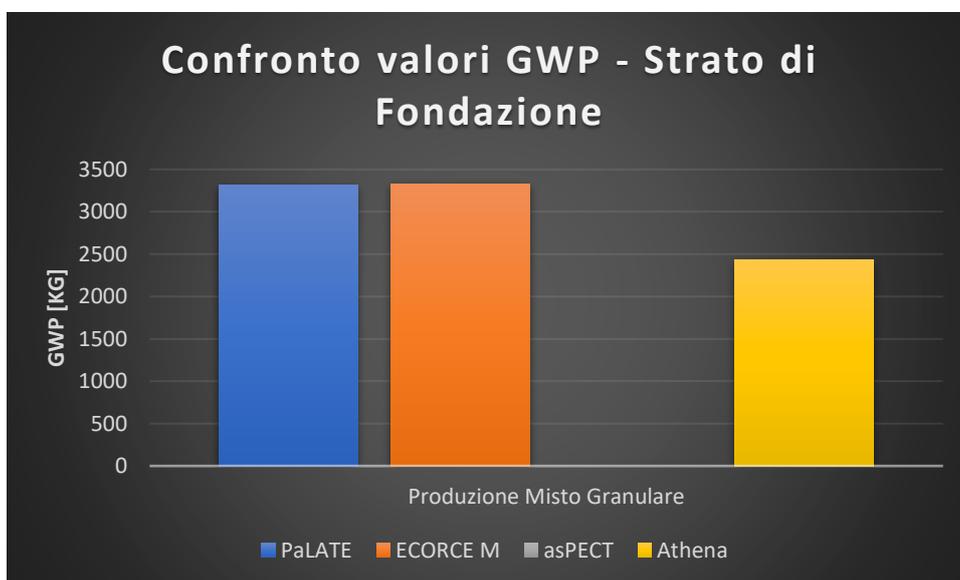


Figura 6.7 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei

FONDAZIONE			
Produzione materiali	PALATE	ECORCE M (PALATE)	ASPECT (PALATE)
emissione CO ₂ eq misto granulare [kg CO ₂ eq]	3320	3333	-

Tabella 6.12 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE)

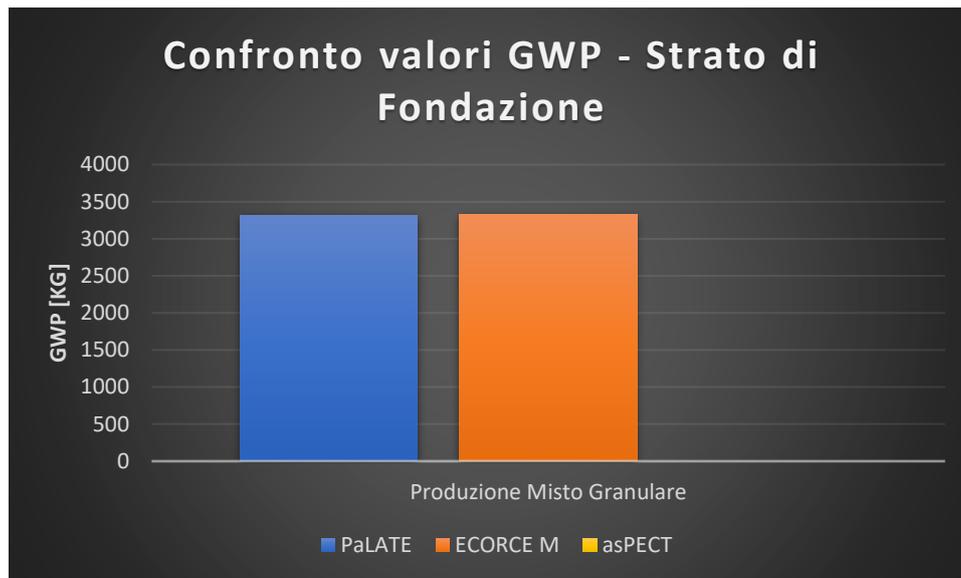


Figura 6.8 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE)

Come si evince dalle tabelle precedentemente riportate, i risultati relativi all'utilizzo dei dati di inventario propri di ciascun applicativo (dati di input eterogenei) differiscono tra loro poiché i modelli matematici alla base dei diversi applicativi sono differenti o per differente natura dei dati di input.

Nel caso dell'applicativo ECORCE M, i risultati inerenti alla produzione di aggregati (sia utilizzati per la produzione di conglomerato bituminoso nel caso degli strati legati di usura, binder e base, sia utilizzati per la produzione di misto granulare nel caso dello strato di fondazione) e bitume sottostimano leggermente le emissioni rispetto a quelli forniti da PaLATE; si ha invece una sovrastima non trascurabile (di poco inferiore al 30%) per quanto riguarda le emissioni relative alla produzione di conglomerato bituminoso. Ciò è dovuto, a parità di modello matematico utilizzato, ai valori degli indicatori di emissione, i quali risultano leggermente sottostimati nei primi due casi, mentre risulta essere sovrastimato di quasi il 50% nel caso della produzione di conglomerato bituminoso. Valutando quelli che sono i risultati relativi all'impiego degli stessi dati di inventario (dati di input omogenei), si può notare come nel caso di ECORCE M i risultati convergano perfettamente, in quanto i due modelli matematici sono i medesimi e la precedente differenza risulta quindi imputabile alla diversità di origine dei dati input.

Nel caso di asPECT invece i risultati differiscono sia utilizzando diversi dati di inventario, sia utilizzando gli stessi inseriti all'interno di PaLATE. In particolare, nel caso delle emissioni relative alla produzione di aggregati e bitume si passa da valori di emissione sovrastimati nel primo caso, a valori di emissione sottostimati nel secondo caso, rispetto a PaLATE. Nel caso delle emissioni relative alla produzione di conglomerato bituminoso si possono effettuare due ulteriori considerazioni, facendo riferimento ai modelli di impianto di produzione utilizzati all'interno dei due applicativi: nel caso di PaLATE viene considerato un modello di impianto i cui parametri sono confrontabili con quelli dell'impianto utilizzato da Sitalfa, mentre nel caso di ECORCE M, come già riportato in precedenza, si utilizzano i parametri reperiti all'interno della *Relazione di Funzionalità dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso*, redatta dall'Ing. Vito Rotunno, relativa all'impianto situato a Caprie (TO) e di proprietà della Bernardi Impianti International SPA. Si nota come si mantenga la sovrastima dei risultati nei confronti di PaLATE nel caso in cui nel modello matematico si vadano a modificare i valori di produzione oraria dell'impianto (200 ton/h nel caso dell'impianto di produzione

definito all'interno di asPECT, 214 ton/h nel caso dell'impianto di produzione considerato all'interno di PaLATE) e di consumo di energia per tonnellata di materiale (221 MJ/ton nel caso dell'impianto di produzione definito all'interno di asPECT, 227 MJ/ton nel caso dell'impianto di produzione considerato all'interno di PaLATE); i valori di emissione risultano invece coincidenti nel caso si vada a sostituire all'interno del modello matematico direttamente il valore dell'indicatore di emissione.

In riferimento allo strato di fondazione, non sono disponibili risultati in quanto, come riportato in precedenza, l'applicativo non consente la definizione di un materiale differente da un materiale legato.

Come già riportato in precedenza, Athena Impact Estimator for Highways è stato considerato all'interno del confronto tra applicativi con utilizzo di dati di input eterogenei. Non essendo presente un modello matematico dettagliato come nel caso degli altri applicativi, è stato presentato il solo risultato cumulativo di emissioni, ovvero il contributo totale pari alla somma delle emissioni relative alla produzione di aggregati, bitume e conglomerato bituminoso, per ciascuno strato di pavimentazione. In riferimento a tale valore, si può notare come Athena sovrastimi le emissioni rispetto agli altri applicativi di una percentuale variabile oscillante tra il 30% ed il 50% circa.

A seguito di queste osservazioni, si può concludere che, considerando i risultati associati all'utilizzo di dati di inventario eterogenei, per quanto riguarda la produzione di aggregati gli applicativi PaLATE ed asPECT stimano le emissioni in modo molto simile, mentre ECORCE M risulta sottostimare le stesse tra il 10% e 20% a seconda dello strato considerato. Le emissioni relative alla produzione di bitume invece vedono PaLATE ed ECORCE M fornire dei valori pressoché uguali, mentre asPECT risulta sovrastimare leggermente le stesse. Considerando le emissioni relative alla produzione di conglomerato bituminoso le differenze tra i vari applicativi sono più evidenti, evidenziando una più simile convergenza tra PaLATE ed asPECT, mentre ECORCE M sovrastima in modo evidente le stesse. Guardando ai risultati ottenuti con l'applicazione di dati di inventario omogenei, i tre applicativi risultano convergere tra loro, in particolare ECORCE M e PaLATE forniscono gli stessi risultati, essendo lo stesso modello matematico utilizzato da entrambi, mentre asPECT presenta ancora delle differenze seppur minime e trascurabili ai fini dell'ordine di grandezza.

Athena Impact Estimator for Highways presenta risultati che sovrastimano le emissioni rispetto a tutti gli altri applicativi.

6.3 Dati di input per il trasporto dei materiali

Ugualmente a quanto effettuato nella precedente sezione dedicata alla fase di produzione dei materiali, si riportano di seguito i dati di input relativi ai differenti programmi di calcolo, omettendo i valori di distanza di trasporto dei materiali, i quali risultano essere i medesimi.

Ciascun applicativo utilizza un proprio modello matematico per il computo delle emissioni di CO₂ equivalente relative al trasporto dei materiali. Si differenziano inoltre due fasi di trasporto:

- Il trasporto delle materie prime (aggregati e bitume), dal sito di estrazione (cava di estrazione di Mollieres, comune di Cesana Torinese, provincia di Torino) nel caso del trasporto degli aggregati, dalla raffineria (comune di Busalla, provincia di Genova) all'impianto di produzione Sitalfa S.P.A. (comune di Salbertrand, provincia di Torino);
- Il trasporto del materiale finito (conglomerato bituminoso) dall'impianto di produzione (comune di Salbertrand, provincia di Torino) al sito di costruzione (casello di Avigliana, provincia di Torino, lungo l'autostrada A32).

Per quanto riguarda il trasporto degli aggregati impiegati per la costituzione dello strato di fondazione si considera la distanza che intercorre tra la cava di estrazione ed il sito di costruzione, poiché essi non hanno bisogno di lavorazione intermedia.

6.3.1 PaLATE

Il modello matematico utilizzato all'interno di PaLATE per la fase di trasporto delle materie⁵⁹ è il seguente:

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{trasporto\ aggregati, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\
 &= \left(\frac{massa_{AGGREGATI, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{dumper} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
 &\quad \cdot consumo\ carburante_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 &\quad \cdot \frac{contenuto\ CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right]}{fattore\ conversione \left[\frac{g}{kg} \right]} \left. \right) \\
 &+ \left(\frac{massa_{AGGREGATI, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{dumper} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
 &\quad \cdot consumo\ carburante_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\
 &\quad \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{t} \right] \left. \right) / 1000
 \end{aligned}$$

⁵⁹ Il modello relativo al trasporto degli aggregati è valido anche nel caso di trasporto degli aggregati utilizzati per la costituzione dello strato di fondazione in misto granulare, con l'accortezza di inserire il valore opportuno di distanza di trasporto.

Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.2.1**

$$\begin{aligned}
& (emissioni)_{trasporto\ bitume, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\
& = \left(\frac{massa_{BITUME, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{tanker\ truck} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
& \quad \cdot consumo\ carburante_{tanker\ truck} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
& \quad \left. \cdot \frac{contenuto\ CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right]}{fattore\ conversione \left[\frac{g}{kg} \right]} \right) \\
& + \left(\frac{massa_{BITUME, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{tanker\ truck} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
& \quad \cdot consumo\ carburante_{tanker\ truck} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\
& \quad \left. \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{ton} \right] \right) / 1000
\end{aligned}$$

Il modello matematico utilizzato all'interno di PaLATE per la fase di trasporto del conglomerato bituminoso è il seguente⁶⁰:

$$\begin{aligned}
& (emissioni)_{trasporto\ conglomerato\ bituminoso, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\
& = \left(\frac{massa_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{dumper} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
& \quad \cdot consumo\ carburante_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
& \quad \left. \cdot \frac{contenuto\ CO_2_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{g\ diesel} \right]}{fattore\ conversione \left[\frac{g}{kg} \right]} \right) \\
& + \left(\frac{massa_{CONGLOMERATO\ BITUMINOSO, strato\ i-esimo} [t]}{capacità_{dumper} [t]} \cdot distanza\ trasporto [km] \right. \\
& \quad \cdot consumo\ carburante_{dumper} \left[\frac{l}{km} \right] \cdot \frac{densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right]}{1000000} \\
& \quad \left. \cdot fattore\ emissione_{DIESEL} \left[\frac{g\ CO_2eq}{ton} \right] \right) / 1000
\end{aligned}$$

I dati di input relativi alla fase di trasporto dei materiali sono i seguenti:

⁶⁰ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.2.1**

PALATE	
Trasporto materiali	
capacità dumper (trasporto aggregati- trasporto conglomerato) [ton]	25,00
consumo carburante dumper (trasporto aggregati-trasporto conglomerato) [l/km]	0,33
capacità tanker truck (trasporto bitume) [ton]	20,00
consumo carburante tanker truck (trasporto bitume) [l/km]	0,20
densità diesel [g/l]	848,00
Contenuto CO ₂ diesel [g CO ₂ /g diesel]	3,67
fattore di emissione produzione diesel [g CO ₂ eq/ton diesel]	543 404,00

Tabella 6.13 – Dati di input PaLATE

PaLATE utilizza i dati reperibili all'interno del *Transportation Energy Data Book*, prodotto dall'*Oak Ridge National Laboratory per il US Department of Energy's Office of Energy Vehicle Technologies Office*.

