Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Sessione di Laurea Ottobre 2022

Valutazione del ciclo di vita di pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso.

Life Cycle Assessment of asphalt road pavements.

Relatore:

Prof.ssa Lucia Tsantilis

Correlatori:

Prof. Pier Paolo Riviera

Prof. Giuseppe Chiappinelli

Candidata:

Francesca Rosato

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Indice 2
Indice delle figure 4
Indice delle tabelle 7
INTRODUZIONE 8
OBIETTIVI DELLA TESI 10
SOMMARIO 11
1. Life Cycle Assessment 15
1.1 Generalità, origini e norme 15
1.2 Struttura 21
1.3 Applicazione alle pavimentazioni stradali 31
1.4 Revisioni di studi e fonti LCA sulle pavimentazioni 36
1.5 STRIPPLE 37
1.6 EUROBITUME 38
2. IL SOFTWARE SIMAPRO 42
2.1 Un primo approccio col software 42
2.2 Le librerie di SimaPro 52
2.2.1 Ecoinvent 53
2.3 I metodi di valutazione dell'impatto 54
3. Revisione di uno studio presente in letteratura 56
3.1 Le basi dello studio colombiano 56
3.2 Caso Studio 57
3.2.1 LCI - Inventario 60
3.3 Implementazione sul software 61
3.4 Risultati 70
3.5 Confronto tra i diversi scenari analizzati 75
4. CASO STUDIO 77
4.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione 77
4.2 Analisi d'inventario 78
4.2.1 Composizione stratigrafica 79
4.2.2 Definizione delle distanze 90
4.3 Life Cycle Inventory 92

4.3.1 Life Cycle Inventory Bitume 92
4.3.2 Life Cycle Inventory Polimero 94
4.3.3 Life Cycle Inventory Aggregati vergini 97
4.3.4 Life Cycle Inventory RAP 99
4.3.5 Life Cycle Inventory Attrezzature 99
4.4 Modellazione rete su SimaPro 105
5. ANALISI DEI RISULTATI 116
6. CONCLUSIONI 125
Bibliografia 128

Indice delle figure

Figura 1 - Rappresentazione differenti tipologie di analisi LCA 15
Figura 2 - Adesione Protocollo di Kyoto (Fonte: Ansa) 18
Figura 3 - GWP (Fonte: Reteclima) 20
Figura 4 - Emissioni di gas climalteranti nel 2004 (Fonte: Ippc 2007).....20
Figura 5 - Struttura LCA 22
Figura 6 - Esempio inclusione input/output 25
Figura 7 - Modellazione consequenziale (Fonte: SimaPro 8 Introduction to LCA) 27
Figura 8 - Scelta della metodologia di valutazione d'impatto (Fonte: SimaPro 8 Introduction to LCA).....29
Figura 9 - Ciclo di vita di pavimentazioni: processi principali (Fonte: Huang, 2007)...32
Figura 10 - Input energetici per la produzione di HMA (Fonte: Stripple, 2000).....33
Figura 11 - Scelte metodologiche in studi LCA(BSI, 2006).....34
Figura 12 - Prodotti raffineria(Tecnologialanzi, 2019).....35
Figura 13 - Composizione sezione stradale analizzata da Stripple(Institute, March 2001).....37
Figura 14 - LCA strada (Institute, March 2001) 38
Figura 15 - Copertina "The bitumen LCI" 39
Figura 16 - Fasi LCA Bitume.....40
Figura 17 - Versione SimaPro.....42
Figura 18 - Finestra "Explorer analisi del ciclo di vita".....43
Figura 19 - Finestra "Wizard" 43
Figura 20 - Finestra "Obiettivo e ambito" ; Campo "Descrizione" 44
Figura 21 - Finestra "Obiettivo e ambito" ; Campo "Banche dati" 45
Figura 22 - Finestra "Inventario" ; Campo "Processi" 46
Figura 23 - Finestra "Inventario" ; Campo "Fasi del prodotto".....46
Figura 24 - Finestra "Inventario" ; Campo "Descrizione dei sistemi" 47
Figura 25 - Finestra"Inventario" ; Campo "Tipi di rifiuto".....47
Figura 26 - Finestra "Inventario" ; Campo "Parametri" 48
Figura 27 - Finestra "Valutazione dell'impatto" ; Campo "Metodi" 48
Figura 28 - Finestra "Valutazione dell'impatto" ; Campo "Impostazioni di calcolo" 49
Figura 29 - Finestra "Interpretazione" ; Campo "Interpretazione".....49
Figura 30 - Finestra "Interpretazione" ; Campo "Collegamenti documenti" 50
Figura 31 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Riferimenti bibliografici" 50
Figura 32 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Sostanze" 51
Figura 33 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Unità" 51
Figura 34 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Quantità".....52
Figura 35 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Immagini".....52
Figura 36 - Organizzazione Ecoinvent.....53
Figura 37 - Confini del sistema e processi principali.....57
Figura 38 - Stratigrafia pavimentazione HMA.....58
Figura 39 - Flow-chart iniziale di analisi 63

Figura 40 - Passaggi 1-2 comando "Trova" 64
Figura 41 - Passaggio 3 comando "Trova" 65
Figura 42 - Passaggio 4 comando "Trova" 65
Figura 43 - Passaggio 1 ricerca database Ecoinvent 66
Figura 44 - Passaggio 2 ricerca database Ecoinvent 67
Figura 45 - Passaggio 3 ricerca database Ecoinvent 67
Figura 46 - Passaggio 4 ricerca database Ecoinvent 68
Figura 47 - Macro-processo "Pavement" 69
Figura 48 - Rete macro-processo "Pavement" 70
Figura 49 - Rete "Pavement" con 496,86 ton di miscela 72
Figura 50 - Risultati singoli indicatori d'impatto 74
Figura 51 - Variazione relativa risultati differenti scenari(Daniela L. Vega A., 2022) 75
Figura 52 - Stratigrafie scenari 78
Figura 53 - Sezione stradale 78
Figura 54 - Caratteristiche strato di usura 81
Figura 55 - Caratteristiche strato di binder 83
Figura 56 - Caratteristiche strato di usura 85
Figura 57 - Emulsione bituminosa 88
Figura 58 - Organizzazione distanze e luoghi di lavorazione miscela ed emulsione 90
Figura 59 - LCI Bitume con infrastrutture 93
Figura 60 - Processo "Bitumen" creato su SimaPro 94
Figura 61 - Produzione di PMB (Fonte: Eutobitume 2012) 95
Figura 62 - LCI della produzione di 1 tonnellata di PMB senza infrastrutture 95
Figura 63 - LCI della produzione di 1 tonnellata di PMB con infrastrutture 96
Figura 64 - Dati input polimero 96
Figura 65 - Processo “Polymer Modified Bitumen (PMB)” creato su SimaPro 97
Figura 66 - Processo Ecoinvent "Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, {RoW}" 101
Figura 67 - Processo "Natural Aggregate transportation" 101
Figura 68 - Processo "Bitumen transportation" 102
Figura 69 - Processo "PMB transportation" 102
Figura 70 - Processo "Mixture transportation" 102
Figura 71 - Processo "Concrete transportation" 103
Figura 72 - Processo "Sprayer tank operation" 105
Figura 73 - Processi principali caso studio 106
Figura 74 - Analisi processi di dettaglio 2 107
Figura 75 - Esempio processo "Bituminous mixture (base)" implementato sul software 108
Figura 76 - Componenti del processo "Equipment (base)" 108
Figura 77 - Esempio processo "Equipment (base)" implementato sul software 109
Figura 78 - Rete "PACCHETTO STRADALE" (1 m^3) 109
Figura 79 - Componenti del processo “Fondazione” 110
Figura 80 - Rete processo "Fondazione (no rap)" 111

Figura 81 - Rete processo "Fondazione (rap)" 112
Figura 82 - Componenti del processo “Sottofondazione” 113
Figura 83 - Processo "Pavimentazione sostenibile" 113
Figura 84 - Rete "Pavimentazione sostenibile" 114
Figura 85 - Processo "Pavimentazione standard" 114
Figura 86 - Rete "Pavimentazione standard" 115
Figura 87 – Confronto TRACI 117
Figura 88 - Confronto IPCC 121
Figura 89 - Contributo degli strati della pavimentazione al GW (TRACI) 122
Figura 90 - Contributo percentuale strati al GW (TRACI) 122
Figura 91 - Contributo degli strati della pavimentazione al GW (IPCC) 123
Figura 92 - Contributo percentuale strati al GW (IPCC) 123

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Confronto LCI bitume con e senza infrastrutture 41
Tabella 2 - Composizione e caratteristiche miscele 59
Tabella 3 - Dati input Pitra Pave 1.0.0 60
Tabella 4 - Output Pitra Pave 1.0.0 60
Tabella 5 - Inventario LCA 61
Tabella 6 - Dati input processo "Loader operation" 68
Tabella 7 - Confronto risultati ottenuti con quelli pubblicati da Vega A. et al. 74
Tabella 8 - Quantitativi di materiale strato di fondazione(Santagata E., 2013) 80
Tabella 9 - Masse componenti strato di usura 82
Tabella 10 - Quantità materiali strato di usura 83
Tabella 11 - Masse componenti strato di binder 84
Tabella 12 - Quantità materiali strato di binder 85
Tabella 13 - Masse componenti strato di base 86
Tabella 14 - Quantità materiali strato di base 87
Tabella 15 - Caratteristiche emulsione bituminosa 88
Tabella 16 - Mano di attacco 89
Tabella 17 - Mano di ancoraggio 89
Tabella 18 - Distanze e modalità di trasporto 91
Tabella 19 - Distanze strati legati miscela secca 91
Tabella 20 - Distanze di trasporto materiale per fondazione e sottofondazione 92
Tabella 21 - LCI Aggregate (quarry) 98
Tabella 22 - LCI Quarry infrastructure 98
Tabella 23 - LCI Recultivation 99
Tabella 24 - Mezzi di cantiere 103
Tabella 25 - Produttività macchine di cantiere 104
Tabella 26 – Processo "Bituminous mixture" 108
Tabella 27 - Confronto metodo TRACI 117
Tabella 28 - Emissioni strato di fondazione 120

INTRODUZIONE

Realizzare una nuova pavimentazione stradale implica creare a un imponente cantiere, arricchito da importanti risorse naturali, umane e industriali. In un contesto mondiale volto alla realizzazione di strutture a impatto zero, anche l'ingegneria stradale sta sviluppando tecniche di costruzione eco-friendly.

È sotto tali prospettive che nascono le idee per il presente lavoro di tesi: ad oggi è possibile costruire sovrastrutture stradali ecologiche ed innovative meno impattanti, grazie al riutilizzo di materiale stradale.

Per dar vita a tali progetti, è necessario eseguire preliminarmente valutazioni ambientali, attraverso studi LCA (Life Cycle Assessment). LCA nasce agli inizi degli anni '90, periodo in cui le problematiche ambientali diventano gli argomenti principali di ogni Conferenza internazionale.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è applicare la metodologia LCA per la valutazione dell'impronta ambientale di una sezione stradale tipo in conglomerato bituminoso. In particolare, sono stati confrontati due casi studio: uno riguardante una pavimentazione ad impatto ridotto per la presenza di fresato riciclato (Reclaimed Asphalt Pavement) nello strato di fondazione, e l'altro riguardante una pavimentazione classica in conglomerato bituminoso.