6.3.2 ECORCE M

Il modello matematico utilizzato all'interno di ECORCE M per la fase di trasporto dei materiali risulta essere il medesimo sia per il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione, sia per il trasporto della miscela bituminosa finale al sito di costruzione. Esso si basa sulla definizione dei veicoli-chilometro (vkm) relativi al trasporto di ciascun materiale, i quali moltiplicati per il relativo indicatore unitario di emissione fornito in input dall'applicativo (kg CO₂eq/km), generano le emissioni in termini di CO₂ equivalente. Il modello matematico così descritto si presenta come segue⁶¹:

$$vkm_{trasporto\ impianto, strato\ i-esimo} = \frac{M_{aggregati}}{Capacità_{mezzo\ trasporto}} \cdot 1,8D_{aggregati} + \frac{M_{bitume}}{Capacità_{mezzo\ trasporto}} \cdot 1,8D_{bitume}$$

$$(emissioni)_{trasporto\ impianto, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot vkm_{trasporto\ impianto, strato\ i-esimo} [km]$$

$$vkm_{trasporto\ sito\ costruzione, strato\ i-esimo} = \frac{M_{conglomerato}}{Capacità_{mezzo\ trasporto}} \cdot 1,8D_{conglomerato}$$

⁶¹ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.2.3**

$$(emissioni)_{trasporto\ sito\ costruzione, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2eq] \\ = GWP [kg\ CO_2eq/km] \cdot vkm_{trasporto\ sito\ costruzione, strato\ i-esimo} [km]$$

I dati di input relativi alla fase di trasporto dei materiali sono i seguenti:

ECORCE M	
Trasporto materiali	
capacità mezzo pesante (trasporto aggregati- trasporto bitume-trasporto conglomerato) [ton]	24,00
indicatore unitario (trasporto aggregati- trasporto bitume-trasporto conglomerato) [kg CO ₂ eq/vkm]	0,33
veicoli chilometro (aggregati) [vkm]	491,00
veicoli chilometro (bitume) [vkm]	434,00
veicoli chilometro (conglomerato) [vkm]	1 832,00
coefficiente andata-ritorno [-]	1,80

Tabella 6.14 – Dati di input ECORCE M

ECORCE M utilizza i dati reperibili all'interno della sezione *Environmental quality of construction products - Handbook on energy and transport data*, contenuta all'interno dell'FD P01-015 della Normativa Nazionale Francese, edizione 2006.

6.3.3 asPECT

Il modello matematico utilizzato all'interno di asPECT per il computo delle emissioni di CO₂ equivalente è il medesimo sia per il trasporto delle materie prime all'impianto di produzione, sia per il trasporto della miscela bituminosa finale al sito di costruzione. Si riporta di seguito lo sviluppo di tale modello⁶²:

$$(emissioni)_{strato\ i-esimo, trasporto\ singolo\ viaggio, aggregati} [kg\ CO_2eq] \\ = distanza\ percorsa [vkm] \\ \cdot \left(\left(Defra\ 50\% \text{ load factor }_{rigid > 17t} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right. \\ \left. - \left((f - 50\%) \cdot Defra\ 0\% \text{ load factor }_{rigid > 17t} \left[\frac{kg\ CO_2eq}{vkm} \right] \right) \right)$$

$$(indicatore\ di\ emissione)_{strato\ i-esimo, trasporto\ aggregati} [kg\ CO_2eq/t] \\ = \frac{(emissioni)_{strato\ i-esimo, trasporto\ aggregati} [kg\ CO_2eq]}{2 \cdot Capacità_{rigid > 17t} [t]}$$

⁶² Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.2.2**

$$\begin{aligned}
& (\text{emissioni})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
& = \text{distanza percorsa [vkm]} \\
& \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{articulated}>3,5t-33t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
& \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{articulated}>3,5t-33t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& = \frac{(\text{emissioni})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{articulated}>3,5t-33t} \text{ [t]}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto impianto}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& = \frac{\% \text{aggregati}_{\text{miscela}}}{100} \\
& \cdot (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto aggregati}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& + \frac{\% \text{bitume}_{\text{miscela}}}{100} \\
& \cdot (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto bitume}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{emissioni CO}_2\text{eq})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto impianto}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& = \text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \\
& \cdot (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto impianto}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{emissioni})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
& = \text{distanza percorsa [vkm]} \\
& \cdot \left(\left(\text{Defra 50\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right. \\
& \left. - \left((f - 50\%) \cdot \text{Defra 0\% load factor}_{\text{rigid}>17t} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{vkm}} \right] \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& = \frac{(\text{emissioni})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto conglomerato bituminoso}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]}}{2 \cdot \text{Capacità}_{\text{rigid}>17t} \text{ [t]}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\text{emissioni})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto sito costruzione}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
& = \text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \\
& \cdot (\text{indicatore di emissione})_{\text{strato } i\text{-esimo, trasporto sito costruzione}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]}
\end{aligned}$$

I dati di input relativi alla fase di trasporto dei materiali sono i seguenti:

ASPECT	
Trasporto materiali	
capacità mezzo rigido (trasporto aggregati-trasporto conglomerato) [ton]	17
capacità mezzo articolato (trasporto bitume) [ton]	17
fattore di carico Defra50% per mezzo di trasporto rigido [kg CO ₂ eq/vkm]	1,166
fattore di carico Defra0% per mezzo di trasporto rigido [kg CO ₂ eq/vkm]	0,959
fattore di carico Defra50% per mezzo di trasporto articolato [kg CO ₂ eq/vkm]	1,109
fattore di carico Defra0% per mezzo di trasporto articolato [kg CO ₂ eq/vkm]	0,889
coefficiente andata-ritorno [-]	2

Tabella 6.15 – Dati di input asPECT

Il calcolo delle emissioni di CO₂ equivalente relative al trasporto da parte di asPECT è eseguito utilizzando i fattori di emissione “activity plus well-to-tank”⁶³. I fattori di carico riportati nella precedente tabella sono presenti all’interno dell’Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra/DECC’s GHG Conversion Factors for Company Reporting.

6.3.4 Athena Impact Estimator for Highways

L’applicativo segue lo stesso criterio di valutazione adottato per la valutazione delle emissioni relative alla produzione dei materiali. Si riporta a titolo di completezza la formula empirica utilizzata, relativa in questo caso specifico al trasporto dei materiali⁶⁴:

$$\begin{aligned}
 GWP [kg CO_2eq] &= GWA_{CO_2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CO_2)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
 &+ GWA_{CH_4} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CH_4)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
 &+ GWA_{N_2O} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg N_2O} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ N_2O)_{strato\ i-esimo} [kg]
 \end{aligned}$$

La definizione dei fattori di emissione GWA segue quanto riportato all’interno del database TRACI – versione 2.1, 2012, EPA.

6.4 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative al trasporto dei materiali

Come nel caso precedente relativo alla produzione dei materiali, si procede al confronto diretto dei dati di input relativi al trasporto dei materiali, seguito da un confronto delle emissioni ottenute attraverso i diversi

⁶³ BEIS’s Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019

⁶⁴ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.2.4**

applicativi, con particolare attenzione alle differenze che sussistono nel caso di utilizzo dei database come definiti in precedenza e nel caso di utilizzo per tutti gli applicativi dei dati di input relativi al database di PALATE, in modo tale da poter confrontare i risultati nel modo più omogeneo possibile.

Di seguito si riporta il confronto diretto dei valori di capacità dei mezzi di trasporto utilizzati da ciascun applicativo⁶⁵, i quali sono gli unici dati di input comuni a tutti i modelli matematici precedentemente descritti e, per tale motivo, gli unici valori confrontabili all'interno dell'operazione di omogenizzazione dei risultati relativi alle emissioni di CO₂ equivalente:

Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>capacità mezzo di trasporto (trasporto aggregati- trasporto conglomerato) [ton]</i>	25	24	17
<i>capacità mezzo di trasporto (trasporto bitume) [ton]</i>	20	24	17

Tabella 6.16 – Confronto tra i dati di capacità dei mezzi di trasporto

Come si evince dalla tabella, per ciascun applicativo i valori delle capacità dei mezzi di trasporto dei materiali sono differenti, ciò è dovuto alla differente natura di origine dei dati alla base della loro definizione.

Di seguito si riporta invece il confronto riguardante le emissioni di CO₂ equivalente relative al trasporto di aggregati, bitume e conglomerato bituminoso. Come riportato in precedenza, si considerano le distanze associate al trasporto di ciascun materiale. Anche in questo caso, le tabelle che seguono offrono le due possibili letture già presentate per la fase di produzione dei materiali:

- il confronto delle emissioni tra i diversi applicativi, utilizzando ciascuno di essi i propri dati di input definiti in precedenza;
- il confronto tra le emissioni ottenute attraverso ciascun applicativo utilizzando come dati di input esclusivamente quelli definiti per PaLATE, in modo tale da poter effettuare un confronto con i dati di input i più omogenei possibili.

USURA				
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	515	575	804	-
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	150	509	44	-
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	842	2146	1660	2050
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	665	1084	848	687
Totale trasporto [kg CO₂eq]	1507	3230	2508	2737

Tabella 6.17 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei⁶⁶

⁶⁵ Escluso l'applicativo *Athena Impact Estimator for Highway*.

⁶⁶ Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi

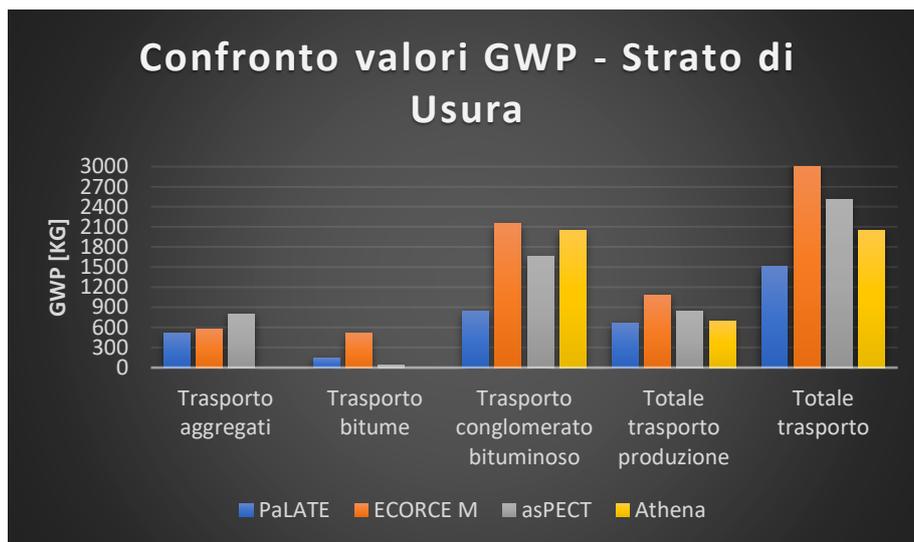


Figura 6.9 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei

USURA			
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	515	552	592
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	150	610	33
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	842	2061	1140
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	665	1162	625
Totale trasporto [kg CO₂eq]	1507	3223	1765

Tabella 6.18 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE)⁶⁷

⁶⁷ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto.

Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi.