Tuttavia, al fine di validare i risultati ottenuti, è stata effettuata una accurata ricerca in letteratura su studi analoghi effettuati in Europa e nelle altre nazioni. L'approccio utilizzato è stato del tipo "cradle to gate", e pertanto sono stati implementati cicli di vita di pavimentazioni a partire dalle fasi di recupero ed estrazione delle materie prime, fino alla fase di costruzione delle sovrastrutture.

Il presente lavoro di tesi si compone di sei capitoli organizzati nel modo seguente:

- Capitolo 1: si propone una introduzione generale sulla metodologia LCA e i suoi sviluppi, con approfondimento al caso delle pavimentazioni stradali.
- Capitolo 2: si propone un excursus sul software SimaPro, ponendo l'attenzione ai comandi principali utilizzati nel presente lavoro di tesi.
- Capitolo 3: si ripropone une revisione del caso studio di partenza pubblicato da Vega A. et al.
- Capitolo 4: si propone lo studio LCA comparativo di una pavimentazione in conglomerato bituminoso standard e di una pavimentazione in conglomerato bituminoso contenente materiale da riciclo.
- Capitolo 6: si sintetizzano i risultati ottenuti.

I risultati ottenuti mostrano come l'utilizzo di materiale di recupero comporta notevoli riduzioni di emissioni in atmosfera.

Punto di partenza per l'implementazione di un caso studio sul software SimaPro è stato la revisione di uno presente in letteratura. Attraverso tale revisione è stato possibile, infatti, realizzare un modello di partenza per cicli di vita di pavimentazioni.

Successivamente, è stato analizzato un nuovo caso studio. L'analisi ha affrontato un confronto tra una pavimentazione sostenibile e una standard in conglomerato bituminoso. L'aspetto innovativo è legato al solo strato di fondazione della pavimentazione, che ha rappresentato la base di confronto tra le due.

Come sarà evidente in seguito, la presenza di RAP all'interno dello strato di fondazione, può rappresentare un aspetto ecosostenibile per le costruzioni stradali.

Attraverso il presente lavoro di tesi, si vuole soltanto porre le basi per futuri studi LCA sulle pavimentazioni stradali, affinché si possa rendere ancora più sostenibile l'ingegneria stradale.

OBIETTIVI DELLA TESI

La costruzione e manutenzione di sovrastrutture stradali richiede ingenti quantità di materiali, e restituisce altrettanto importanti quantità rifiuti. Come del resto tutti i settori industriale, anche in ambito ingegneristico la ricerca sta sperimentando nuove tecniche costruttive a minor impatti ambientale. Tra queste, la più diffusa introduce il fresato riciclato come materia prima per la realizzazione di sovrastrutture stradali.

È sotto tali premesse che prendono forma gli obiettivi principali di tale lavoro di tesi.

Innanzitutto, l'obiettivo cardine perseguito è stato affrontare ed implementare uno studio LCA. A supporto di ciò, sono stati revisionati testi e studi presenti in letteratura, riferiti all'ambito europeo e mondiale. Condurre uno studio LCA implica affrontare ostacoli differenti, legati principalmente ai confini dell'analisi che si affronta. È richiesto pertanto un livello di praticità avanzato al riguardo.

Il secondo obiettivo è stato sperimentare la suddetta metodologia sul software commerciale SimaPro. Anche in questo caso, importante è stato l'utilizzo di ausili tra cui la guida presente e installata sul software e l'implementazione di altri casi banali, riguardanti problematiche completamente differenti dall'oggetto del presente lavoro di tesi.

La fase successiva ha voluto provare l'esperienza maturata fino a tal punto, al fine di riprodurre un caso presente in letteratura sulle pavimentazioni stradali. Conseguentemente, il terzo obiettivo è stato verificare il grado di confidenza acquisito col software e la metodologia LCA, riproducendo un modello per sovrastrutture stradali presente in letteratura. È stato analizzato il ciclo di vita di una sezione di pavimentazione flessibile, tipica di un'autostrada colombiana, e si è condotto un confronto tra i risultati ottenuti e quelli ricavati da letteratura.

Una volta quindi l'analisi condotta è risultata soddisfacente, l'obiettivo finale è stato implementare un proprio caso studio. A tal riguardo, è stata condotta un'analisi comparativa attraverso cui è stato valutato l'impatto ambientale del ciclo di vita di una pavimentazione stradale contenente materiale da recupero, rispetto ad una pavimentazione stradale classica.

SOMMARIO

Pensando ad attività ricadenti in ambito industriale, la mente umana spazia tra processi che, per essere realizzati, necessitano di risorse e riemettono emissioni in atmosfera. Qualsiasi lavorazione restituisce benefici per l'uomo, ma, tuttavia, nasconde aspetti negativi: emissioni di gas serra, sversamenti al suolo e in acqua di sostanze dannose per la salute umana e l'ecosistema terrestre.

La problematica ambientale è ad oggi discussa in ogni settore, e si concretizza in norme standardizzate e programmi d'azione volti allo sviluppo sostenibile. Infatti, è noto come definendo obiettivi da raggiungere, evitando sprechi e favorendo il riutilizzo di risorse, è possibile compiere passi importanti per prendersi cura e salvaguardare il Pianeta.

È sotto tali premesse che nasce e si sviluppa la metodologia di valutazione ambientale del ciclo di vita di beni e/o servizi, o LCA (Life Cycle Assessment).

Questa metodologia rappresenta uno strumento efficace e apprezzabile d'indagine che restituisce risultati validi, in ogni ambito di applicazione, tra cui quello dell'ingegneria stradale. D'altronde, anche in ambito stradale, la ricerca evolve nella direzione di riciclo e riutilizzo, il che, come provato, comporta vantaggi economici ed ambientali.

In particolare, le nuove tecniche di costruzione stradale favoriscono il riutilizzo di materiale fresato (Reclaimed Asphalt Pavement), ottenuto dalla scarifica delle pavimentazioni ammalorate, soprattutto nello strato di fondazione di nuove sovrastrutture.

Il desiderio di indagare e modellare scenari sostenibili hanno posto le basi per la stesura del presente lavoro di tesi.

L'obiettivo principale dell'analisi proposta consiste nell'applicazione della metodologia LCA al caso specifico delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso, per il cui svolgimento è stato utilizzato il software commerciale SimaPro.

Il seguente percorso di tesi ha riguardato l'implementazione di due casi studio seguendo un approccio "cradle-to-gate".

In primo luogo, è stato ripercorso il ciclo di vita di una pavimentazione flessibile standard composta da un pacchetto stradale in conglomerato bituminoso e una fondazione in misto granulare. Successivamente, nel secondo caso, si è ricreata una pavimentazione a minor impatto, differente dalla precedente principalmente per la composizione dello strato di fondazione. In questo caso, infatti, si è voluto indagare l'impatto derivante dall'utilizzo di materiale da riciclo nello strato di fondazione in misto granulare stabilizzato a cemento.

Parlando di analisi “cradle-to-gate”, i confini del sistema hanno inglobato le fasi di realizzazione della pavimentazione stradale, a partire dall’estrazione e produzione delle materie prime per la miscela e le successive lavorazioni necessarie a restituire l’opera finita. Pertanto, le fasi successive a quella di costruzione della pavimentazione non sono state oggetto di analisi: rispettivamente, utilizzo, manutenzione e abbattimento con, eventualmente, recupero di materiale.

Si è potuto osservare come l’utilizzo di materiale riciclato comporta vantaggi ambientali ed economici. Difatti, gli strati di fondazione sono quelli che, più degli altri, necessitano di maggiori quantità di materiale. Pertanto, favorendo l’impiego di materiale riciclato, si preserva l’estrazione di aggregati vergini e si abbattono le emissioni derivanti dalle lavorazioni necessarie a renderli adatti in ambito stradale.

Tuttavia, anche gli aggregati riciclati, prima di arrivare in cantiere, necessitano di alcuni trattamenti, come la vagliatura. Di conseguenza, anche il loro utilizzo implicherà emissioni in aria, acqua e suolo.

Con il presente lavoro di tesi si vuole, quindi, proporre un modello di valutazione ambientale per le pavimentazioni stradali, da utilizzare successivamente per lo sviluppo di futuri cicli di vita di pavimentazioni sostenibili.

ABSTRACT

Thinking about industrial activities, the human mind ranges between processes which, in order to be implemented, require resources and re-emit emissions into the atmosphere. All processes provide benefits for humans, but, nevertheless, hide negative aspects: emissions of greenhouse gases, spills on the ground and in water of substances harmful to human health and the terrestrial ecosystem.

The environmental problem is currently discussed in every sector, and it is concretized in standardized rules and action programs aimed at sustainable development. In fact, it is known that by defining objectives to be achieved, avoiding waste and encouraging the reuse of resources, it is possible to take important steps to take care and save the Planet.

It is under these premises that the methodology for assessing the life cycle of goods and / or services, or LCA (Life Cycle Assessment), was born and developed in the environment.

This methodology represents an effective and valuable investigation tool that gives valid results, in every field of application, including that of road engineering. On the other hand, even in the road sector, the research is evolving in the direction of recycling and reuse, which, as proven, has economic and environmental benefits.

In particular, the new road construction techniques favor the reuse of recycled material (Reclaimed Asphalt Pavement), obtained from the scarification of deteriorated pavements, especially in the foundation layer of new superstructures.

The desire to investigate and model sustainable scenarios laid the foundations for this thesis work.

The main objective of the proposed analysis is the application of the LCA methodology to the specific case of road pavements in bituminous conglomerate, for which the commercial software SimaPro was used.

The following thesis path involved the implementation of two case studies following a "cradle-to-gate" approach.

First, the life cycle of a standard flexible pavement consisting of a road package in bituminous conglomerate and a foundation in granular mix was retraced. Subsequently, in the second case, an innovative pavement was recreated, different from the previous one mainly due to the composition of the foundation layer. In this case, in fact, we wanted to investigate the impact deriving from the use of recycled material in the foundation layer in a cement-stabilized granular mixture.

Speaking of "cradle-to-gate" analysis, the system boundaries have encompassed the stages of construction of the road pavement, starting with the extraction and production of raw materials for the mixture and the subsequent processing necessary to return the finished work. Therefore, the phases subsequent to that of construction of the

pavement were not subject to analysis: respectively, use, maintenance and demolition with, possibly, recovery of material.

It has been observed that the use of recycled material has environmental and economic benefits. In fact, the foundation layers are those which, more than the others, require the greatest quantities of material. Therefore, by encouraging the use of recycled material, the extraction of virgin aggregates is preserved and the emissions resulting from the processing necessary to make them suitable for the road are reduced.

However, even the recycled aggregates, before arriving on construction site, need some treatments, such as screening. Consequently, their use will also involve emissions into air, water and soil.

With this thesis work, therefore, we want to propose an environmental assessment model for road pavements, to be used later for the development of future life cycles of sustainable pavements.

1. Life Cycle Assessment

1.1 Generalità, origini e norme

Il Life Cycle Assessment (LCA), in italiano noto come Valutazione del Ciclo di Vita, di un prodotto e/o servizio è una tecnica di analisi del ciclo di vita di un prodotto e/o servizio oramai ampiamente diffusa nei settori industriali. Attraverso tale metodologia è possibile, infatti, valutare l'impronta ambientale di un prodotto e/o servizio, in ognuna delle fasi che ne costituiscono il ciclo di vita (Reteclima.it).

L'analisi, difatti, include tutti i passaggi di un generico ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime, alla produzione, distribuzione, uso e dismissione finale del prodotto. Per ciascuna di queste fasi è quindi possibile definire gli impatti ambientali e, per ultimo, l'impatto globale del prodotto oggetto di studio.