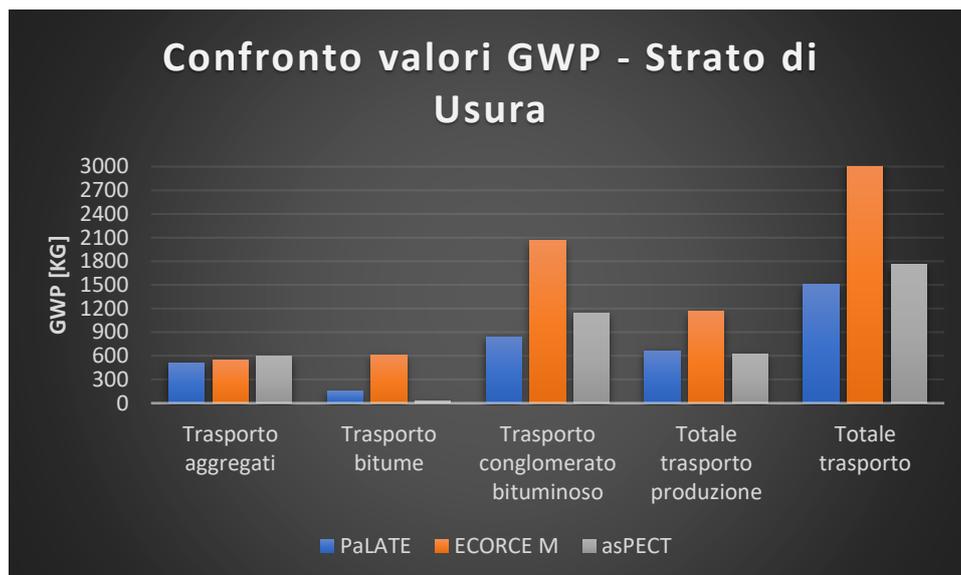


Figura 6.10 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE)

BINDER				
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	598	706	923	-
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	154	525	44	-
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	1018	2610	2018	2484
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	752	1231	967	837
Totale trasporto [kg CO₂eq]	1770	3841	2985	3321

Tabella 6.19 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei⁶⁸

⁶⁸ Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi

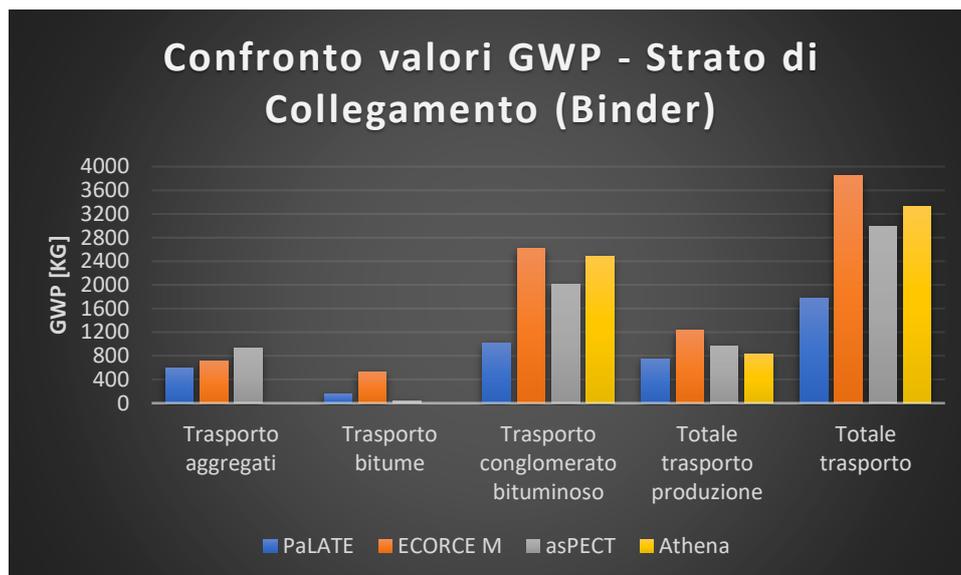


Figura 6.11 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei

BINDER			
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	598	678	679
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	154	630	32
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	1018	2506	1393
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	752	863	711
Totale trasporto [kg CO₂eq]	1770	3368	2105

Tabella 6.20 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE)⁶⁹

⁶⁹ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto.

Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi.

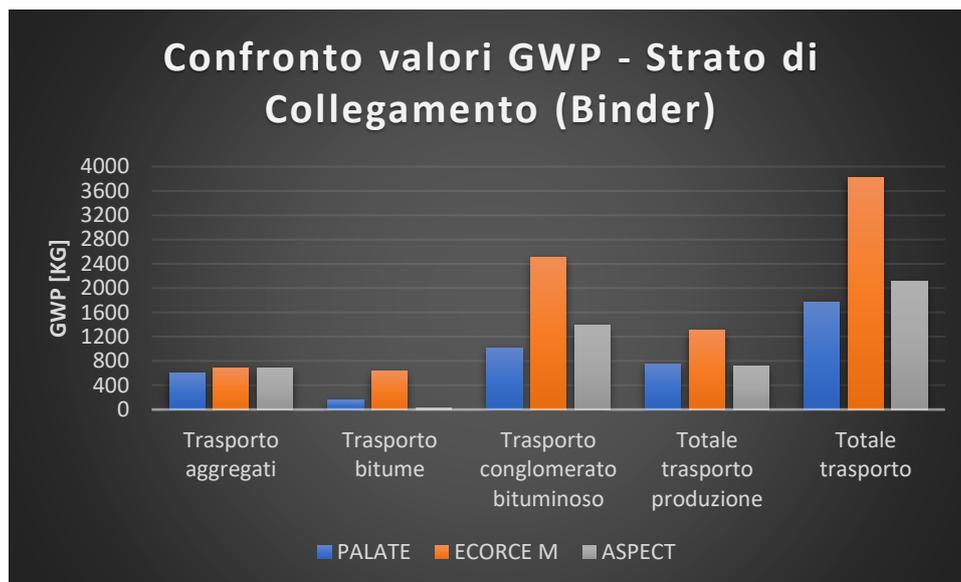


Figura 6.12 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE)

BASE				
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	1924	2588	3385	-
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	561	1926	160	-
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	3714	9569	7402	9002
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	2485	4514	3545	3058
Totale trasporto [kg CO₂eq]	6199	14083	10947	12060

Tabella 6.21 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input eterogenei⁷⁰

⁷⁰ Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi

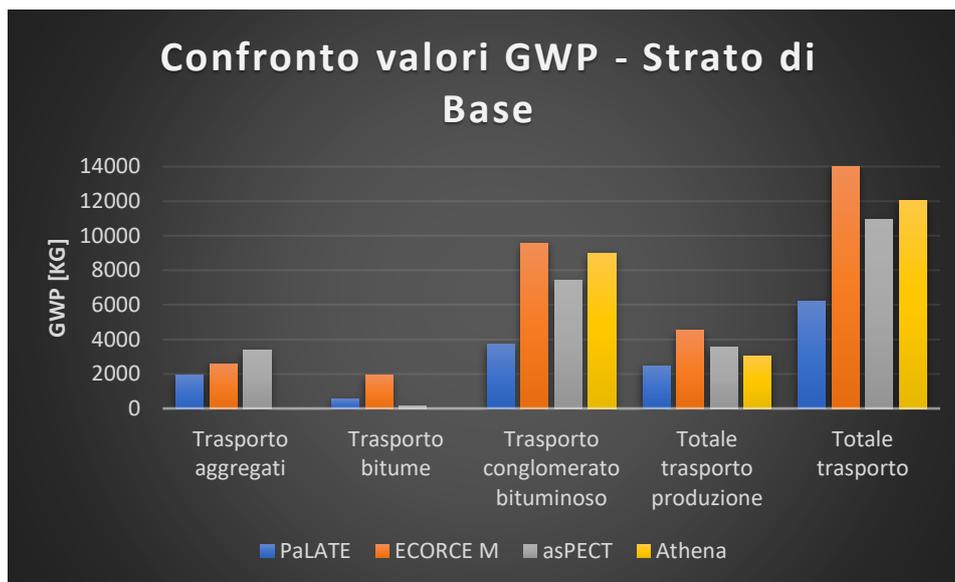


Figura 6.13 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input eterogenei

BASE			
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq trasporto aggregati [kg CO₂eq]</i>	1924	2484	2489
<i>emissione CO₂eq trasporto bitume [kg CO₂eq]</i>	561	2311	117
<i>emissione CO₂eq conglomerato bituminoso [kg CO₂eq]</i>	3714	9186	5105
Totale trasporto produzione [kg CO₂eq]	2485	4796	2606
Totale trasporto [kg CO₂eq]	6199	13982	7711

Tabella 6.22 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE) ⁷¹

⁷¹ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto.

Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi.

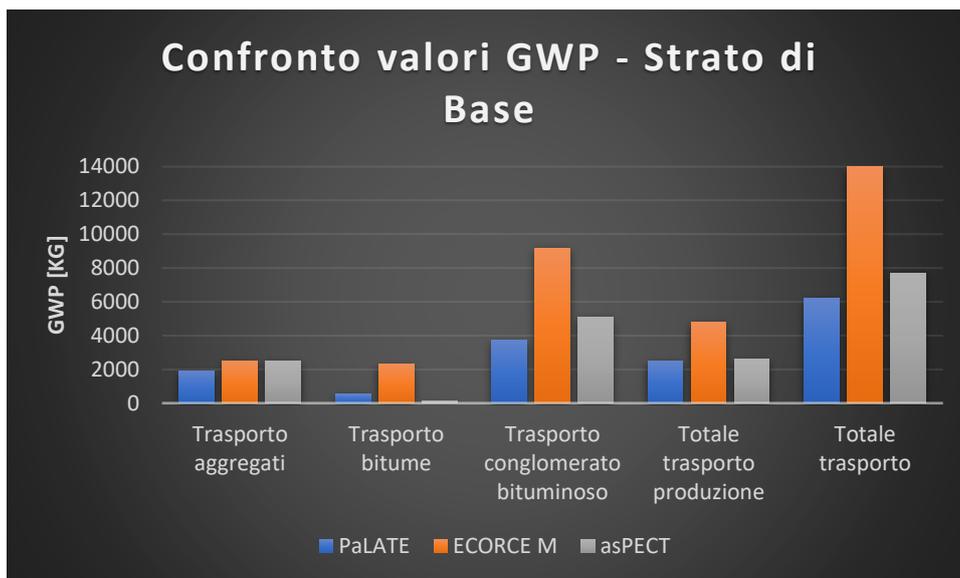


Figura 6.14 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE)

FONDAZIONE				
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT	ATHENA
<i>emissione CO₂eq trasporto misto granulare [kg CO₂eq]</i>	2864	8720	-	4110

Tabella 6.23 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei⁷²

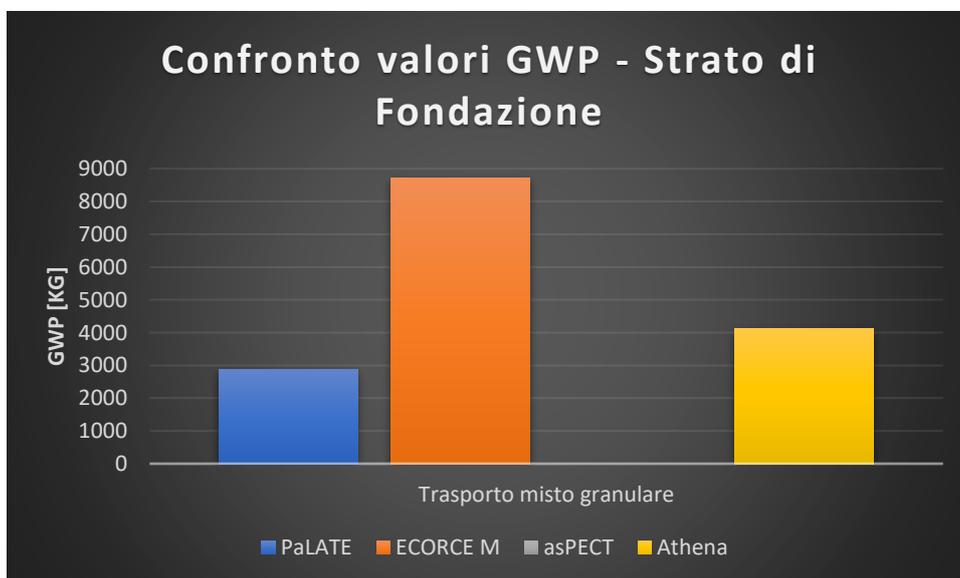


Figura 6.15 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei

⁷² Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi

FONDAZIONE			
Trasporto materiali	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>emissione CO₂eq trasporto misto granulare [kg CO₂eq]</i>	2864	8371	-

Tabella 6.24 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE)⁷³

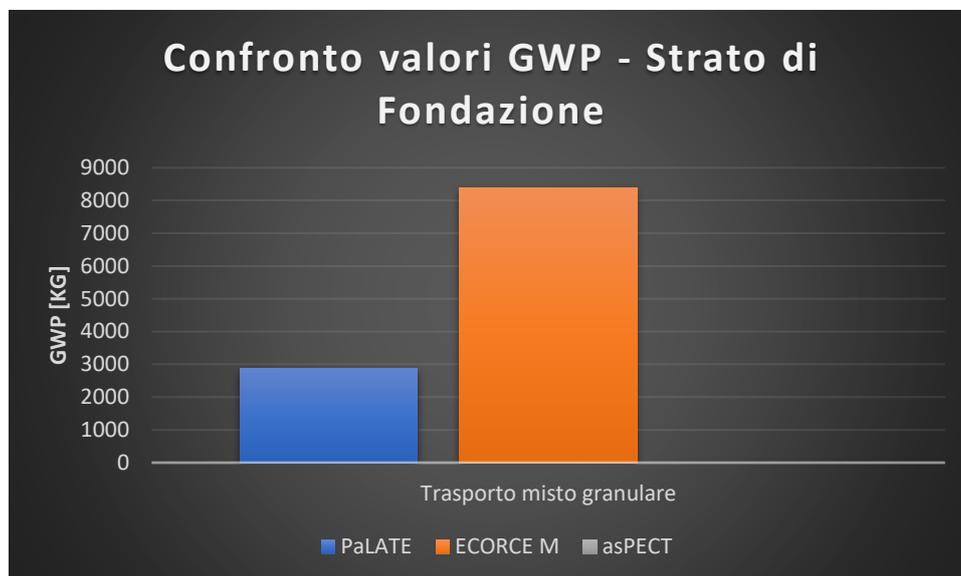


Figura 6.16 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE)

Come si evince dalle tabelle, i risultati differiscono tra loro sia nel caso in cui si utilizzino i dati di input specifici di ciascun applicativo, sia nel caso in cui si utilizzino i dati di input inseriti all'interno di PaLATE, poiché i modelli matematici alla base dei diversi applicativi sono differenti.