In funzione delle fasi che si prendono in conto è possibile definire tre differenti tipi di analisi:

- "cradle to gate" o "dalla culla al cancello": dall'estrazione di materie prime alla costruzione del prodotto e/o servizio;
- "cradle to grave" o "dalla culla alla tomba": dall'estrazione di materie prime all'uso e consumo del prodotto e/o servizio;
- "cradle to cradle" o "dalla culla alla culla": dall'estrazione di materie prime al riciclo e riutilizzo del prodotto e/o servizio.

Conclusa l'analisi è possibile pertanto definire l'impronta ambientale del prodotto e/o servizio in esame, in relazione a "categorie d'impatto" preventivamente individuate insieme alla metodologia di valutazione d'impatto.

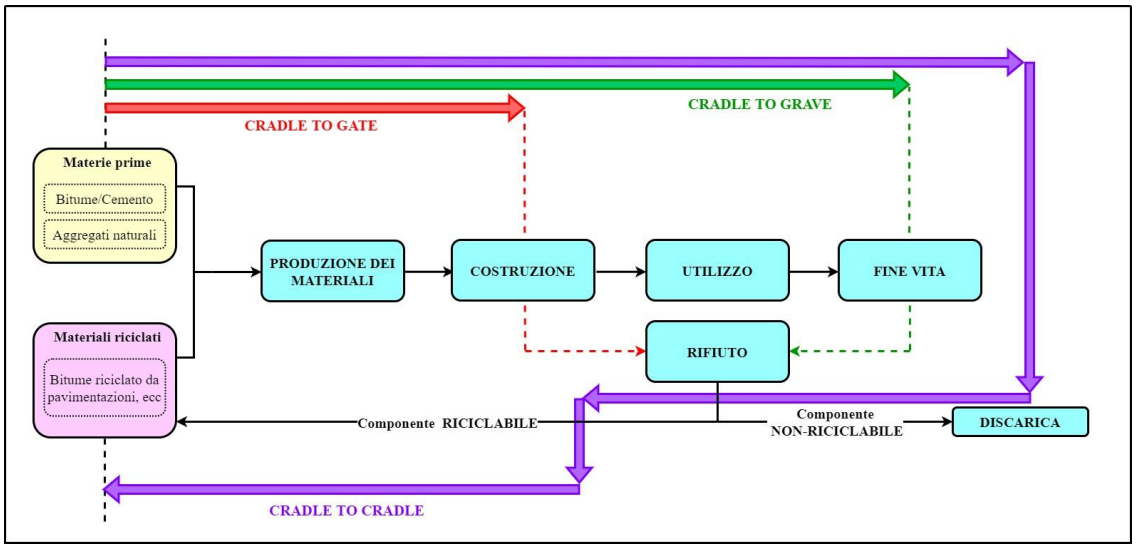


Figura 1 - Rappresentazione differenti tipologie di analisi LCA

Le origini

L'interesse verso le conseguenze ambientali di qualsiasi processo prettamente industriale inizia a concretizzarsi intorno ai primi anni '60 dello scorso secolo, periodo in cui si consolida l'idea che per parlare di impatto ambientale di un prodotto e/o servizio bisogna tenere in conto di ciascuno degli step che ne compongono il ciclo di vita: dalle origini delle sue componenti primarie, al prodotto finito e al suo smaltimento. Da tale idea difatti risulta il concetto di analisi "cradle to grave", propriamente dalla culla alla tomba, dall'origine delle materie prime al prodotto ultimo.

Viene introdotto così il "Enviromental Life Cycle Thinking" (ELCT), traduzione inglese di "concetto del ciclo di vita ambientale"(EconomiaCircolare.com). Appare da subito una novità in quanto per la prima volta non ci si limita semplicemente ad un generico processo produttivo, ma si guarda ad una valutazione a lungo termine dell'output ambientale del prodotto e/o processo studiato, comprendendo ciascuno dei passaggi che intercorre tra l'idea di realizzazione di un prodotto e/o processo e la sua materiale creazione.

Il primo approccio è stato rivolto verso le indagini "Eco balance, Energy and Enviromental profile analysis", indagini volte al contenimento dei consumi energetici e al monitoraggio dei reflui e delle emissioni nell'ambiente. L'innovazione consiste nella ricerca e nel monitoraggio ambientale dell'intera filiera di produzione di ciò che si sta analizzando, inglobando così ciascuno dei settori che contribuiscono alla realizzazione dell'output finale.

Evoluzione del Life Cycle Thinking (LCT) si è dimostrato il pensiero di "cradle to grave analysis and life cycle analysis", appunto LCA, nello stesso periodo in cui matura l'idea di valutazione dell'intero ciclo di vita del prodotto e/o servizio.

Alla luce di tali aspetti, negli Stati Uniti d'America, nei primi anni '70, l'Agenzia di protezione ambientale, nota come EPA (Environmental Protection Agency), intraprende un percorso di sensibilizzazione ambientale, promovendo le indagini REPA (Resource and Environmental Profile Anaysis), attraverso le quali si realizza una analisi comparativa di cicli di vita delle materie prime principali utilizzate nelle grandi industrie americane quali Coca Cola, Mobil Chemical Company e simili (lists.peacelink.it).

Coca Cola ad esempio sviluppa un'analisi volta a stabilire gli output ambientali della produzione di differenti recipienti per bevande, al fine di identificare il materiale meno impattante a livello ambientale ed energetico tra plastica, vetro ed alluminio.

Parallelamente a ciò, anche in ambito scientifico si osserva un interesse verso tali aspetti: la ricerca scientifica infatti inizia ad affrontare problematiche ambientali quali l'esaurimento graduale delle risorse del nostro pianeta, il loro eccessivo consumo e sfruttamento e le oramai evidenti conseguenze ambientali, preso atto che non esistono

processi produttivi ad impatto ambientale ed energetico nullo. Si diffonde quindi l'idea che bisogna comunque produrre ma valutando le alternative migliori.

L'input di avvio alla metodologia LCA in Europa è stato il *"Manuale di analisi energetica"* (*Handbook of industrial Energy analysis*)(Phoresta.org, 2021), pubblicato nel 1979 da Bouestead e Hancock, il quale ha posto le basi alla attuale metodologia LCA ed è stato da supporto per le analisi ambientali delle grandi compagnie industriali.

Tuttavia, il termine LCA appare per la prima volta nel linguaggio internazione nel 1990, in occasione del congresso Setac (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), con l'obiettivo di dar vita ad un termine e quindi ad una metodologia universale.

Regolamentazione e norme

La Conferenza di RIO 1992

Il primo interesse verso la sensibilizzazione ambientale viene dichiarato dagli Stati costruenti le Nazioni Unite nel 1992 con la Conferenza di Rio. In occasione di tal evento, 172 Paesi affrontavano problematiche sociali, economiche ed ambientali che accentuavano le disparità tra Paesi industrializzati e Paesi in via di sviluppo.

Risultato di tale conferenza sono stati:

- 3 accordi non vincolanti a livello internazionale: l'Agenda 21, la Dichiarazione di Rio e la Dichiarazione dei principi per la gestione sostenibile delle foreste;
- 2 Convenzioni giuridicamente vincolanti: la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici e la Convenzione sulla diversità biologica.

Le Convenzioni principalmente legate alla trattazione di tale lavoro di tesi sono le ultime 2.

Infatti, mentre i primi 3 accordi trattano temi prettamente legati all'ambito e allo sviluppo sociale dei Paesi coinvolti, la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici è stata da stimolo e input per la sensibilizzazione ambientale verso le emissioni di gas serra.

In particolare, quest'accordo è legalmente non vincolante in quanto non pone dei limiti massimi in termini di emissioni, ma semplicemente mira ad introdurre a livello mondiale un tema che fino a quel momento non ha mai trovato spazio in Conferenze mondiali.

Tra i principi emanati da tale accordo, i principali risultano essere:

- *"La protezione del sistema climatico e cioè la lotta ai cambiamenti climatici ed ai loro effetti avversi;*

- *La consapevolezza dei particolari bisogni e condizioni dei paesi in via di sviluppo, particolarmente vulnerabili nei confronti dei cambiamenti climatici;*
- *Il fatto che la mancanza di una piena certezza scientifica non è una ragione per posporre misure di prevenzione e mitigazione."*(Isprambiente.gov.it)

La vera evoluzione è stata il Protocollo di Kyoto, sottoscritto nel 1997 da più di 160 paesi.

Il protocollo di Kyoto 1997

Nasce l'11 dicembre 1997 durante la COP3, Conferenza delle parti di Kyoto, ed entra in vigore solo il 16 febbraio 2005, grazie alla sottoscrizione del protocollo da parte della Russia. L'obiettivo di tale Protocollo è contrastare e regolamentare il riscaldamento climatico, fenomeno ambientale che fino a quel momento veniva completamente ignorato dalla scienza, dovuto, come noto, alla causa antropica. Entra in vigore soltanto nel 2005 in quanto solo in quell'anno è stato firmato e ratificato da 55 Nazioni, rappresentanti almeno il 55% delle emissioni serra globali di origine antropica.

L'immagine seguente mostra l'evoluzione dell'adesione dei 55 Paesi a tale accordo.

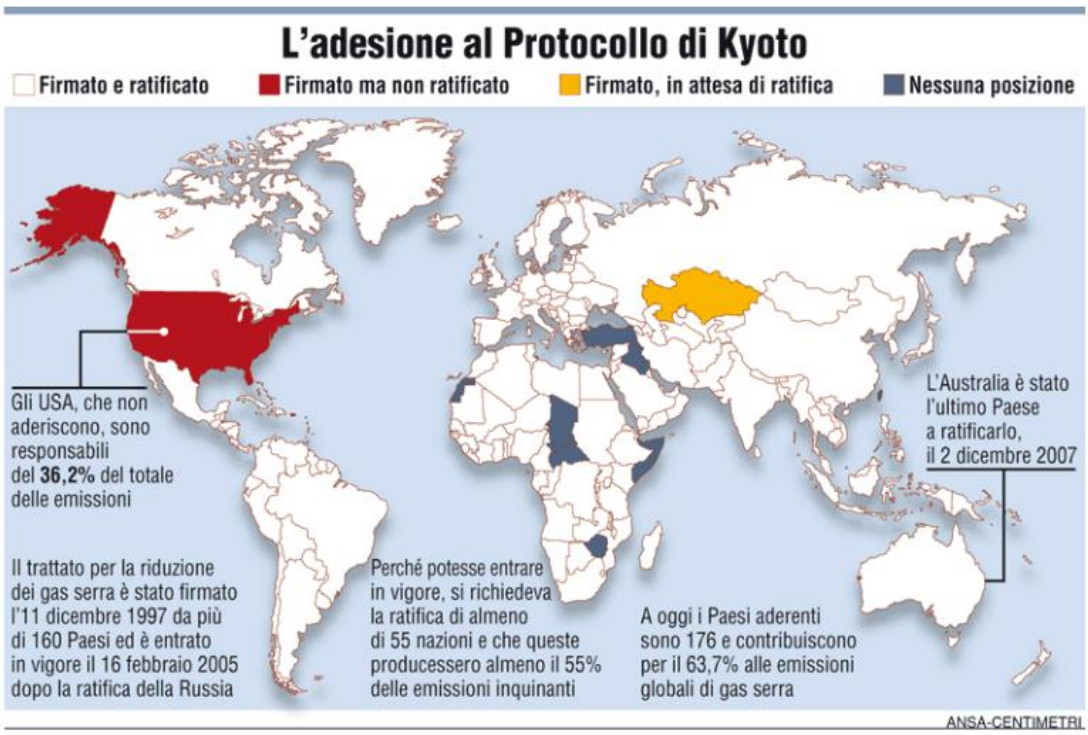


Figura 2 - Adesione Protocollo di Kyoto (Fonte: Ansa)

Le Parti firmatarie il protocollo si sono così accordate circa la necessità di riduzione delle quantità prodotte di emissioni di gas serra, detti anche gas climalteranti

in quanto svolgono un'azione riscaldante per il globo terreste. Ciascuno Stato ha adibito un proprio sistema nazionale di monitoraggio delle emissioni ed assorbimenti di gas ad effetto serra, costantemente aggiornato, al fine di valutare l'effettivo contenimento di emissioni sotto alla baseline, i livelli soglia definiti nel 1990.