Nel caso dell'applicativo ECORCE M, i risultati differiscono sia in valore assoluto, che nel rapporto numerico tra di essi rispetto a quelli forniti da PaLATE, che all'interno del lavoro di confronto effettuato in questo capitolo è considerato come applicativo di confronto. Ciò è dovuto ai differenti valori dei dati di input, in quanto:

- I confini di sistema sono differenti tra i due applicativi, in quanto all'interno del modello matematico utilizzato da PaLATE si tiene conto di un doppio contributo e non di uno soltanto, come nel caso di ECORCE M;
- All'interno del modello matematico utilizzato da PaLATE si possono ricavare i veicoli-chilometro per la cui definizione, a differenza di ECORCE M, non si considera alcun fattore di andata e ritorno; di conseguenza il dato di input per quanto riguarda la distanza percorsa risulta essere netto, senza alcun fattore moltiplicativo.
- All'interno del modello matematico utilizzato da PaLATE si può ricavare altresì un valore di indicatore di emissione per ciascun membro del modello; a differenza di ECORCE M, in cui il valore

⁷³ I risultati relativi all'applicativo *Athena Impact Estimator* non sono presenti in quanto non modificabili secondo i dati di input posti a confronto.

Per l'applicativo PaLATE si considera il solo contributo del primo termine, il quale è confrontabile direttamente con i risultati ottenuti con gli altri applicativi.

dell'indicatore di emissione è fornito direttamente come dato di input dall'applicativo, in PALATE esso può essere ricavato a partire da dati di inventario più specifici.

Quindi, per come è strutturato il modello matematico all'interno di PALATE, esso si può semplificare nel seguente modo:

$$\begin{aligned} & (emissioni\ CO_2 - e)_{trasporto\ impianto, strato\ i-esimo} [kg\ CO_2e] \\ & = vkm_{trasporto\ impianto, strato\ i-esimo} [km] \\ & \cdot (indicatore\ emissione_{1^o\ membro} [kg\ CO_2e/km] \\ & + indicatore\ emissione_{2^o\ membro} [kg\ CO_2e/km]) \end{aligned}$$

Analizzando i risultati ottenuti da ciascuno dei due applicativi, si nota una leggera sottostima rispetto a PaLATE dei risultati ottenuti con ECORCE M riguardo le emissioni relative al trasporto degli aggregati dal sito di estrazione all'impianto di produzione, mentre si evince una sovrastima per quanto riguarda le emissioni relative al trasporto del bitume dalla raffineria all'impianto di produzione e le emissioni relative al trasporto del conglomerato bituminoso dall'impianto di produzione al sito di costruzione. Nel caso delle emissioni relative al trasporto del bitume, si nota come in ECORCE M esse si avvicinino al valore delle stesse per il trasporto degli aggregati, mentre in PALATE la differenza tra i due valori è molto marcata: ciò è dovuto ad un approccio "standard" da parte di ECORCE M, il quale fornisce un valore di indicatore di emissione uguale per le tre fasi di trasporto, mentre nel caso di PALATE esso è modificabile a seconda del trasporto considerato. Questo si riflette allo stesso modo nella sovrastima dei risultati relativi al trasporto delle miscele di conglomerato bituminoso. Valutando quelli che sono i risultati relativi alle emissioni ottenute utilizzando gli stessi dati di input, si può notare come i risultati ottenuti con ECORCE M non risultino convergere a quelli di PaLATE: ciò si può facilmente dedurre per il fatto che l'unico dato di input confrontabile è la capacità dei mezzi di trasporto, la quale non risulta ponderante nella definizione delle emissioni.

Nel caso di asPECT invece i risultati differiscono per la differenza di approccio dei modelli, in quanto asPECT definisce degli indicatori di emissione basati sulla quantità di materiale trasportato, al contrario di PaLATE che utilizza, come riportato in precedenza, indicatori di emissione basati sui veicoli-chilometro; le divergenze di risultati sono altrettanto imputabili alla diversa natura dei dati di inventario. In particolare, nel caso delle emissioni relative al trasporto di aggregati e conglomerato bituminoso si ha una sovrastima dei valori rispetto a PaLATE, mentre nel caso del trasporto del bitume si ha una sottostima dei risultati. Al contrario di quanto evidenziato in ECORCE M, sebbene sussistano le differenze appena evidenziate, si mantiene il rapporto numerico tra le emissioni per il trasporto degli aggregati e le emissioni per il trasporto di bitume, le quali risultano distanti tra loro. Questa evidenza trova conferma nel fatto che all'interno di asPECT si possa personalizzare il trasporto a seconda dei mezzi utilizzati. Analizzando i risultati ottenuti con l'inserimento dei dati di capacità dei mezzi di trasporto considerati in PaLATE, si nota come vi sia un abbattimento dei risultati; ciò porta ad una leggera sottostima delle emissioni relative al trasporto degli aggregati, che convergono con differenza minima a quelli ottenuti con PALATE, ad una più marcata sottostima dei valori di emissione per quanto riguarda il trasporto di bitume ed una leggera sovrastima (assai più convergente) dei risultati relativi al trasporto di conglomerato bituminoso.

In riferimento allo strato di fondazione, non sono disponibili risultati in quanto l'applicativo non consente la definizione di un materiale differente da un materiale legato.

Athena Impact Estimator for Highways è stato considerato all'interno del confronto tra applicativi con utilizzo di dati di input eterogenei. Non essendo presente un modello matematico dettagliato come nel caso degli altri applicativi, sono presentati il solo risultato cumulativo di emissioni relative al trasporto in fase di

produzione, ovvero il contributo totale pari alla somma delle emissioni relative al trasporto di aggregati e bitume, per ciascuno strato di pavimentazione, ed il risultato relativo alle emissioni associate al trasporto del conglomerato bituminoso. In riferimento a tali valori, si può notare come Athena sovrastimi le emissioni rispetto a PaLATE in entrambi i valori di emissione, in particolare la sovrastima è trascurabile rispetto all'ordine di grandezza valutando le emissioni dovute al trasporto in fase di produzione, mentre nel caso del trasporto delle miscele bituminose la sovrastima raggiunge il doppio del valore di PaLATE.

A seguito di queste osservazioni, si può concludere che, considerando i risultati associati all'utilizzo di dati di inventario eterogenei, per quanto riguarda il trasporto di aggregati gli applicativi in questione offrono un risultato differente, rendendo difficoltoso un confronto. Le emissioni relative alla produzione di bitume trovano differenze nuovamente non trascurabili, per cui anche in questo caso un confronto non trova punti di convergenza evidenzabili; si nota comunque, nonostante le differenze appena espresse, come il rapporto tra i valori di emissione relativi al trasporto di aggregati e bitume sia rispettato nel caso di PaLATE ed asPECT, per cui si avvalorano le tesi di divergenze dovute ai dati di inventario più che al modello matematico. Tale similitudine non sussiste nel caso di ECORCE M, il quale opera in modo concettualmente differente. Le differenze così presentate si riflettono inoltre in un risultato cumulativo che potrebbe fuorviare l'utente, in quanto la somma delle emissioni dovute al trasporto di aggregati e bitume, se considerati come un unico contributo, fornisce un risultato simile per PaLATE ed asPECT, sebbene sussistano le differenze sopra descritte; ECORCE M, contrariamente, mostra una marcata sovrastima anche nel caso del risultato cumulativo. Considerando le emissioni relative alla produzione di conglomerato bituminoso le differenze tra i vari applicativi altrettanto evidenti, evidenziando una divergenza di risultati tra tutti gli applicativi. Analizzando i risultati ottenuti con l'applicazione di dati di inventario omogenei, i tre applicativi risultano convergere maggiormente tra loro nel caso delle emissioni relative al trasporto di aggregati, in particolare ECORCE M e asPECT forniscono risultati numericamente molto vicini, i quali divergono da PaLATE di una quantità trascurabile rispetto all'ordine di grandezza. Tale discorso non risulta valido per le emissioni relative al trasporto di bitume e miscela bituminosa, sebbene le differenze risultino leggermente inferiori.

Athena Impact Estimator for Highways presenta un risultato di emissioni relativo alla fase di produzione (somma di trasporto aggregati e trasporto bitume) che si attesta a metà tra quelli forniti da PaLATE ed asPECT, risultando, per questo, l'applicativo più prossimo alle stime offerte da PaLATE. Nel caso del trasporto di conglomerato bituminoso la sovrastima dei risultati risulta essere dello stesso ordine di grandezza di quelli relativi ad ECORCE M.

6.5 Dati di input per l'utilizzo dei mezzi di cantiere

Per la fase di utilizzo dei mezzi di cantiere si segue quanto operato nelle precedenti sezioni, ovvero si riportano i dati di input relativi ai differenti programmi di calcolo, omettendo i valori di massa delle miscele bituminose e del misto granulare utilizzati per la costituzione degli strati della pavimentazione, i quali risultano essere i medesimi.

I dati di input dei mezzi di cantiere considerati all'interno del presente elaborato sono stati assunti attraverso la consultazione del lavoro di (Celauro, 2017) e la consultazione delle schede tecniche relative a ciascun mezzo, in particolare si è assunto di utilizzare i seguenti mezzi:

- Finitrice (paver) modello Bomag BF 600;
- Rullo gommato modello Bomag BW 203 ad-4;
- Grader (livellatrice) modello CAT 12M2;

- Rullo compattatore modello Bomag BW 226 dh-4;

6.5.1 PaLATE

Il modello matematico utilizzato all'interno di PaLATE per la costituzione degli strati legati a bitume è il seguente⁷⁴:

$$\begin{aligned}
 & (emissioni)_{mezzi, strato legato i-esimo} [kg CO_2eq] \\
 & = \left(\frac{massa_{strato legato i-esimo} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo_{carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 & \quad \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot contenuto_{CO_2}_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] \\
 & \quad + \frac{massa_{strato legato i-esimo} [t]}{produttività_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo_{carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \\
 & \quad \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot contenuto_{CO_2}_{DIESEL} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] \left. \right) / 1000 \\
 & + \left(\frac{massa_{strato legato i-esimo} [t]}{produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot consumo_{carburante}_{FINITRICE} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 & \quad \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot fattore_{di emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \\
 & \quad \cdot fattore_{di conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] + \frac{massa_{strato legato i-esimo} [t]}{produttività_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{t}{h} \right]} \\
 & \quad \cdot consumo_{carburante}_{RULLO COMPATTATORE} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot densità_{DIESEL} \left[\frac{g}{l} \right] \\
 & \quad \cdot fattore_{di emissione}_{DIESEL} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot fattore_{di conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \left. \right) \\
 & / 1000000 / 1000
 \end{aligned}$$

Il modello matematico utilizzato all'interno dello stesso applicativo e relativo alla costituzione dello strato di fondazione è il seguente⁷⁵:

⁷⁴ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.1**

⁷⁵ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.1**

$$\begin{aligned}
& (\text{emissioni})_{\text{mezzi, fondazione}} [kg CO_2eq] \\
& = \left(\frac{\text{massa}_{\text{FONDAZIONE}} [t]}{\text{produttività}_{\text{GRADER}} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{GRADER}} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right]} \right. \\
& \quad \cdot \text{contenuto } CO_{2\text{DIESEL}} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] + \frac{\text{massa}_{\text{FONDAZIONE}} [t]}{\text{produttività}_{\text{RULLO GOMMATO}} \left[\frac{t}{h} \right]} \\
& \quad \cdot \text{consumo carburante}_{\text{RULLO GOMMATO}} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right] \\
& \quad \left. \cdot \text{contenuto } CO_{2\text{DIESEL}} \left[\frac{g CO_2eq}{g diesel} \right] \right) / 1000 \\
& + \left(\frac{\text{massa}_{\text{FONDAZIONE}} [t]}{\text{produttività}_{\text{GRADER}} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{GRADER}} \left[\frac{l}{h} \right] \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right]} \right. \\
& \quad \cdot \text{fattore di emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{shortons} \right] \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \\
& + \frac{\text{massa}_{\text{FONDAZIONE}} [t]}{\text{produttività}_{\text{RULLO GOMMATO}} \left[\frac{t}{h} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{RULLO GOMMATO}} \left[\frac{l}{h} \right] \\
& \quad \cdot \text{densità}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{l} \right] \cdot \text{fattore di emissione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{g}{shortons} \right] \\
& \quad \left. \cdot \text{fattore di conversione} \left[\frac{shortons}{t} \right] \right) / 1000000 / 1000
\end{aligned}$$

I dati di input relativi alla fase di utilizzo dei mezzi di cantiere sono riassunti di seguito:

PALATE	
Mezzi di cantiere	
<i>produttività finitrice (usura-binder-base) [t/h]</i>	1344
<i>consumo carburante finitrice (usura-binder-base) [l/h]</i>	43,10
<i>produttività rullo compattatore (usura-binder-base) [t/h]</i>	448
<i>consumo carburante rullo compattatore (usura-binder-base) [l/h]</i>	17
<i>produttività grader (fondazione) [t/h]</i>	5992
<i>consumo carburante grader (fondazione) [l/h]</i>	40
<i>produttività rullo gommato (fondazione) [t/h]</i>	1198
<i>consumo carburante rullo gommato (fondazione) [l/h]</i>	37,60
<i>densità diesel [g/l]</i>	848
<i>Contenuto CO₂ diesel [g CO₂eq/g diesel]</i>	3,67
<i>fattore di emissione produzione diesel [g CO₂eq/t diesel]</i>	543 404

Tabella 6.25 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere

I dati di input dei mezzi di cantiere considerati all'interno del presente elaborato sono stati assunti attraverso la consultazione del lavoro di (Celauro, 2017) e la consultazione delle schede tecniche relative a ciascun mezzo.

6.5.2 ECORCE M

Il modello matematico utilizzato all'interno di ECORCE M segue un approccio energetico, ovvero le emissioni di CO₂ equivalente si ottengono a partire da un valore di energia consumata da ciascun mezzo, a cui viene moltiplicato un indicatore di emissione, espresso in termini energetici (kg CO₂eq/MJ). Il modello matematico relativo all'utilizzo dei mezzi per la costituzione degli strati legati risulta essere così strutturato⁷⁶:

$$\begin{aligned}
 (\text{energia})_{\text{mezzi, strato } i\text{-esimo}} [MJ] &= \text{contenuto di calore}_{\text{diesel}} [MJ/l] \\
 &\cdot \left(\text{tempo di operazione}_{\text{FINITRICE}} [h] \cdot \text{consumo carburante}_{\text{FINITRICE}} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 &+ \text{tempo di operazione}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} [h] \\
 &\left. \cdot \text{consumo carburante}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} \left[\frac{l}{h} \right] \right)
 \end{aligned}$$

$$(\text{emissioni})_{\text{mezzi, strato } i\text{-esimo}} [kg \text{ CO}_2\text{eq}] = GWP [kg \text{ CO}_2\text{eq/MJ}] \cdot (\text{energia})_{\text{mezzi, strato } i\text{-esimo}} [MJ]$$

⁷⁶ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.3**

Il modello matematico relativo all'utilizzo dei mezzi per la costituzione dello strato di fondazione è il seguente⁷⁷:

$$\begin{aligned}
 & (energia)_{mezzi, fondazione} [MJ] \\
 & = \text{contenuto di calore}_{diesel} \left[\frac{MJ}{l} \right] \\
 & \cdot \left(\text{tempo di operazione}_{GRADER} [h] \cdot \text{consumo carburante}_{GRADER} \left[\frac{l}{h} \right] \right. \\
 & \left. + \text{tempo di operazione}_{RULLO GOMMATO} [h] \cdot \text{consumo carburante}_{RULLO GOMMATO} \left[\frac{l}{h} \right] \right) \\
 & (emissioni CO_2 - e)_{mezzi, fondazione} [kg CO_2 eq] = GWP [kg CO_2 eq/MJ] \cdot energia_{mezzi, fondazione} [MJ]
 \end{aligned}$$

I dati di input relativi alla fase di utilizzo dei mezzi di cantiere sono i seguenti:

ECORCE M	
Mezzi di cantiere	
<i>produttività finitrice (usura-binder-base) [t/h]</i>	1344
<i>produttività rullo compattatore (usura-binder-base) [t/h]</i>	448
<i>produttività grader (fondazione) [t/h]</i>	5992
<i>produttività rullo gommato (fondazione) [t/h]</i>	1198
<i>consumo carburante finitrice (usura-binder-base) [l/h]</i>	43,10
<i>consumo carburante rullo (usura-binder-base) [l/h]</i>	17
<i>consumo carburante grader (fondazione) [l/h]</i>	40
<i>consumo carburante rullo pneumatico (fondazione) [l/h]</i>	37,60
<i>tempo di operazione finitrice (usura) [h]</i>	0,35
<i>tempo di operazione finitrice (binder) [h]</i>	0,43
<i>tempo di operazione finitrice (base) [h]</i>	1,58
<i>tempo di operazione rullo (usura) [h]</i>	1,06
<i>tempo di operazione rullo (binder) [h]</i>	1,29
<i>tempo di operazione rullo (base) [h]</i>	4,75
<i>tempo di operazione grader (fondazione) [h]</i>	0,25
<i>tempo di operazione rullo pneumatico (fondazione) [h]</i>	1,27
<i>contenuto di calore diesel [MJ/l]</i>	35,70

Tabella 6.26 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere

⁷⁷ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.3**

I dati di inventario sono i medesimi utilizzati all'interno di PaLATE, sia per quanto riguarda i modelli dei mezzi utilizzati, sia per quanto riguarda i valori ad essi associati, seguendo quanto riportato nel lavoro di (Celauro, 2017) ed all'interno delle schede tecniche relative ai mezzi di cantiere precedentemente definiti. Il modello matematico, in questo caso, viene definito secondo quanto riportato all'interno della sezione *Environmental quality of construction products - Handbook on energy and transport data*, contenuta all'interno dell'FD P01-015 della Normativa Nazionale Francese, edizione 2006.

6.5.3 asPECT

Il modello matematico utilizzato all'interno di asPECT parte dalla definizione di un coefficiente di posa e compattazione (*laying and compacting*, come definito all'interno dell'applicativo) per ciascuno strato, il quale si presenta come indicatore di emissione; le emissioni relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere si ottengono moltiplicando l'indicatore di emissione per la massa di materiale costituente ciascuno strato.

Il modello matematico così descritto si presenta attraverso la seguente generica formulazione⁷⁸:

$$\begin{aligned}
 & \text{coefficiente laying and compacting}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 &= \left(\frac{\text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [t]}}{\text{produttività}_{\text{FINITRICE}} \left[\frac{\text{t}}{\text{h}} \right]} \cdot \text{consumo carburante}_{\text{FINITRICE}} \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right] \right. \\
 & \cdot \text{fattore conversione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{l}} \right] + \frac{\text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [t]}}{\text{produttività}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} \left[\frac{\text{t}}{\text{h}} \right]} \\
 & \cdot \text{consumo carburante}_{\text{RULLO COMPATTATORE}} \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right] \\
 & \left. \cdot \text{fattore conversione}_{\text{DIESEL}} \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{l}} \right] \right) / \text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [t]} \\
 \\
 & (\text{emissioni})_{\text{mezzi, strato } i\text{-esimo}} \text{ [kg CO}_2\text{eq]} \\
 &= \text{coefficiente laying and compacting}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [kg CO}_2\text{eq/t]} \\
 & \cdot \text{massa}_{\text{strato } i\text{-esimo}} \text{ [t]}
 \end{aligned}$$

I dati di input relativi alla fase di utilizzo dei mezzi di cantiere sono i seguenti:

ASPECT	
Mezzi di cantiere	
produttività finitrice (usura-binder-base) [t/h]	1344
consumo carburante finitrice (usura-binder-base) [l/h]	43,1
produttività rullo compattatore (usura-binder-base) [t/h]	448
consumo carburante rullo compattatore (usura-binder-base) [l/h]	17
fattore di conversione diesel [kg CO ₂ eq/l]	2,69

Tabella 6.27 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere

⁷⁸ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.2**

I dati di input sono i medesimi utilizzati all'interno di PaLATE, ugualmente a quanto riportato per il caso di analisi descritto con ECORCE M. La conversione dei consumi di carburante espressi in kg di CO₂ equivalente avviene attraverso l'utilizzo del "BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors"⁷⁹.

6.5.4 Athena Impact Estimator for Highways

L'applicativo segue lo stesso criterio di valutazione adottato per la valutazione delle emissioni relative alla produzione dei materiali. Si riporta a titolo di completezza la formula empirica utilizzata, relativa in questo caso specifico al trasporto dei materiali⁸⁰:

$$\begin{aligned}
 GWP [kg CO_2eq] &= GWA_{CO_2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CO_2)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
 &+ GWA_{CH_4} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ CH_4)_{strato\ i-esimo} [kg] \\
 &+ GWA_{N_2O} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg N_2O} \right] \cdot (emissione\ in\ aria\ N_2O)_{strato\ i-esimo} [kg]
 \end{aligned}$$

La definizione dei fattori di emissione GWA segue quanto riportato all'interno del database TRACI – versione 2.1, 2012, EPA.

Pur non essendo disponibile un modello matematico articolato, all'interno del quale è possibile esplicitare visivamente i dati di inventario inseriti nell'applicativo, si riportano per completezza all'interno della seguente tabella:

ATHENA	
Mezzi di cantiere	
<i>produttività finitrice (usura-binder-base) [t/giorno]</i>	10752
<i>consumo carburante finitrice (usura-binder-base) [l/t]</i>	0,032
<i>produttività rullo compattatore (usura-binder-base) [t/giorno]</i>	43488
<i>consumo carburante rullo compattatore (usura-binder-base) [l/t]</i>	0,073
<i>produttività grader (fondazione) [t/giorno]</i>	47936
<i>consumo carburante grader (fondazione) [l/t]</i>	0,007
<i>produttività rullo gommato (fondazione) [t/giorno]</i>	9584
<i>consumo carburante rullo gommato (fondazione) [l/t]</i>	0,031

Tabella 6.28 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere

I dati di input così riportati sono stati ricavati nel modo seguente, a partire dai dati presenti nel lavoro di (Celauro, 2017):

⁷⁹ BEIS's Greenhouse gas reporting: conversion factors, versione 2019.

⁸⁰ Per il valore dei singoli termini si consulti il **Paragrafo 5.3.4**

$$produttività_{FINITRICE} \left[\frac{t}{giorno} \right] = produttività_{FINITRICE,oraria} \left[\frac{t}{h} \right] \cdot n^{\circ}ore$$

in cui:

- $produttività_{FINITRICE,oraria} = 1344 \text{ t/h}$;
- $n^{\circ}ore = 8$, pari al numero di ore lavorative giornaliere del mezzo.

$$consumo\ carburante_{FINITRICE} \left[\frac{l}{t} \right] = \frac{consumo\ carburante_{FINITRICE,orario} \left[\frac{l}{h} \right]}{produttività_{FINITRICE,oraria} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

in cui:

- $produttività_{FINITRICE,oraria} = 1344 \text{ t/h}$;
- $consumo\ carburante_{FINITRICE,orario} = 43,1 \text{ l/h}$.

$$produttività_{RULLO\ COMPATTATORE} \left[\frac{t}{giorno} \right] = produttività_{RULLO\ COMPATTATORE,oraria} \left[\frac{t}{h} \right] \cdot n^{\circ}ore$$

in cui:

- $produttività_{RULLO\ COMPATTATORE,oraria} = 448 \text{ t/h}$;
- $n^{\circ}ore = 8$, pari al numero di ore lavorative giornaliere del mezzo.

$$consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE} \left[\frac{l}{t} \right] = \frac{consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE,orario} \left[\frac{l}{h} \right]}{produttività_{RULLO\ COMPATTATORE,oraria} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

in cui:

- $produttività_{RULLO\ COMPATTATORE,oraria} = 448 \text{ t/h}$;
- $consumo\ carburante_{RULLO\ COMPATTATORE,orario} = 17 \text{ l/h}$.

$$produttività_{GRADER} \left[\frac{t}{giorno} \right] = produttività_{GRADER,oraria} \left[\frac{t}{h} \right] \cdot n^{\circ}ore$$

in cui:

- $produttività_{GRADER,oraria} = 5992 \text{ t/h}$;
- $n^{\circ}ore = 8$, pari al numero di ore lavorative giornaliere del mezzo.

$$consumo\ carburante_{GRADER} \left[\frac{l}{t} \right] = \frac{consumo\ carburante_{GRADER,orario} \left[\frac{l}{h} \right]}{produttività_{GRADER,oraria} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

in cui:

- *produttività*_{GRADER,oraria} = 5992 t/h;
- *consumo carburante*_{GRADER,orario} = 40 l/h.

$$produttività_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{t}{giorno} \right] = produttività_{RULLO\ GOMMATO,oraria} \left[\frac{t}{h} \right] \cdot n^{\circ}ore$$

in cui:

- *produttività*_{RULLO GOMMATO,oraria} = 1198 t/h;
- *n°ore* = 8, pari al numero di ore lavorative giornaliere del mezzo.

$$consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO} \left[\frac{l}{t} \right] = \frac{consumo\ carburante_{RULLO\ GOMMATO,orario} \left[\frac{l}{h} \right]}{produttività_{RULLO\ GOMMATO,oraria} \left[\frac{t}{h} \right]}$$

in cui:

- *produttività*_{RULLO GOMMATO,oraria} = 1198 t/h;
- *consumo carburante*_{RULLO GOMMATO,orario} = 37,6 l/h.