A tal proposito, risulta importante definire cosa si intende con gas climalteranti in quanto verranno ampiamente discussi nella trattazione successiva.

I GHG (GreenHouse Gas), che attraverso gli accordi di Kyoto si monitoravano, sono:

- la CO2 (anidride carbonica), output delle reazioni di combustibili fossili in ciascun ambito energetico, industriale e dei trasporti;
- il CH4 (metano), risultante da allevamenti, coltivazioni e discariche di rifiuti;
- l'N2O (protossido di azoto), generato in ambito agricolo e chimico-industriale;
- gli HFC (idrofluorocarburi), i PFC (perfluorocarburi) e l'SF6 (esafluoro di zolfo), utilizzati nelle industrie chimiche e manifatturiere.

Al fine di poter comparare le emissioni di ciascuno di questi gas, è stato introdotto il cosiddetto GWP (Global Warming Potential): convenzionalmente si è fissata pari a 1 la "capacità serra" della CO2, in un intervallo anch'esso convenzionale di 100 anni, ed in funzione di questo sono state valutate le "capacità serra" degli altri gas. È il concetto di CO2 equivalente, un'unità di misura necessaria per esprimere in maniera uniforme l'impatto sul clima dei diversi gas serra(Reteclima.it, 2014).

Di seguito si riporta una immagine illustrativa:

Table 2: Global Warming Potentials (GWP) and Atmospheric Lifetimes (Years) Used in the Inventory

Gas	Atmospheric Lifetime	100-year GWP[a]	20-year GWP	500-year GWP
Carbon dioxide (CO_2)	50-200	1	1	1
Methane (CH_4)[b]	12±3	21	56	6.5
Nitrous oxide (N_2O)	120	310	280	170
HFC-23	264	11,700	9,100	9,800
HFC-125	32.6	2,800	4,600	920
HFC-134a	14.6	1,300	3,400	420
HFC-143a	48.3	3,800	5,000	1,400
HFC-152a	1.5	140	460	42
HFC-227ea	36.5	2,900	4,300	950
HFC-236fa	209	6,300	5,100	4,700
HFC-4310mee	17.1	1,300	3,000	400
CF_4	50,000	6,500	4,400	10,000
C_2F_6	10,000	9,200	6,200	14,000
C_4F_{10}	2,600	7,000	4,800	10,100
C_6F_{14}	3,200	7,400	5,000	10,700
SF_6	3,200	23,900	16,300	34,900

Source: IPCC (1996)

[a] GWPs used here are calculated over 100 year time horizon

[b] The methane GWP includes the direct effects and those indirect effects due to the production of tropospheric ozone and stratospheric water vapor. The indirect effect due to the production of CO_2 is not included.

Figura 3 - GWP (Fonte: Reteclima)

Nonostante, come emerge dall'immagine, tutti gli altri gas hanno un potere climalterante maggiore della CO2, ad oggi si stima che la CO2 contribuisca per più del 55% all'effetto serra odierno, come mostra l'immagine seguente estratta dal report IPPC 2007 (IPCC):

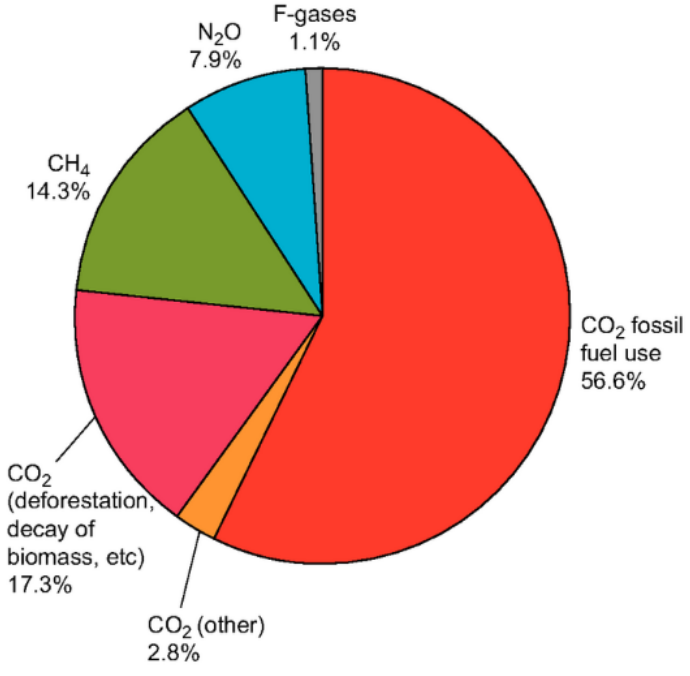


Figure 1.1b Global anthropogenic greenhouse gas emissions in 2004.
Source: Adapted from Olivier et al., 2005, 2006

Figura 4 - Emissioni di gas climalteranti nel 2004 (Fonte: Ippc 2007)

La regolamentazione ufficiale di tale metodologia avviene grazie alla standardizzazione del LCA con la normativa ISO (International Standards Organization), oggi realizzata nelle norme ISO 14040 e ISO 14044 del 2006.

Inizialmente uno studio LCA si basava sulle ISO dalla 14040 alla 14043, secondo le quali era composto da sole 3 fasi:

- inventario o raccolta dati;
- interpretazione, per connettere i dati agli impatti ambientali;
- miglioramento del sistema tramite prove e scenari differenti.

Successivamente tali norme sono state sostituite dalle nuove ISO 14040 e ISO 14044, ma tuttora tale metodologia risulta in continua evoluzione ed approfondimento.

In particolare:

- ISO 14040: Principi e Struttura: definisce i principi e la struttura di un LCA;
- ISO 14044: Requisiti e linee guida: definisce i requisiti e le linee guida per lo svolgimento di uno studio LCA, guidando così l'operatore nella sua esecuzione.

1.2 Struttura

In seguito all'aggiornamento delle norme ISO, uno studio LCA si compone di 4 fasi consequenziali:

A. Definizione di Obiettivo e Campo d'Applicazione;
B. Analisi di Inventario;
C. Valutazione di Impatto;
D. Interpretazione dei risultati.

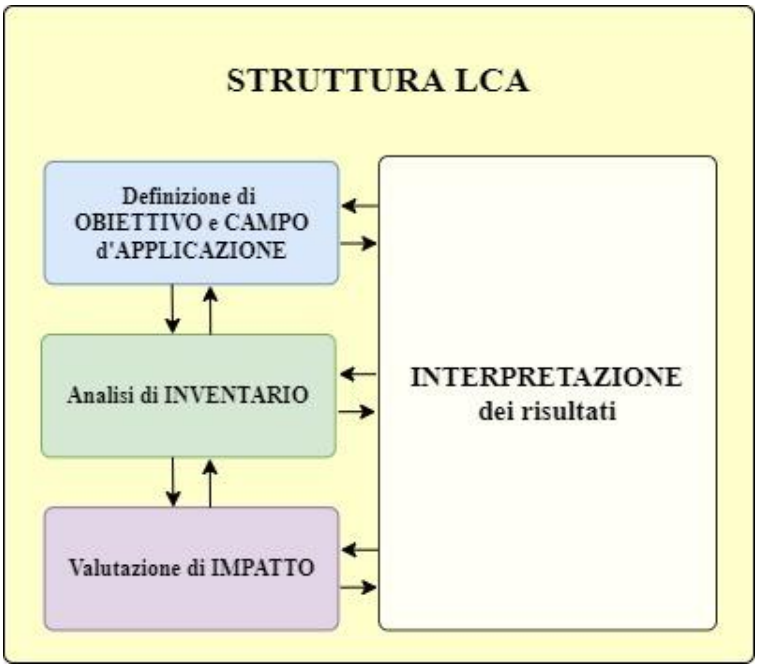


Figura 5 - Struttura LCA

A. OBIETTIVO E CAMPO D'APPLICAZIONE

In generale, uno studio LCA consiste in una modellazione e quindi semplificazione di una realtà complessa, in quanto composta da differenti processi, input ed output. Per tale ragione, il modello creato sarà sicuramente distorto e non completamente conforme alla realtà: la sfida per un professionista che decide di intraprendere un percorso simile è pertanto realizzare un modello che sia quanto più fedele possibile alla realtà, evitando quindi eccessive semplificazioni e distorsioni dei risultati.

Per tali ragioni, la prima fase dello studio LCA è quella più importante: occorre definire attentamente un obiettivo e un campo di applicazione.

Per far ciò, alcune scelte sono le seguenti:

- Definire bene il motivo per cui si esegue l'analisi LCA;
- Definire in maniera precisa il prodotto e/o processo, il suo ciclo di vita e la funzione che svolge;
- Definire l'unità funzionale, soprattutto quando devono essere confrontati più prodotti;
- Descrivere i confini del sistema e il modo in cui sarà trattata la coproduzione, se necessaria;
- Fornire ipotesi e limitazioni circa la qualità dei dati;
- Definire requisiti relativi alla procedura LCIA, e la successiva modalità di interpretazione;

- Esplicitare la tipologia di pubblico prevista e le modalità di presentazione dei dati;
- Se applicabile, definire il modo in cui verrà effettuata una revisione tra pari;
- Esplicitare il tipo e il formato della relazione richiesta per lo studio.

La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione permette di verificare se l'LCA è stato svolto coerentemente ad essi. L'obiettivo e il campo di applicazione non sono stabiliti in maniera definitiva, ma possono essere ri-calibrati se, durante le fasi successive alla prima, le scelte iniziali si rivelano non ottimali o pratiche.

In particolare, tra le scelte sopra indicate, per la definizione dell'obiettivo, nelle norme ISO è possibile trovare alcuni requisiti specifici, quali:

- L'applicazione e il pubblico previsto devono essere descritti in modo inequivocabile. Ciò è importante in quanto differente è il grado di comprensione dei dati e risultati ottenuti per studi interni ad amministrazioni, e studi di interesse pubblico.
- Le ragioni per cui si esegue lo studio devono essere chiaramente descritte. È necessario distinguere il caso in cui lo studio LCA ha l'obiettivo di dimostrare e provare una tesi, dal caso in cui, al contrario, si vuole soltanto ricavare informazioni in merito all'oggetto dell'analisi condotta.

Alcuni studi LCA hanno più di uno scopo. I risultati possono essere utilizzati sia internamente all'amministrazione interessata al suo svolgimento, che esternamente.