6.6 Confronto dei dati di input e delle emissioni relative all'utilizzo dei mezzi di cantiere

Si procede al confronto diretto dei dati di input relativi all'utilizzo dei mezzi di cantiere per la costituzione degli strati che compongono la pavimentazione stradale oggetto dell'analisi, seguito da un confronto delle emissioni ottenute attraverso i diversi applicativi. A differenza delle due precedenti analisi riguardanti la produzione ed il trasporto dei materiali, in questo caso il confronto avrà come oggetto un solo gruppo di emissioni, in quanto i dati di input confrontabili all'interno dei diversi modelli matematici risultano essere già comuni tra loro, poiché derivano tutti dal lavoro di (Celauro, 2017), mentre i dati di inventario eterogenei agli applicativi in questione non risultano confrontabili tra loro e quindi non sostituibili.

Di seguito si riportano i dati di inventario comuni ai tre applicativi considerati, ovvero i valori di consumo, produttività e tempo di operazione utilizzati da ciascun applicativo per la definizione dei mezzi di cantiere⁸¹:

⁸¹ I dati relativi ai mezzi di cantiere utilizzati per la costituzione dello strato di fondazione in misto granulare (grader, rullo pneumatico) si riferiscono ai soli applicativi PaLATE ed ECORCE M, in quanto all'interno di asPECT non è prevista l'analisi per il suddetto strato, potendo definire solamente strati caratterizzati dall'impiego di miscele bituminose.

Mezzi di cantiere	
<i>produttività finitrice (usura-binder-base) [t/h]</i>	1344
<i>consumo carburante finitrice (usura-binder-base) [l/h]</i>	43,1
<i>produttività rullo (usura-binder-base) [t/h]</i>	448
<i>consumo carburante rullo (usura-binder-base) [l/h]</i>	17
<i>produttività grader (fondazione) [t/h]</i>	5992
<i>consumo carburante grader (fondazione) [l/h]</i>	40
<i>produttività rullo pneumatico (fondazione) [t/h]</i>	1198
<i>consumo carburante rullo pneumatico (fondazione) [l/h]</i>	37,6
<i>tempo di operazione finitrice (usura) [h]</i>	0,35
<i>tempo di operazione finitrice (binder) [h]</i>	0,43
<i>tempo di operazione finitrice (base) [h]</i>	1,58
<i>tempo di operazione rullo (usura) [h]</i>	1,06
<i>tempo di operazione rullo (binder) [h]</i>	1,29
<i>tempo di operazione rullo (base) [h]</i>	4,75
<i>tempo di operazione grader (fondazione) [h]</i>	0,25
<i>tempo di operazione rullo pneumatico (fondazione) [h]</i>	1,27

Tabella 6.29 – Dati di input omogenei ai tre applicativi

Ad essi si aggiunge un confronto tra i dati di input eterogenei tra i tre applicativi, i quali possono essere specifici di un solo applicativo, oppure comuni a più di essi ma differenti per quanto riguarda il loro valore. Si riportano nella seguente tabella:

Mezzi di cantiere	PALATE	ECORCE M	ASPECT
<i>fattore di conversione diesel [kg CO₂eq/l]</i>	-	-	2,69
<i>contenuto di calore diesel [MJ/l]</i>	35,8	35,7	-
<i>Contenuto CO₂ diesel [g CO₂eq/g diesel]</i>	3,67	-	-
<i>fattore di emissione produzione diesel [g CO₂eq/t diesel]</i>	543 404	-	-

Tabella 6.30 – Dati di input eterogenei ai tre applicativi

- Si riporta di seguito il confronto riguardante le emissioni di CO₂ equivalente ottenute con ciascun applicativo⁸², in relazione all'utilizzo dei mezzi di cantiere. A tal proposito, al fine di poter meglio confrontare i dati di output ottenuti, per l'applicativo PaLATE sono stati riportati i valori di emissione

⁸² Escluso l'applicativo *Athena Impact Estimator for Highway*.

relativi al solo primo membro del modello matematico, il quale risulta essere il contributo comune ai confini di sistema considerati dagli altri applicativi. Ugualmente a quanto effettuato in precedenza, si procede con una breve descrizione dei modelli matematici di ciascun applicativo e dei relativi dati di input, a cui segue un confronto tra i risultati ottenuti attraverso l'applicazione di tali modelli matematici. Il confronto, come già riportato in precedenza, riguarderà un solo gruppo di emissioni, in quanto la differenza tra dati di input eterogenei ed omogenei non sussiste secondo quello che sarebbe lo scopo del confronto.

USURA				
Mezzi di cantiere	PaLATE	ECORCE M	asPECT	Athena
<i>emissione CO₂eq mezzi [kg CO₂eq]</i>	143	151	143	145

Tabella 6.31 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di usura

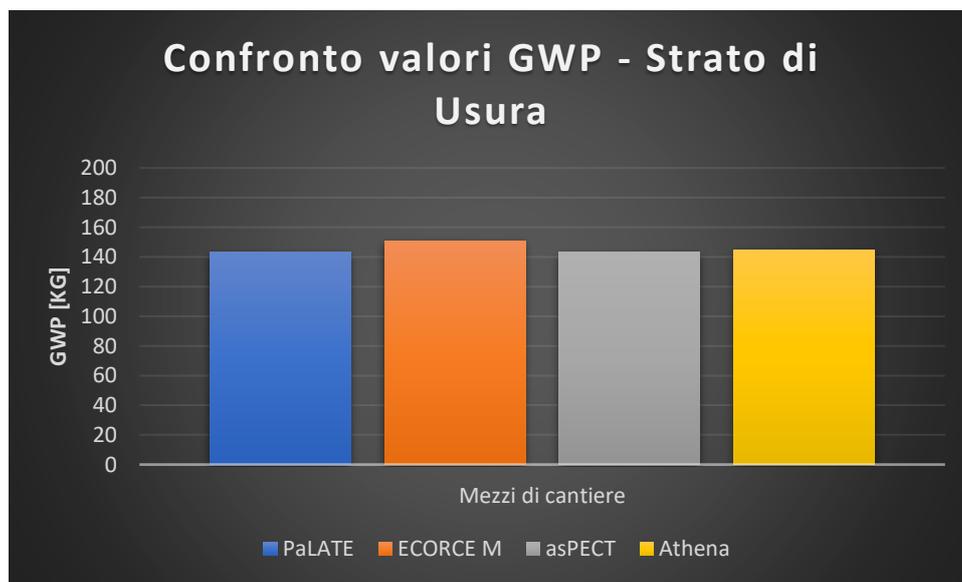


Figura 6.17 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di usura

BINDER				
Mezzi di cantiere	PaLATE	ECORCE M	asPECT	Athena
<i>emissione CO₂eq mezzi [kg CO₂eq]</i>	173	185	174	177

Tabella 6.32 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

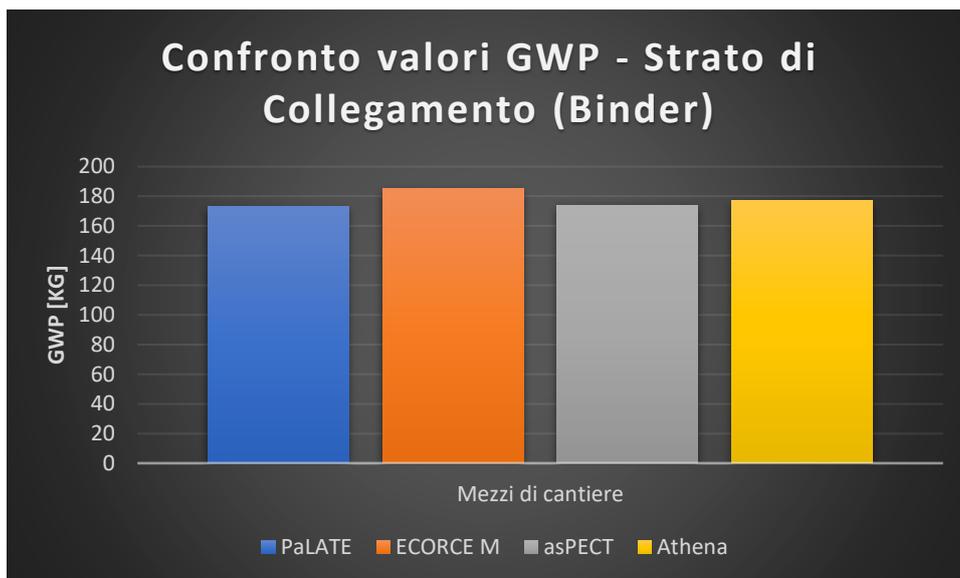


Figura 6.18 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)

BASE				
Mezzi di cantiere	PaLATE	ECORCE M	asPECT	Athena
emissione CO ₂ eq mezzi [kg CO ₂ eq]	632	680	638	649

Tabella 6.33 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di base

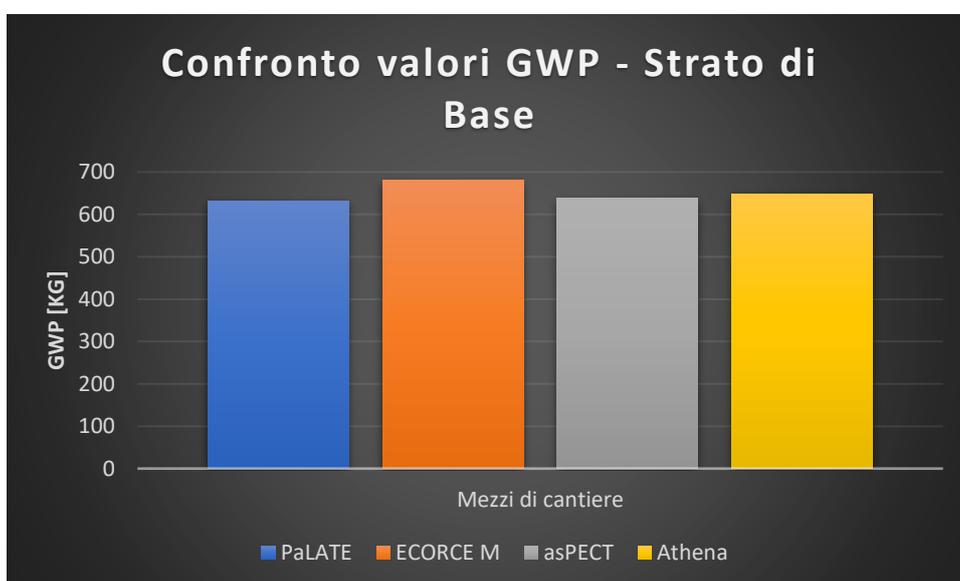


Figura 6.19 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di base

FONDAZIONE				
Mezzi di cantiere	PaLATE	ECORCE M	asPECT	Athena
emissione CO ₂ eq mezzi [kg CO ₂ eq]	144	176	-	168

Tabella 6.34 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di fondazione

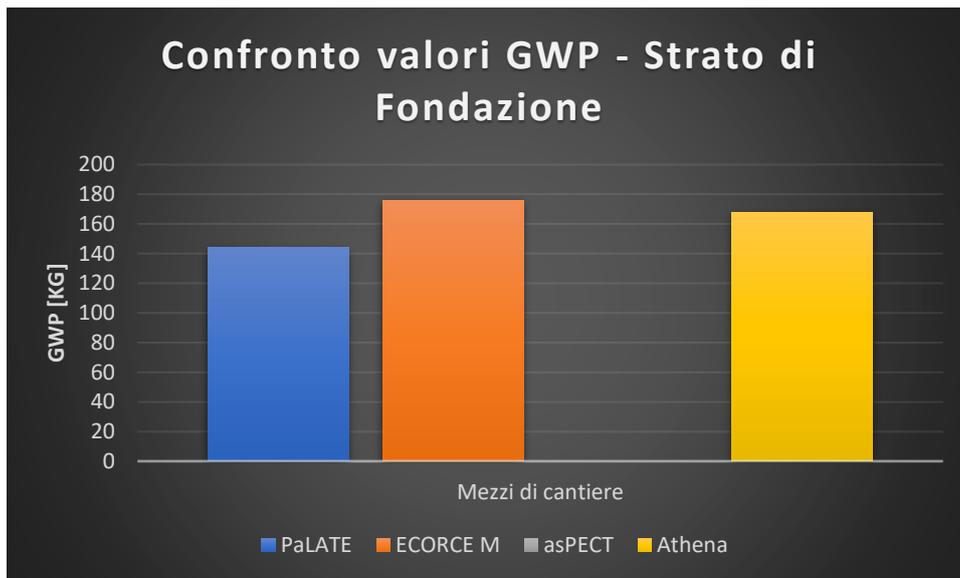


Figura 6.20 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di fondazione

Come si evince dalle tabelle, i risultati relativi alle emissioni di CO₂ equivalente risultano essere molto simili tra i vari applicativi, pur essendo differenti nella loro formulazione i modelli matematici alla base. Questa evidenza si può attribuire all'omogeneità dei dati di inventario utilizzati nei diversi applicativi, in quanto derivano comunemente dallo stesso lavoro di (Celauro, 2017), preso come riferimento per la compilazione degli inventari.

In particolare, analizzando i risultati relativi ad ECORCE M, si nota come essi sovrastimino in maniera minima gli output ottenuti con PaLATE, non variando in maniera sensibile nel loro valore assoluto, poiché essi sono i medesimi, eccezion fatta per il potere calorifico del diesel, il quale però varia con uno scarto dello 0,003% e quindi trascurabile ai fini del confronto tra le emissioni ottenute con i due applicativi. Per questo motivo la differenza minima che sussiste si può imputare ai due diversi approcci modellistici, in quanto PaLATE riferisce il proprio modello matematico alla quantità di materiale costituente gli strati della pavimentazione, mentre ECORCE M fa riferimento a valori energetici, senza considerare le suddette masse dei materiali.