All'interno della fase "A. Definizione di Obiettivo e Campo d'Applicazione" si distinguono le seguenti sotto-fasi:

1. **Definizione del campo di applicazione**

Il campo di applicazione dello studio descrive le scelte metodologiche, i presupposti e i confini del sistema. È necessario sottolineare che un LCA è un processo iterativo, quindi il termine "iniziale" è un attributo di ciascuna delle parti che lo compongono: ciò equivale a dire che si possono definire una serie di scelte e requisiti iniziali che, tuttavia, possono essere adattati successivamente quando saranno disponibili ulteriori informazioni.

2. **Unità funzionale e flusso di riferimento**

Conducendo un'analisi comparativa tra prodotti, importante è la definizione dell'unità funzionale o la base di confronto. In generale, non è possibile effettuare un banale confronto tra due prodotti, in quanto seppur simili potrebbero avere caratteristiche prestazionali diverse.

Considerando recipienti per alimenti, ad esempio, confrontando una confezione in cartone e una bottiglia in plastica di latte, si osserva come la prima può essere utilizzata una sola volta, mentre la seconda può essere riutilizzata dieci o più volte. Se lo scopo del LCA è confrontare i sistemi di confezionamento del latte, non è possibile

fare una comparazione tra le due confezioni. Un approccio migliore consiste nel confrontare le due modalità di confezionamento al fine di imballare 1000 litri di latte. In tal caso si confronterebbero 1000 cartoni di latte con circa 100 bottiglie e 900 lavaggi .

Da tale osservazione, si dimostra come la definizione dell'unità funzionale risulta molto spesso difficile, se relazionata alla funzione associata al prodotto in esame.

3. Confini iniziali del sistema

I sistemi di prodotti tendono ad essere correlati in modo complesso.

Pensando ancora ad un LCA riguardante la produzione di confezioni in cartone di latte, il loro trasporto avviene per mezzo di autocarri. A sua volta l'autocarro è l'output di un ciclo di vita riguardante la sua produzione. In tale ciclo di vita intervengono input quali rifornimento di acciaio, per il quale a sua volta è necessario disporre di carbone. E ancora, per produrre carbone, sono necessari mezzi di trasporto come gli autocarri.

Risulta evidente come è impossibile tracciare tutti gli input e gli output interni ad un sistema di prodotto e, per tali ragioni, è necessario definire i confini del sistema. Questa fase è di particolare importanza in quanto è noto che escludendo alcune parti, vale a dire lasciarle fuori dai confini del sistema, i risultati potrebbero risultarne influenzati.

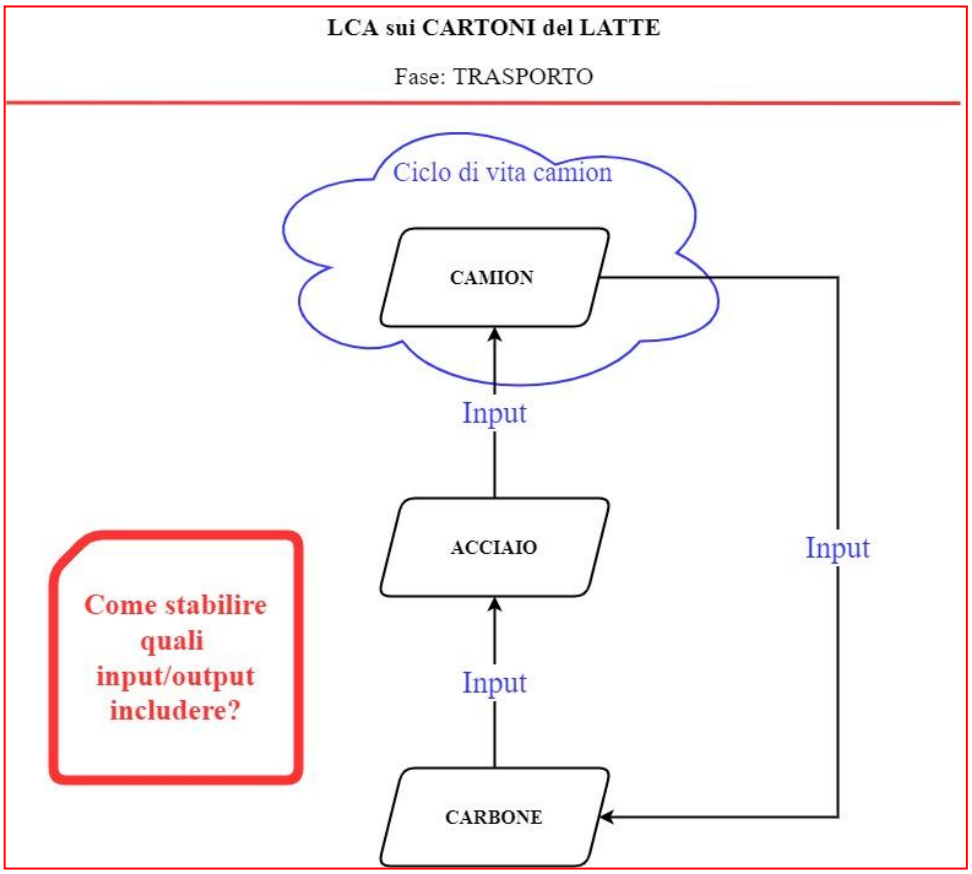


Figura 6 - Esempio inclusione input/output

È utile, in questo caso, tracciare un diagramma del sistema e identificarne i confini.

4. Criteri per l'inclusione di input e output

Tra i criteri utili alla definizione dei confini del sistema, particolarmente utile risulta l'impostazione di un livello di approfondimento dell'indagine condotta. Superato tale limite la raccolta dei dati per un input o output si interrompe.

La norma ISO 14044 consiglia di utilizzare uno o più dei seguenti criteri per la definizione di tale livello soglia:

1. Se la massa dell'afflusso è inferiore a una certa percentuale.
   Tuttavia tale criterio funziona correttamente solo per i materiali e non per le distanze di trasporto ed energia. Inoltre, i flussi esclusi, in quanto aventi una massa ridotta, potrebbero comunque avere impatti ambientali significativi.
2. Se il valore economico di un afflusso è inferiore a una certa percentuale del valore totale del sistema prodotto.
   Tuttavia, anche in questo caso si potrebbero escludere flussi dal valore piuttosto basso che potrebbero restituire impatti ambientali significativi.

3. Se il contributo di un afflusso al carico ambientale è inferiore a una certa percentuale.
   Questa potrebbe sembrare la scelta più rilevante, ma tuttavia non si conosce il contributo ambientale prima di indagare il flusso e, del resto, risulterebbe inappropriato escluderlo una volta indagato.

5. Gestione dei processi multifunzionali

Molti processi comportano la produzione di più di un prodotto. Quando più cicli di vita sono interconnessi, o, quando la produzione di un prodotto dipende dalla produzione di un altro e non può essere separata, ci sono due modi principali per affrontare ciò in uno studio LCA:

1. Espansione del sistema, o ***modellazione consequenziale***;
2. Allocazione, applicata nella ***modellazione attribuitiva***.

Modellazione consequenziale

A priori, il tipo di modellazione scelta dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione del progetto in esame. **La modellazione consequenziale viene applicata quando si vuole indagare sulle conseguenze di un cambiamento rispetto a una situazione di base**.

Ad esempio, come illustrato nella seguente immagine, si potrebbe indagare sul cambiamento dell'impatto ambientale legato alla sostituzione del generico prodotto X col prodotto Y. Ciò implica che il carico ambientale del prodotto X viene evitato e può essere sottratto dal carico ambientale del prodotto Y. Quando ci sono processi multifunzionali nel ciclo di vita del prodotto X, anche i co-prodotti e le funzioni risultanti vengono evitati e devono essere sostituiti da prodotti e funzioni alternative. Allo stesso modo, i co-prodotti e le funzioni nel ciclo di vita del prodotto Y sostituiscono altri prodotti e funzioni.

In definitiva, i processi multifunzionali possono rendere complessa la modellazione consequenziale e richiedere molti dati.

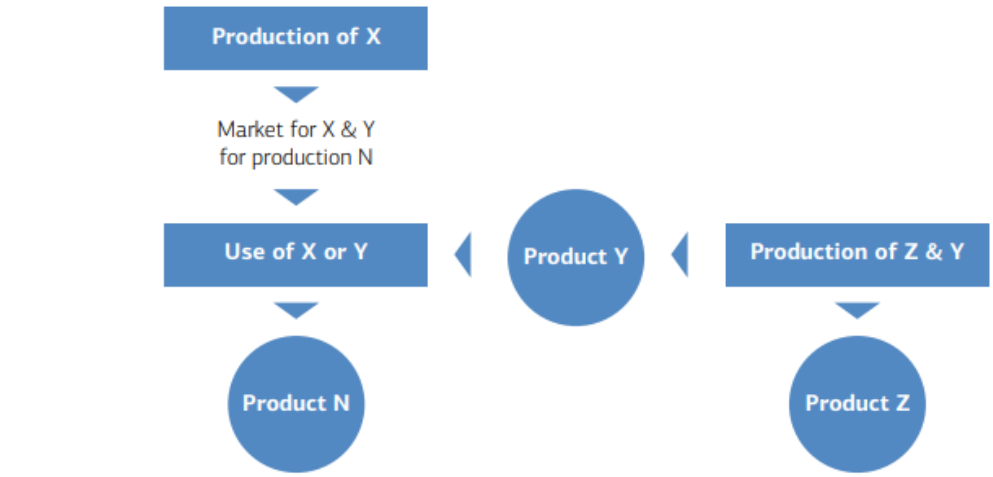


Figure 2: Consequential modeling

Figura 7 - Modellazione consequenziale (Fonte: SimaPro 8 Introduction to LCA)

Inoltre, non è sempre chiaro quali prodotti e funzioni vengono evitati dai co-prodotti e dalle funzioni. Il requisito principale per la scelta dei prodotti e delle funzioni evitati è che abbiano la stessa unità funzionale.

Risulta pertanto che la modellazione consequenziale è l'unico modo in un LCA di indagare fino a che punto una presunta azione di mitigazione porti realmente a un ridotto impatto ambientale.

Modellazione attributiva

La modellazione attributiva viene scelta quando si desidera conoscere l'impatto ambientale di un prodotto o funzione e gli hotspot nel suo ciclo di vita, o quando si vogliono confrontare gli impatti di due prodotti con la stessa unità funzionale. Tutti gli input e output ambientali sono sommati a partire dall'estrazione della materia prima (culla) al gate del fornitore del prodotto e/o servizio o gli impianti di trattamento dei rifiuti (tomba). Il risultato della modellazione attributiva viene, quindi, spesso definito impronta ambientale (o carbon footprint, water footprint, ecc.). Nel caso di processi multifunzionali il carico ambientale di input e output è suddiviso tra i co-prodotti e le funzioni.

Per realizzare ciò bisogna seguire le seguenti fasi:

1. Suddividere il processo multifunzionale;

Un processo può essere suddiviso identificando gli input e gli output per sottoprocesso. Questo richiede la conoscenza di un ingente numero dati, che talvolta, non essendo misurabili singolarmente, non è possibile avere a disposizione. Quando, la suddivisione dei dati richiesti non è possibile, è necessario applicare una forma di allocazione.

2. Determinare una causalità fisica per l'allocazione

La causalità fisica per l'allocazione è una relazione che determina il modo in cui le variazioni di quantità dei prodotti si ripercuotono su variazioni degli input e output dello stesso processo. Tra le più comuni causalità fisiche si trovano proprietà fisiche come massa, volume, energia, numero di unità, composizione chimica o proteine. Ritornando al caso dei trasporti, se prodotti diversi sono trasportati dallo stesso mezzo, gli input e gli output ambientali possono essere allocati in base alla massa dei prodotti, in quanto quest'ultima ne determina il consumo di carburante. Tuttavia, non sempre va bene adottare la massa come causalità fisica. Infatti, se il fattore limitante è il volume di un generico prodotto, risulterà più appropriato impostare un'allocazione basata sul volume.

3.Gli input come criterio di ripartizione

Gli input sono utilizzati infine come criterio di allocazione quando:

- non si può instaurare una relazione fisica,
- non esiste una caratteristica fisica comune (quando, ad esempio, per un coprodotto c'è una relazione con il suo contenuto energetico e per l'altro c'è una relazione con la sua massa), e/o,
- i co-prodotti e le funzioni non sono prodotti da processi alternativi ad output unico.

B. ANALISI DELL'INVENTARIO

Il compito più impegnativo nell'esecuzione di un LCA è la raccolta dei dati.

Sebbene in SimaPro siano disponibili molti dati secondari, alcuni processi o materiali non sono disponibili. L'approfondimento dell'analisi e la raccolta dei dati derivano principalmente dal tempo e dalle risorse finanziare che si hanno a disposizione.

A tal proposito, è utile distinguere tra due tipi di dati:

1. **FOREGROUND DATA - Dati primari**: dati specifici che è necessario acquisire per modellare il proprio sistema. In genere, sono i dati che descrivono un particolare sistema di prodotto o un sistema di produzione specializzato.

2. **BACKGROUND DATA - Dati secondari**: dati per la produzione di materiali generici, energia, trasporti e gestione dei rifiuti. Questi dati si possono ricavare dai database presenti in SimaPro e dalla letteratura.

La distinzione tra questi tipi di dati non è netta e dipende dall'oggetto del LCA.

Come verrà in seguito approfondito, conducendo un LCA sulla produzione di bitume, probabilmente si dovrà tenere in conto dell'automezzo utilizzato per il

trasporto come dato di background. Il camion in questione, a sua volta, non è costruito esclusivamente per il trasporto di bitume, e i dati necessari all'analisi del ciclo di vita condotta riguardano la distanza di trasporto e l'efficienza del carico. In questo caso, SimaPro offre un'ampia gamma di processi per mezzi di trasporto, per cui è possibile utilizzarne uno tra questi.

Tuttavia, se l'oggetto principale del LCA è lo studio del ciclo di vita di una tipologia specifica di camion, non si può scegliere arbitrariamente un camion fornito dai database, ma sarà necessario raccogliere gli input e output specifici per quel camion come dati primari.

C. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO

In genere, chi implementa uno studio LCA non è interessato a sviluppare nuove metodologie di valutazione dell'impatto. Piuttosto, si sceglie tra quelle che i software commerciali mettono a disposizione.

Come per la fase di inventario, anche nella valutazione d'impatto la definizione di obiettivo e campo d'applicazione rimane la fonte di guida più importante per la scelta del metodo e delle categorie di impatto.

Al riguardo, la scelta più importante consiste nell'individuazione del livello di integrazione desiderato dei risultati. Ciò, a sua volta, dipende dal modalità in cui si presenteranno i risultati ai pubblico, e dal suo grado di attenzione e comprensione.

La figura successiva presenta una panoramica schematica di alcune delle possibilità.

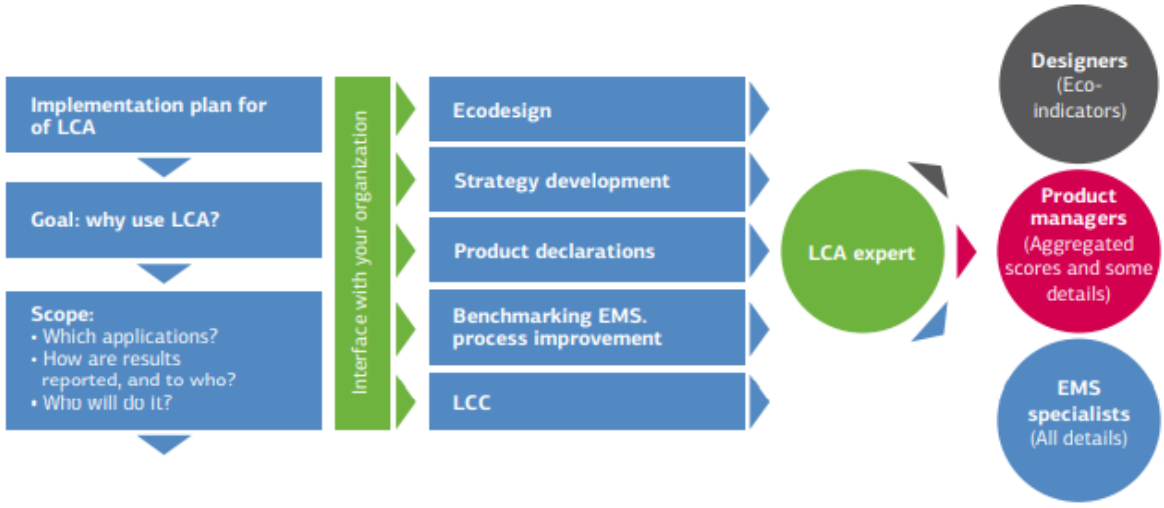


Figure 6: The choice of the impact assessment method depends largely on the audience addressed.

Figura 8 - Scelta della metodologia di valutazione d'impatto (Fonte: SimaPro 8 Introduction to LCA)

Inoltre, la norma di riferimento per studi LCA, la ISO 14040/44, afferma come un ciclo di vita sia una compilazione e valutazione di input ed output e dei potenziali

impatti ambientali di un sistema di prodotto durante il suo ciclo di vita. In questa definizione, è chiaro come la valutazione dell'impatto sia una delle fasi principali di analisi LCA.

La valutazione dell'impatto del ciclo di vita è, infatti, definita come la fase volta a comprendere e valutare l'entità e il significato dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto.

La ISO 14040/44 distingue tra:

- Elementi obbligatori: classificazione e caratterizzazione.
- Elementi opzionali: normalizzazione, ranking, raggruppamento e ponderazione.

In definitiva, un LCA completo deve includere necessariamente le fasi di classificazione e caratterizzazione del prodotto in esame, altrimenti ci si riferisce allo studio solo come inventario del ciclo di vita (LCI).

D. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

L'ultimo dei quattro passaggi del LCA è l'interpretazione dei risultati.

La norma standard ISO 14044 descrive una serie di controlli attraverso cui validare i risultati: occorre verificare se le conclusioni ottenute sono adeguatamente supportate dai dati e dalle procedure utilizzate.

A tal scopo, importante è l'analisi dell'incertezza.

Tutti i dati nei modelli del ciclo di vita presentano alcune incertezze. Le tre tipologie principali sono:

a. Variazione dei dati: può essere descritta da una distribuzione, espressa come intervallo o deviazione standard. Metodi statistici, come le tecniche Monte Carlo possono essere utilizzati per gestire questi tipi di incertezze e calcolare l'incertezza dei dati nei risultati del LCA.

b. Correttezza (rappresentatività) del modello

c. Incompletezza del modello

Queste ultime due criticità si riferiscono a scelte soggettive effettuate in fase di modellazione di un sistema. Possono infatti riguardare la tipologia di allocazione scelta, e, di conseguenza, le ipotesi avanzate, o ancora gli scenari di smaltimento adottati, o l'unità funzionale definita e simili. Tutti questi fattori possono avere impatti significativi sui risultati, e, tuttavia, queste incertezze non sono facili da gestire in un approccio Monte Carlo. In questi casi, infatti, si esegue un'analisi di sensitività la quale valuta l'influenza delle ipotesi più importanti sui risultati. Il principio alla base è semplice: modificare l'ipotesi e ricalcolare l'LCA, ad esempio applicando differenti tipi di allocazione. Con questo tipo di analisi, si ha una migliore comprensione di come le

diverse ipotesi influenzano i risultati. La constatazione che l'esito del LCA sia maggiormente dipendete da un'ipotesi piuttosto che un'altra, non risulterà un problema finché le conclusioni del LCA sono stabili. Tuttavia, se risulta che con un'ipotesi il prodotto A ha un carico maggiore di B, e che con una diversa ipotesi il prodotto B ha un carico maggiore, sarà necessario fornire una valida giustificazione per cui le conclusione ottenute sono valide.

1.3 Applicazione alle pavimentazioni stradali

Analogamente all'intero contesto in cui si sviluppa l'analisi LCA, anche l'utilizzo di studi LCA per pavimentazioni stradali prende forma nel periodo in cui si ricercano tecnologie sostenibili nel settore delle costruzioni. Anche in tale ambito divengono importanti target ambientali quali efficienza della risorse, contenimento dell'energia, riduzione delle emissioni di carbonio, al punto che divengono criteri per la stima dell'evoluzione eco-friendly di aziende e imprese costruttrici. L'LCA e i suoi risultati divengono quindi il mezzo di espressione delle loro performance ambientali.

Nell'ottica di sviluppare una teoria propria per le costruzioni stradali, nel 2005 sono state definite sei aree di impatto per l'industria di bitume anglosassone, sulla base dei risultati ottenuti da esperti della RBA (Refined Bitumen Association), della QPA (Querry Products Association) e l'"Highway Agency" (Yue Huang).

Le aree di impatto così definite son le seguenti

- Design per pavimentazioni a lungo tempo.
- Incrementare il riutilizzo e il riciclo di scarti di pavimentazioni.
- Includere un'analisi dei costi.
- Implementare un reale sistema di monitoraggio ambientale (EMS).
- Salute e sicurezza (Health and Safety).
- Approvvigionamento, vendita e marketing responsabili.

Input e Output per cicli di vita di pavimentazioni stradali

I cicli di vita di pavimentazioni stradali offrono una varietà di analisi differenti per i materiali e i mezzi d'opera utilizzati, le tipologie di trasporto e i metodi di realizzazione della pavimentazione. Inoltre, in tale circostanza, si distinguono cicli di vita per progetti di realizzazione di pavimentazioni ex-novo, e cicli di vita per progetti di intervento e messa in sicurezza di pavimentazioni esistenti.