L'analisi dei risultati ottenuti con asPECT porta ad una considerazione differente rispetto al precedente applicativo, in quanto si evince come essi si presentino pressoché identici ai medesimi output ottenuti con PaLATE, con uno scarto inferiore all'1% e dunque trascurabile. Questa evidenza è imputabile alla pressoché identica formulazione dei modelli matematici alla base dei due applicativi, sebbene asPECT utilizzi un fattore di conversione relativo al diesel che consenta di trasformare i litri di diesel impiegati in emissione in termine di kgCO₂eq che PaLATE non esplicita all'interno del proprio modello, utilizzando altresì dati di inventario relativi al contenuto di CO₂ nel diesel.

I risultati relativi ad Athena Impact Estimator for Highways seguono quello appena espresso per asPECT, ovvero essi si differenziano di uno scarto trascurabile rispetto ai risultati in output ottenuti con PaLATE. Pur non essendo disponibile un modello matematico dettagliato, ma una sola espressione empirica di conversione di emissioni in aria in emissioni in termini di CO₂ equivalente, si può affermare che l'applicativo lavora pressoché allo stesso modo di PaLATE, essendo identici i dati di inventario e trascurabilmente differenti i risultati in output.

Considerando i quattro applicativi nel loro insieme, si può affermare che la fase di utilizzo dei mezzi di cantiere, all'interno dell'analisi LCA condotta, fornisce i risultati più omogenei, con l'eccezione di ECORCE M che sovrastima leggermente rispetto agli altri tre applicativi, di una quantità comunque trascurabile ai fini dell'operazione di confronto oggetto di questo paragrafo. Questa estrema similitudine tra i risultati trova evidenza nell'omogeneità iniziale dei dati di input, i quali hanno peso maggiore rispetto alla formulazione dei modelli matematici ai fini del computo delle emissioni finali.

7. Conclusioni

Attraverso il presente lavoro di tesi, è stato condotto uno studio del ciclo di vita di una pavimentazione stradale (*Life Cycle Assessment – LCA*) attraverso l'utilizzo di quattro differenti applicativi *open source* e *free download*, con differenti funzionalità e differenti contesti geografici. L'obiettivo svolto è stato quello di valutare quanto la scelta di uno strumento di calcolo possa influenzare i risultati di LCA di una pavimentazione stradale, mediante un approccio "*cradle-to-laid*", ossia dall'estrazione delle materie prime sino alla costruzione della pavimentazione. Particolare attenzione è stata apprestata al grado di convergenza tra i risultati ottenuti con l'utilizzo di PaLATE ed i risultati ottenuti con gli altri tre applicativi.

Per il caso studio in esame, una pavimentazione stradale flessibile, sono stati utilizzati quattro differenti strumenti di calcolo:

- PaLATE, realizzato dal *Consortium on Green Design and Manufacturing* dell'Università della California, Barkley;
- asPECT, realizzato dal TRL (Transport Research Laboratory), in collaborazione con *Highways England, Mineral Products Association & Eurobitume UK*;
- ECORCE M, sviluppato dall'*IFSTTAR* (Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux);
- Athena Impact Estimator for Highways, realizzato dall'*Athena Sustainable Materials Insitute*.

I risultati indicano che sussistono delle variabilità all'interno dei computi di impatto ambientale ottenuti con i differenti applicativi, riguardanti la categoria di impatto GWP (*Global Warming Potential*), ossia quella legata alle emissioni di gas serra, responsabili del cambiamento climatico. In particolare, sono emerse le seguenti evidenze:

- I risultati ottenuti attraverso l'impiego di dati di input eterogenei, ovvero assegnando a ciascun applicativo i dati di inventario relativi ai propri database, risultano essere differenti tra loro per la diversa natura dei database a cui si riferiscono i singoli applicativi e per la differenza tra i modelli matematici alla base del computo delle emissioni di GWP;
- I risultati ottenuti attraverso l'impiego di dati di input omogenei, ovvero assegnando a ciascun applicativo i medesimi dati di inventario, relativi all'inventario utilizzato all'interno di PaLATE, differiscono in maniera molto meno marcata rispetto al caso precedente, in alcuni casi i risultati convergono perfettamente.

Questo evidenzia come la principale differenza di risultati sia dovuta alla differente provenienza dei dati di inventario, piuttosto che il diverso approccio matematico al computo delle emissioni. Infatti, i risultati numerici ottenuti in seguito all'impiego di dati d'inventario omogenei hanno mostrato una buona convergenza, mentre sono ristretti i casi in cui le divergenze persistono.

Emergono inoltre alcune criticità relative ad alcuni degli strumenti di calcolo analizzati:

- L'applicativo *asPECT* non consente la definizione dettagliata delle emissioni di GWP per quanto riguarda gli strati di pavimentazione non legati a bitume: lo strato di fondazione, in misto granulare, non presenta infatti evidenze numeriche poiché non è stato possibile definire un materiale differente da una miscela bituminosa;
- Dall'utilizzo dell'applicativo *Athena Impact Estimator* non è stato possibile dedurre dei modelli matematici dettagliati come nel caso degli altri tre strumenti di calcolo, in quanto il grande numero di variabili inserite per la determinazione delle emissioni di GWP non ha permesso di dedurre alcuna

formulazione matematica. Nello specifico, le emissioni sono state ricavate matematicamente attraverso la formula empirica descritta dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), la quale mette in relazione le emissioni in aria di CO₂ (anidride carbonica), CH₄ (metano) e N₂O (ossido nitroso);

- All'interno dell'applicativo *ECORCE M* non è possibile modificare la capacità dei mezzi di trasporto, che rimane univoca e pari a 20 tonnellate per carico.

Questo evidenzia l'affidabilità nell'utilizzo dell'applicativo *asPECT* per quanto riguarda il computo delle emissioni di CO₂ equivalente inerente agli strati legati a bitume, mentre non sono trattati con sufficiente dettaglio gli strati di pavimentazione differenti da questa tipologia e dunque non risulta possibile calcolarne dettagliatamente i contributi di impatto ambientale.

L'utilizzo di *Athena Impact Estimator* invece è consigliato per un'analisi di confronto del ciclo di vita delle pavimentazioni stradali, ovvero per confrontare i risultati relativi agli impatti ambientali ottenuti con altri applicativi, come avvenuto all'interno del presente lavoro, relativamente alla categoria di impatto del GWP, mentre risulta di difficile realizzazione determinare quali dati sperimentali influenzino maggiormente tali risultati, non essendo possibile ricavare un modello matematico dettagliato per ciascuna fase di analisi.

ECORCE M risulta altresì uno strumento di calcolo completo, con divergenze nel computo delle emissioni di GWP che sussistono maggiormente nel caso del trasporto dei materiali, dovute alla non possibilità di personalizzare i mezzi di trasporto per quanto riguarda il valore della capacità e quindi la difficoltà oggettiva nella omogeneizzazione dei risultati a quelli dell'applicativo di riferimento (PaLATE).

Sulla base dei risultati di questo caso studio, è possibile sostenere che l'utilizzo di differenti applicativi per il computo delle emissioni di gas serra (GWP) risulta fornire risultati pressoché convergenti (o divergenti di una quantità trascurabile rispetto all'ordine di grandezza dell'indicatore) nel caso in cui i database siano sviluppati a livello internazionale, oppure che i database locali siano sviluppati in modo tale da rispettare le normative internazionali relative ai requisiti di rappresentatività tecnica, geografica e temporale, migliorandone l'affidabilità.

Bibliografia

- AEA. (2012). Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting. Department of Energy and Climate Change. Department for Environmental, Food and Rural Affairs.
- Athena. (2014). The Athena impact estimator for highways. Athena Sustainable Materials Institute (online <http://www.athenasmi.org>).
- Balaguera A., Carvajal G. I., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation & Recycling* (132).
- Bare J. C., Norris G. A., Pennington D. W. McKone T. (2002). TRACI: The Tool for Reduction and Assessment. *Journal of Industrial Ecology*.
- Blengini G. A., Garbarino E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* (18).
- BSI. (2006). Environmental management: Life Cycle Assessment: Principles and framework. ISO EN BSI 14040. British Standard Institution (2006b).
- BSI. (2008). How to assess the carbon footprint of goods and services. Guide to PAS 2050.
- BSI. (2011). Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Publicly Available Specification 2050:2011.
- Capitolato ANAS. (2019). Le pavimentazioni stradali: Prontuario per la progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori sul piano viabile. Quaderno Tecnico n.17.
- Celauro C., Corriere F. Guerrieri M., Lo Casto B. (2017). Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road. *Journal of Cleaner Production* (142).
- Commissione E. (2011, 10 20). Raccomandazione 2011/696/UE della Commissione. GU L 275.
- Davis S. C., Boundy R. G. (2021). Transportation Energy Data Book: Edition 39. Oak Ridge National Laboratory.
- Del Frari A., Santagata E., Tsantilis L., Urbano L. (2021). Structural analysis and life cycle assessment of highway pavements containing nano-reinforced bituminous mixtures. Tesi di Laurea Magistrale. Torino.
- Eurobitume. (2011). Life Cycle Inventory: Bitumen. Bruxelles, Belgio.
- Eurobitume. (2020). The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen. Bruxelles, Belgio.
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Giavarini C. (2008). Hot-mix production: energy consumption and CO2 emissions. *Rassegna del bitume*, estratto dal n° 58/08.
- Goedkoop M. (1995). The Eco-indicator 95, Final Report.

Guinée J. B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., De Koning A., Van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H., De Bruijn H., Van Duin R., Huijbregts M. A. J. (2001). An operational guide to the ISO standards - Final report. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environmental and Centre of Environmental Science - Leiden University.

Huang Y. (2007). Life cycle assessment of use of recycled materials in asphalt pavements. PhD, Newcastle University.

Huang Y., Parry T. (2014). Pavement Life Cycle Assessment - Chapter 1.

IFSTTAR. (2014). ECO-comparator applied to Road Construction and Maintenance.

IPCC. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change.

ISO 14040. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles.

Li J., Xiao F., Lanfang Z., Amirhanian S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production* (233).

Masoni P., Scimìa E. (1999). Life Cycle Assessment: sviluppo di indicatori specifici per l'Italia per la fase di valutazione d'impatto. Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente.

Miglietta F., Santagata E., Chiappinelli G., Baglieri O., Tsantilis L. (2016). Protocolli di Prova e Modelli di Analisi per lo Studio del Comportamento Meccanico di Conglomerati Bituminosi Nano-Rinforzati. Torino.

Ministero della Salute. (2015). Direzione generale della prevenzione sanitaria. Direzione generale della comunicazione e dei rapporti europei e internazionali (www.salute.gov.it).

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. (2010). Concentrazione atmosferica degli inquinanti.

Passenger transport emissions factors. (2007). Department for Environmental Food and Rural Affairs.

Ravaioli S. (1996). Asphalt mix production technologies and environmental problems. *Rassegna del bitume*, estratto dal n° 26/96.

Ravaioli S. (2010). Asphalt plants: historical and economic considerations. *Rassegna del bitume*, estratto dal n° 66/10.

Santagata E., Baglieri O., Miglietta F., Tsantilis L., Riviera P. P. (2019). Impact of nanosized additives on the fatigue damage behaviour of asphalt mixtures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42 (12).

Santos J. M., Thyagarajan S., Keizer E., Fernandez Flores R., Flintsch G. (2017). Pavement life cycle assessment - a comparison of American and European tools. Pavment Life-Cycle Assessment Symposium, CHAMPAIGN, United States.

Stranddorf H. K., Hoffmann L., Schmidt A. (2005). Impact categories, normalisation and weighting in LCA. EDIP97-data. Danish Ministry of the Environment - EPA.

UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. (2019). (www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2019)

UNI EN 12597. (2014). Bitumen and bituminous binders.

Wayman M., Schiavi-Mellor I., Cordell B. (2020). Further guidance on the calculation of whole life cycle greenhouse gas emissions generated by asphalt. Part of the Pavement Embodied Carbon Tool (164).

World Road Association. (2015). Reducing the Life Cycle Carbon Footprint of Pavements. Technical Committee D.2 Pavements.