In riferimento ad LCA sulla realizzazione ex-novo di pavimentazioni, un tipico schema di riferimento, che può essere la base anche per altre varianti, è quello estratto dal testo di (Huang, 2007), rappresentato nella seguente immagine:

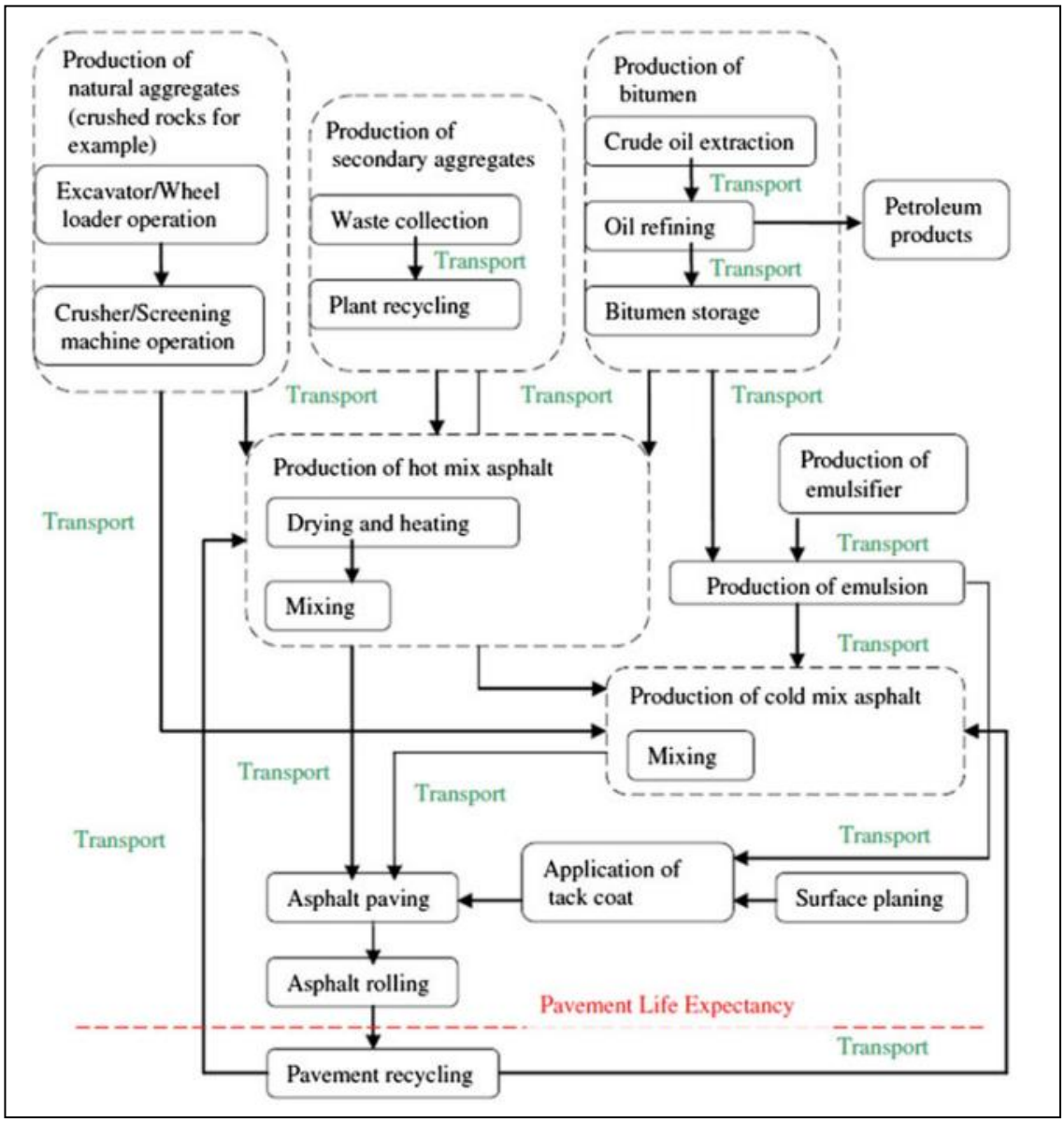


Figura 9 - Ciclo di vita di pavimentazioni: processi principali (Fonte: Huang, 2007)

Le fasi principali sono:

- Ricerca dei materiali e realizzazione dei prodotti: bitume, cemento, materiali riciclati.
- Trasporto delle materie prime all'impianto di miscelazione, e trasporto dei prodotti al sito di realizzazione.
- Costruzione in sito, incluso l'utilizzo e il noleggio di macchinari.
- Manutenzione e riabilitazione, incluso il riciclo o il conferimento in discarica di materiali non recuperabili, comprese alcune delle loro attività, in genere in scala minore rispetto alla costruzione vera e propria.

Per ciascuna di queste fasi, è necessario quantificare gli input (ad esempio le tonnellate di aggregati, o i litri di carburante) e gli output ambientali (ad esempio i kg di CO2 emessi).

Poiché gli studi LCA interessano posti differenti e richiedono l'utilizzo di tecnologie differenti, ciascuno Stato stima dei proprio consumi medi, che possono non essere rappresentativi per gli altri. A prova di quanto affermato, si riporta nella tabella seguente, estratta dallo studio Stripple (a cui si rimanda in seguito), il consumo medio di energia (elettricità e carburante), per differenti Nazioni, riferite alla fase di produzione di HMA.

	Unit	A modern plant in Scandinavia	Sweden	EAPA[a]	Netherlands	UK
Electricity	MJ/tonne asphalt	25	36	18–29	38	32
Fuel oil	MJ/tonne asphalt	251	285	360	310	340

[a] *EAPA* European Asphalt Pavement Association

Figura 10 - Input energetici per la produzione di HMA (Fonte: Stripple, 2000)

Si osservano importanti differenze tra Europa e altre Nazioni: è importante quindi scegliere e definire attentamente i dati di input per i processi di un LCA, al fine di adottare dati quanto più rappresentativi dello studio in esame.

Scelte metodologiche

Come già anticipato, nella fase di definizione dell'obbiettivo e del campo di applicazione del LCA, è necessario prendere alcune decisioni iniziali quali:

- Definizione dei confini del sistema;
- Definizione del metodo di allocazione;
- Ricerca dei dati primari.

Questa fase è di particolare importanza e chiare e giustificate dovranno essere tali decisioni, giacché le scelte metodologiche possono influenzare i risultati LCA.

Inoltre, come già visto, tutto ciò acquisisce ancora più rilevanza negli LCA comparativi, effettuando confronti tra più prodotti sulla base della medesima unità funzionale.

Confini del sistema

Analogamente ad altri studi LCA, per le pavimentazioni stradali è possibile effettuare:

- Analisi cradle-to-gate: dalle materie prime al "cancello" o "gate" dell'impianto di produzione (bitume o cemento);
- Analisi cradle-to-laid: inclusa la costruzione;

- Analisi cradle-to-grave: l'intero ciclo di vita comprensivo della manutenzione, uso e riciclo.

La terza tipologia di analisi implica maggiore complessità dal momento che è necessario tenere in conto anche degli eventuali scenari di smaltimento della pavimentazione stradale.

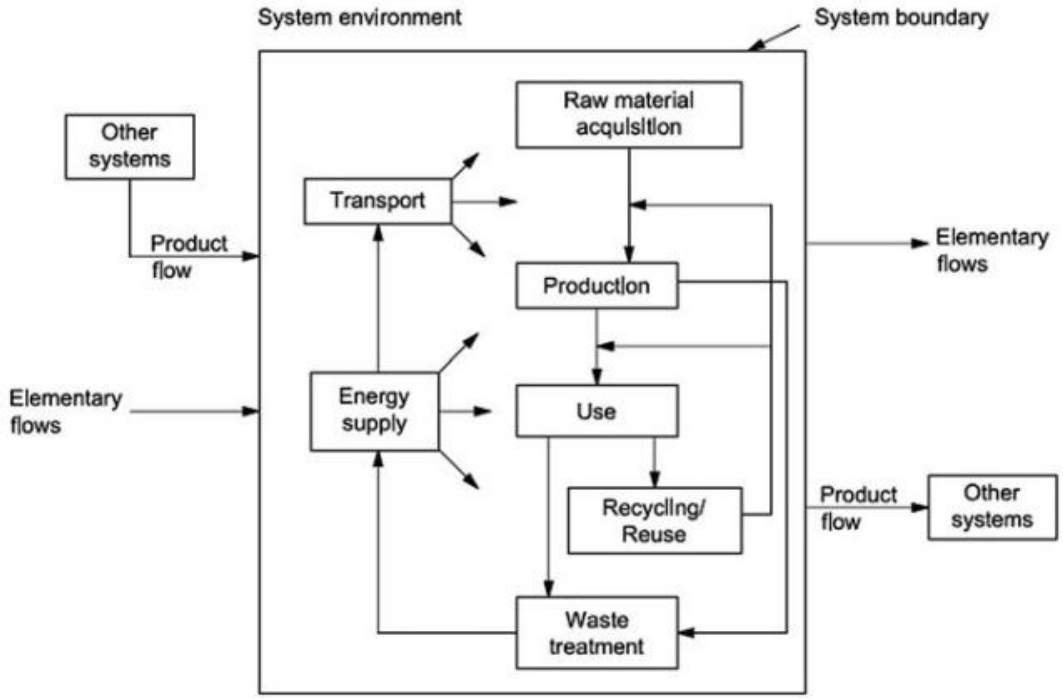


Figura 11 - Scelte metodologiche in studi LCA(BSI, 2006)

Unità funzionale

Come espresso dalla norma ISO 14040, con unità funzionale si intende una prestazione quantificabile di un sistema di prodotti da utilizzare come unità di riferimento. Le strade hanno la funzione di fornire una guida sicura, duratura, confortevole ed economica. Pertanto, l'unità funzionale in un LCA stradale può essere definita come la lunghezza o larghezza della piattaforma stradale. Le dimensioni della corsia dipendono dalla pendenza della strada e dall'inclusione o meno di parti non carrabili della stessa, come le banchine. La durabilità o la vita di servizio della strada, è anche un importante aspetto da considerare nella definizione dell'unità funzionale, come anche il livello di traffico atteso.

Sotto tali aspetti, un'unità funzionale migliore è l'area di una sezione di pavimentazione, progettata per supportare un livello di traffico di progetto, per un definito numero di anni, comprensivo dei lavori ordinari di manutenzione e messa in sicurezza.

In genere si osserva che:

- L'unità funzionale è definita in termini di quantità di materia, come le tonnellate di materiale da pavimentazione. Tuttavia, definendo così l'unità funzionale, questa esclude la performance in sito dei materiali, come per esempio la rigidezza, che determina lo spessore necessario per il livello di traffico di progetto;
- L'unità funzionale è definita senza tenere in conto della durabilità dei materiali, come il kilometro di strada per 1 anno. Anche in questo caso non si considerano tutti i requisiti minimi di cui si è parlato in precedenza, e la scelta di questa unità funzionale ignora appunto la durabilità, la quale invece stabilisce la quantità di materiale da ripristinare, e quindi la quantità di materiale che potrà essere riciclato o no, e conseguentemente le attività di trasporto e di cantiere a ciò associate.

Allocazione

In ambito di LCA sulle pavimentazioni stradali, l'allocazione si applica tra co-prodotti o in fase di riciclo a fine vita (EOL, End-Of-Life) e il metodo di allocazione scelto trova ampio spazio in revisioni e osservazioni di studi LCA. Questo accade dal momento che il metodo di allocazione deve essere opportunamente scelto e tale scelta a sua volta deve essere giustificata, in quanto incide considerevolmente sui risultati ottenuti.

L'allocazione tra co-prodotti è utile per materiali come il bitume prodotto in raffineria, dal momento che nello stesso impianto, insieme al bitume, dalla raffinazione petrolio greggio si ottengono altri prodotti, e, di conseguenza, l'impatto ambientale prodotto dall'impianto dovrà opportunamente suddividersi tra i vari prodotti.