Indice delle figure

Figura 2.1 – Ciclo di vita di un prodotto da costruzione.....	5
Figura 2.2 – Fasi di LCA.....	7
Figura 2.3 – Processi all'interno del ciclo di vita di una pavimentazione stradale.....	8
Figura 2.4 – Tipologie di analisi LCA di una pavimentazione stradale.....	9
Figura 2.5 – Scelte metodologiche.. ..	10
Figura 3.1 – Inquadramento geografico A32.....	12
Figura 3.2 – Prescrizioni volumetriche e meccaniche per conglomerati bituminosi.....	14
Figura 3.3 – Estratto tabella 4.10 Capitolato ANAS.....	15
Figura 4.1 – Estratto foglio di calcolo Design, caratteristiche geometriche della pavimentazione stradale.....	19
Figura 4.2 – Estratto foglio di calcolo Design, caratteristiche materiali costituenti la pavimentazione stradale.....	19
Figura 4.3 – Estratto foglio di calcolo Initial construction.....	20
Figura 4.4 – Estratto foglio di calcolo Equipment.....	21
Figura 4.5 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, Diesel Carbon Content.....	22
Figura 4.6 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, fattori di emissione motori a diesel.....	22
Figura 4.7 – Estratto foglio di calcolo EMF Transport, Sector Table.....	22
Figura 4.8 – Estratto foglio di calcolo Equipment Details, mezzi e macchinari.....	23
Figura 4.9 – Estratto foglio di calcolo Equipment Details, impianti di produzione.....	23
Figura 4.10 – Estratto foglio di calcolo Environmental Results, valori totali di emissione.....	25
Figura 4.11 – Estratto foglio di calcolo Environmental Results, valori di emissione singoli strati pavimentazione.....	26
Figura 4.12 – Estratto foglio di calcolo Environmental Results, valori di emissione singoli materiali.....	26
Figura 4.13 – Fasi LCA analizzate all'interno di asPECT.....	27
Figura 4.14 – Sezione Materiali.....	29
Figura 4.15 – Scheda Basic data.....	29
Figura 4.16 – Scheda Heating & drying energy consumption.....	30
Figura 4.17 – Scheda Materials Transportation To Plant.....	31
Figura 4.18 – Scheda Mixtures.....	31

Figura 4.19 – Tempo di vita degli strati della pavimentazione in funzione del tipo di strada.....	32
Figura 4.20 – Scheda Material Transport To Site.....	33
Figura 4.21 – Scheda Asphalt Courses.....	34
Figura 4.22 – Scheda Asphalt Laying and Compacting.....	34
Figura 4.23 – Scheda Project Result Summary.....	35
Figura 4.24 – Fasi di operazione di ECORCE M.....	36
Figura 4.25 – Interfaccia grafica “Layers definition”.....	37
Figura 4.26 – Interfaccia grafica “Case study specification-Asphalt material formulation”.....	38
Figura 4.27 – Interfaccia grafica “Case study specification-Laying”.....	39
Figura 4.28 – Tabella dei materiali.....	40
Figura 4.29 – Emissioni GWP in valore assoluto.....	40
Figura 4.30 – Emissioni GWP in percentuale.....	41
Figura 4.31 – Emissioni GWP in forma grafica.....	42
Figura 4.32 – Scheda Project Information.....	43
Figura 4.33 – Scheda Roadway Information.....	44
Figura 4.34 – Scheda Roadway Information.....	44
Figura 4.35 – Scheda Construction equipment.....	45
Figura 4.36 – Scheda Material Transportation.....	45
Figura 4.37 – Inventario dei materiali.....	46
Figura 4.38 – Categorie di impatto ambientale.....	46
Figura 5.1 – Inventario per la produzione di 1 tonnellata di bitume.....	48
Figura 5.2 – Estratto del LCI all’interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	49
Figura 5.3 – Estratto del LCI all’interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	50
Figura 5.4 – Estratto del LCI all’interno del foglio di calcolo Equipment Details.....	50
Figura 5.5 – Tabella materiali.....	55
Figura 5.6 – Definizione percentuale aggregati all’interno del mix design.....	56
Figura 5.7 – Definizione percentuale bitume all’interno del mix design.....	57
Figura 5.8 – Interfaccia asPECT consumo di energia annuo.....	58
Figura 5.9 – Interfaccia asPECT emissione annua.....	58

Figura 5.10 – Interfaccia asPECT emissione media.....	59
Figura 5.11 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	60
Figura 5.12 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design.....	61
Figura 5.13 – Definizione percentuale bitume all'interno del mix design.....	62
Figura 5.14 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	64
Figura 5.15 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design.....	65
Figura 5.16 – Definizione percentuale aggregati all'interno del mix design.....	66
Figura 5.17 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	68
Figura 5.18 – Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo.....	70
Figura 5.19 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo.....	71
Figura 5.20 – Emissioni produzione materiali strato di usura.....	72
Figura 5.21 – Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo.....	73
Figura 5.22 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo.....	74
Figura 5.23 – Emissioni produzione materiali strato di collegamento.....	75
Figura 5.24 – Definizione percentuale aggregati all'interno dell'applicativo.....	76
Figura 5.25 – Definizione percentuale bitume all'interno dell'applicativo.....	77
Figura 5.26 – Emissioni produzione materiali strato di base.....	78
Figura 5.27 – Emissioni produzione materiali strato di fondazione.....	79
Figura 5.28 – GWP strato di usura (scala logaritmica).....	81
Figura 5.29 – GWP strato di collegamento (scala logaritmica).....	82
Figura 5.30 – GWP strato di base (scala logaritmica).....	82
Figura 5.31 – GWP strato di fondazione (scala logaritmica).....	83
Figura 5.32 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	86
Figura 5.33 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	86
Figura 5.34 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	87
Figura 5.35 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting.....	102
Figura 5.36 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting.....	102
Figura 5.37 – Interfaccia asPECT emissione media.....	103
Figura 5.38 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting.....	104

Figura 5.39 – Annex 7, Tab. 7d, 2012 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting.....	104
Figura 5.40 – Interfaccia asPECT emissione media.....	105
Figura 5.41 – Interfaccia asPECT emissione media.....	106
Figura 5.42 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	107
Figura 5.43 – Interfaccia asPECT emissione media.....	108
Figura 5.44 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	109
Figura 5.45 – Interfaccia asPECT emissione media.....	111
Figura 5.46 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	112
Figura 5.47 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	114
Figura 5.48 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	116
Figura 5.49 – Interfaccia asPECT risultati emissioni totali.....	118
Figura 5.50 – Emissioni trasporto materiali strato di usura.....	121
Figura 5.51 – Emissioni trasporto materiali strato di collegamento.....	124
Figura 5.52 – Emissioni trasporto materiali strato di base.....	126
Figura 5.53 – Emissioni trasporto materiali strato di fondazione.....	127
Figura 5.54 – GWP strato di usura (scala logaritmica).....	129
Figura 5.55 – GWP strato di collegamento (scala logaritmica).....	130
Figura 5.56 – GWP strato di base (scala logaritmica).....	131
Figura 5.57 – GWP strato di fondazione (scala logaritmica).....	132
Figura 5.58 – Foglio di calcolo Equipment: dati di inventario mezzi di cantiere per strati legati.....	135
Figura 5.59 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	135
Figura 5.60 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	136
Figura 5.61 – Estratto del LCI all'interno del foglio di calcolo EMF Transport.....	136
Figura 5.62 – Foglio di calcolo Equipment: dati di inventario mezzi di cantiere per strato granulare.....	141
Figura 5.63 – Risultati in output strato di usura.....	144
Figura 5.64 – Risultati in output strato di collegamento (binder).....	145
Figura 5.65 – Risultati in output strato di base.....	147
Figura 5.66 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario.....	149
Figura 5.67 – Risultati in output strato di usura.....	150
Figura 5.68 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario.....	151

Figura 5.69 – Risultati in output strato di collegamento (binder).....	152
Figura 5.70 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario.....	153
Figura 5.71 – Risultati in output strato di base.....	154
Figura 5.72 – Interfaccia ECORCE M inserimento dati di inventario.....	155
Figura 5.73 – Risultati in output strato di fondazione.....	156
Figura 5.74 – GWP strato di usura (scala logaritmica).....	157
Figura 5.75 – GWP strato di collegamento (scala logaritmica).....	158
Figura 5.76 – GWP strato di base.....	158
Figura 5.77 – GWP strato di fondazione.....	159
Figura 6.1 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei.....	166
Figura 6.2 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE).....	167
Figura 6.3 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei.....	167
Figura 6.4 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE).....	168
Figura 6.5 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input eterogenei.....	169
Figura 6.6 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE).....	170
Figura 6.7 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei.....	170
Figura 6.8 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE).....	171
Figura 6.9 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei.....	180
Figura 6.10 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE).....	181
Figura 6.11 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei.....	182
Figura 6.12 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE).....	183
Figura 6.13 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input eterogenei.....	184
Figura 6.14 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE).....	185
Figura 6.15 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei.....	185

Figura 6.16 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE).....	186
Figura 6.17 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di usura.....	198
Figura 6.18 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di collegamento (binder).....	199
Figura 6.19 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di base.....	199
Figura 6.20 – Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di fondazione.....	200

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di usura.....	15
Tabella 3.2 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di collegamento.....	16
Tabella 3.3 – Percentuale di bitume in massa e percentuale di vuoti per la miscela bituminosa strato di base.....	16
Tabella 3.4 – Caratteristiche volumetriche strato di fondazione.....	17
Tabella 5.1 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura.....	54
Tabella 5.2 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder).....	54
Tabella 5.3 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base.....	54
Tabella 5.4 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione.....	55
Tabella 5.5 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura.....	68
Tabella 5.6 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder).....	68
Tabella 5.7 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base.....	69
Tabella 5.8 – Indicatori unitari di emissione.....	69
Tabella 5.9 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura.....	79
Tabella 5.10 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento.....	79
Tabella 5.11 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base.....	79
Tabella 5.12 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione.....	80
Tabella 5.13 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di usura.....	83
Tabella 5.14 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di collegamento.....	83
Tabella 5.15 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di base.....	84
Tabella 5.16 – Riepilogo risultati produzione dei materiali strato di fondazione.....	84
Tabella 5.17 – Distanze di trasporto computate.....	85
Tabella 5.18 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura.....	100
Tabella 5.19 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder).....	100
Tabella 5.20 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base.....	100
Tabella 5.21 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione.....	100
Tabella 5.22 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura.....	118

Tabella 5.23 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder).....	118
Tabella 5.24 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base.....	119
Tabella 5.25 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura.....	127
Tabella 5.26 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder).....	128
Tabella 5.27 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base.....	128
Tabella 5.28 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione.....	128
Tabella 5.29 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di usura.....	132
Tabella 5.30 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder).....	132
Tabella 5.31 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di base.....	132
Tabella 5.32 – Riepilogo risultati trasporto dei materiali strato di fondazione.....	132
Tabella 5.33 – Dati di inventario mezzi di cantiere.....	133
Tabella 5.34 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura.....	142
Tabella 5.35 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder).....	142
Tabella 5.36 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base.....	142
Tabella 5.37 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione.....	142
Tabella 5.38 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura.....	147
Tabella 5.39 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder).....	147
Tabella 5.40 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base.....	147
Tabella 5.41 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura.....	156
Tabella 5.42 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder).....	156
Tabella 5.43 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base.....	156
Tabella 5.44 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione.....	156
Tabella 5.45 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di usura.....	159
Tabella 5.46 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di collegamento (binder).....	159
Tabella 5.47 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di base.....	160
Tabella 5.48 – Riepilogo risultati mezzi di cantiere strato di fondazione.....	160
Tabella 6.1 – Indicatori di emissione PaLATE.....	162
Tabella 6.2 – Indicatori di emissione ECORCE M.....	162
Tabella 6.3 – Indicatori di emissione asPECT.....	164

Tabella 6.4 – Confronto indicatori di emissione.....	165
Tabella 6.5 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei.....	166
Tabella 6.6 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE).....	166
Tabella 6.7 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei.....	167
Tabella 6.8 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE).....	168
Tabella 6.9 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input eterogenei.....	168
Tabella 6.10 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE).....	169
Tabella 6.11 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei.....	170
Tabella 6.12 – Confronto risultati produzione dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE).....	170
Tabella 6.13 – Dati di input PaLATE.....	175
Tabella 6.14 – Dati di input ECORCE M.....	176
Tabella 6.15 – Dati di input asPECT.....	178
Tabella 6.16 – Confronto tra i dati di capacità dei mezzi di trasporto.....	179
Tabella 6.17 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input eterogenei.....	179
Tabella 6.18 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di usura: dati di input omogenei (PaLATE).....	180
Tabella 6.19 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input eterogenei.....	181
Tabella 6.20 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di collegamento (binder): dati di input omogenei (PaLATE).....	182
Tabella 6.21 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input eterogenei.....	183
Tabella 6.22 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di base: dati di input omogenei (PaLATE).....	184
Tabella 6.23 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input eterogenei.....	185
Tabella 6.24 – Confronto risultati trasporto dei materiali strato di fondazione: dati di input omogenei (PaLATE).....	186
Tabella 6.25 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere.....	191
Tabella 6.26 – Dati di input utilizzo mezzi di cantiere.....	192

Tabella 6.27 – <i>Dati di input utilizzo mezzi di cantiere</i>	193
Tabella 6.28 – <i>Dati di input utilizzo mezzi di cantiere</i>	194
Tabella 6.29 – <i>Dati di input omogenei ai tre applicativi</i>	197
Tabella 6.30 – <i>Dati di input eterogenei ai tre applicativi</i>	197
Tabella 6.31 – <i>Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di usura</i>	198
Tabella 6.32 – <i>Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di collegamento (binder)</i>	198
Tabella 6.33 – <i>Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di base</i>	199
Tabella 6.34 – <i>Confronto risultati utilizzo mezzi di cantiere strato di fondazione</i>	199