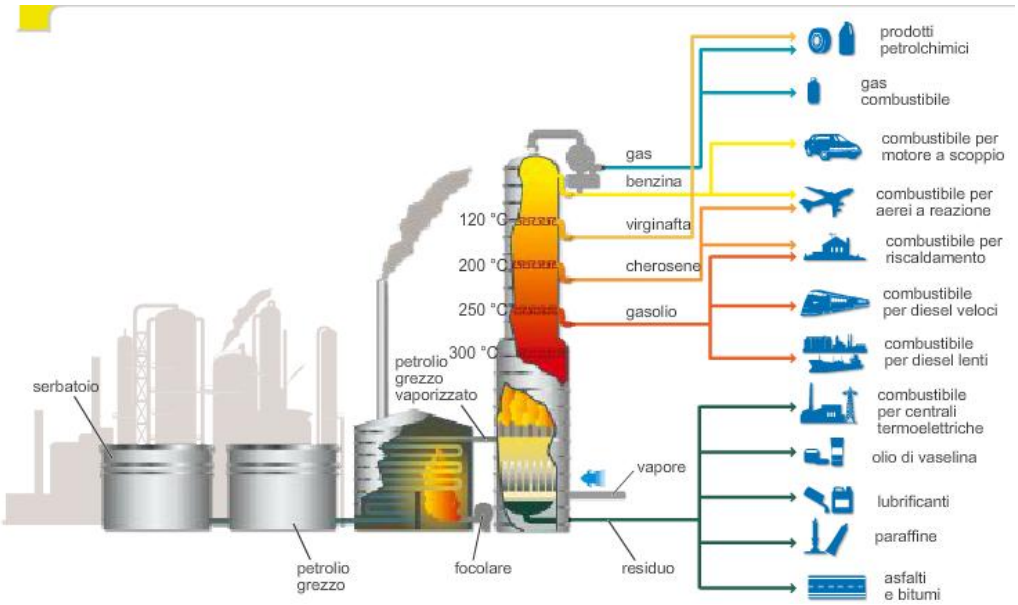


Figura 12 - Prodotti raffineria(Tecnologialanzi, 2019)

Nel caso del cemento, dove sotto-prodotti industriali vengono impiegati per sostituire in parte il cemento Portland, è necessario stabilire la percentuale di impatto di ciascuno dei prodotti/processi primari da assegnare a ciascuno dei sotto-prodotti.

Come stabilito dalla norma ISO 14040, l'allocazione può basarsi sul valore fisico (massa, volume) o economico dei prodotti.

Per i materiali riciclati a fine vita, si può tenere in conto, durante lo svolgimento dell'analisi del ciclo di vita, dei prodotti evitati[1] per effetto del riciclo, per evidenziare così gli impatti minori derivanti dal riciclo piuttosto che dall'utilizzo di nuovi materiali.

Certamente, il modo di assegnazione di "crediti" da riciclo varia caso per caso e studio per studio.

1.4 Revisioni di studi e fonti LCA sulle pavimentazioni

Negli anni l'interesse delle associazioni LCA è stato rivolto verso la realizzazione di raccolte e revisioni di studi effettuati. È il caso dell'associazione EPA (Environmental Protection Agency) che nel 2014 ha cercato di raggruppare risorse quali pubblicazioni, riviste, siti web, software e simili trattanti LCA sulle pavimentazioni stradali, sviluppate a partire dal 1998.

Risultato di tale interesse è il seguente sommario:

- Nel 1993-1995, l'istituto svedese IVL (Environmental Research Institute) ha sviluppato un modello LCI per la costruzione e la manutenzione di strade, aggiornato successivamente nel 2001 e denominato Stripple.
- Nel 1996, in Finlandia la VTT ha pubblicato uno studio comparativo LCA sugli impatti ambientali delle pavimentazioni flessibili e rigide, aggiornato poi nel 2001 con l'allocazione dei sotto-prodotti industriali.
- Nel 1997-1999, Eurobitume ha condotto uno studio LCI cradle-to-gate sul bitume da pavimentazione, aggiornato poi nel 2011 con l'introduzione del PMB e le emulsioni bituminose. L'ultima versione risale infine al 2020.
- Nel 2002 NIST ha sviluppato BEES, dove sono state valutate le performance di 200 prodotti da costruzione secondo un approccio LCA.
- Nel 2003 è stato sviluppato e diffuso Palate, un applicativo di Excel per studi LCA.
- Nel 2005, in Danimarca è stato condotto uno studio LCA per la costruzione di strade utilizzando materiale da riciclo proveniente da inceneritore.
- Nel 2005-2007, Newcaste University ha sviluppato un modello LCA per le pavimentazioni flessibili anglosassoni, con dei confini di sistema che comprendono anche le emissioni dovute al traffico nella fase di ripristino e manutenzione del manto stradale.

[1] Per "prodotto evitato" si intende un prodotto che non finisce in discarica, ma viene riutilizzato.

- Nel 2007, l'associazione PCA (Portland Cement Association) ha pubblicato l'LCI sul cemento e tre altri suoi prodotti.
- Software commerciali LCA, come SimaPro e Gabi, sono stati implementati per studi LCA.

Appare evidente come, in letteratura, si ha a disposizione una vasta gamma di materiale da consultare e a cui far riferimento.

Tuttavia è del resto impossibile poter consultare tutta la letteratura.

Per il presente lavoro di tesi, al fine di valutare e confrontare i risultati ottenuti, sono stati considerati soltanto alcuni di questi modelli sviluppati. In particolare, linee guida per la stesura della presente analisi sono state Stripple ed Eurobitume. Quest'ultimo, come apparirà evidente nei successivi capitoli, fungerà da risorsa per la creazione dei processi riguardanti il bitume.

1.5 STRIPPLE

Nel 1993-1995 l'Istituto di Ricerca Ambientale Svedese (IVL), in cooperazione con la Swedish National Road Administration, ha sviluppato uno studio LCA sulle pavimentazioni stradali, fornendo un modello LCA e LCI per le fasi di costruzione, manutenzione e ripristino stradale.

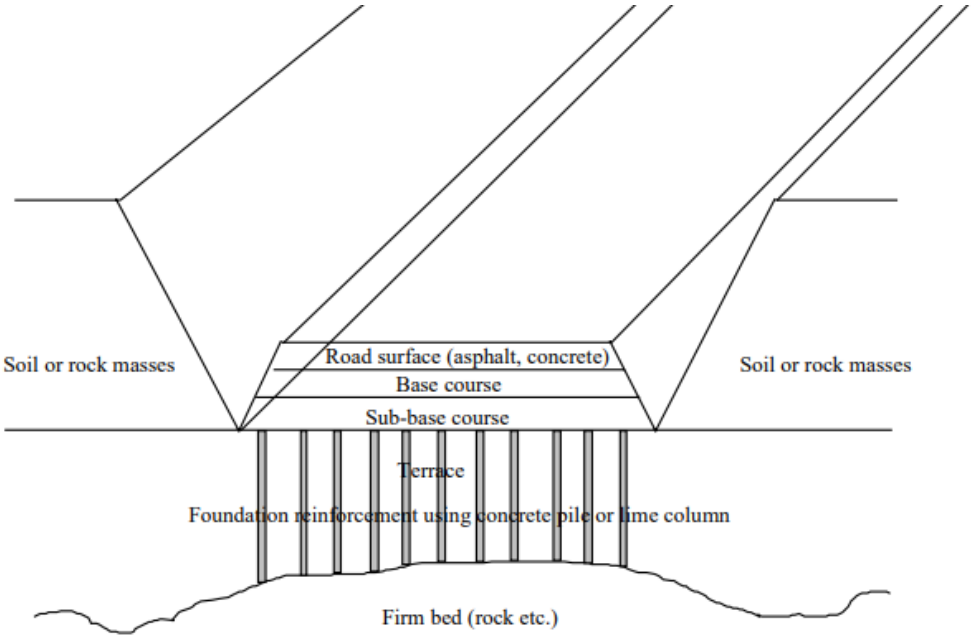


Figura 13 - Composizione sezione stradale analizzata da Stripple(Institute, March 2001)

Questo studio si basa su un sistema stradale tipico svedese con condizioni geo-tecniche e metodologiche proprie. Infatti, con sistema stradale non ci si riferisce soltanto agli strati legati a bitume, cemento o aggregati naturali, ma si intende un ambiente più complesso comprensivo dei sistemi di controllo del traffico,

dell'illuminazione e segnaletica stradale, dei ponti, tunnel ecc.. Quindi il settore di produzione dei materiali stradali rappresenta un intero settore industriale.

Se si dovesse rappresentare la struttura principale di Stripple, si creerebbe lo schema seguente:

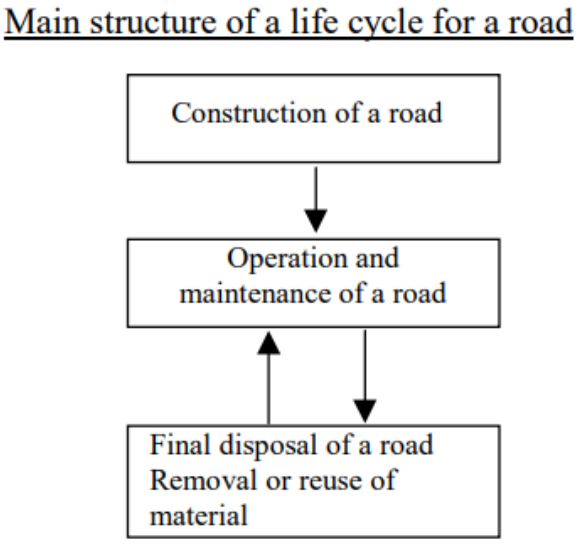


Figura 14 - LCA strada (Institute, March 2001)

Questo studio vuol creare un modello di analisi nel quale ciascuna delle macro-fasi di costruzione, manutenzione e ripristino della strada si decompone in processi unitari. L'inventario per ciascun processo unitario è stato ricavato da dati misurati che includono: consumo di energia, emissioni e consumo di materie prime. Inoltre, la metodologia utilizzata cerca quanto più di ripercorrere le raccomandazioni provenienti dalla SETAC.

1.6 EUROBITUME

Eurobitume, acronimo di Associazione Europea dei Produttori di Bitume, nasce nel 1969 con l'obiettivo di uniformare il mondo europeo dell'industria del bitume, nota l'importanza di tale prodotto come materia prima (Eurobitume).

Dal XXI secolo infatti il bitume è divenuto la materia prima per eccellenza nell'ambito delle infrastrutture, per cui si sviluppò l'idea, o meglio necessità, di raggruppare in un unico ente i produttori operanti in tale settore. Insieme a ciò, con lo sviluppo di tecniche infrastrutturali eco-friendly, Eurobitume si prefiggeva di promuovere e, al contempo, educare al buon uso del bitume, fornire report e informazioni sanitarie e ambientali sulla base di dati affermati ed, infine, dare vita ad una rete di comunicazione tra produttori.

Tutto quello finora detto si riassume nello spot di Eurobitume *"Eurobitume è la voce dell'industria europea del bitume, educando e promuovendo l'uso efficiente,*

economico, efficace, sicuro e sostenibile del bitume raffinato nelle applicazioni stradali, industriali ed edili".

Relativamente a questa Associazione, l'interesse verso di essa, per lo svolgimento del presente lavoro di tesi, nasce quale promotrice del concetto di sostenibilità ambientale applicato al bitume.

È noto come il bitume sia divenuto uno dei principali prodotti da costruzione. L'idea che Eurobitume cerca di diffondere è quella di un riutilizzo, anche multiplo, del bitume utilizzato nella realizzazione di superfici stradali o altro, per la realizzazione di altri materiali, idea ormai accolta favorevolmente dalla popolazione europea al punto che nel 2017, in Europa, sono state riciclate quasi 47 milioni di tonnellate di asfalto.

Tra le tecniche più diffuse vi è il riutilizzo di materiale stradale ammalorato quale componente di nuove miscele bituminose utilizzate nella realizzazione di pavimentazioni in asfalto riciclato (RAP).

A supporto e prova della componente sostenibile del bitume, Eurobitume fornisce una analisi di inventario per la produzione di bitume e derivati: "The bitumen Life Cycle Inventory".

Figura 15 - Copertina "The bitumen LCI"

L'ultima versione del "The bitumen LCI" è la versione 3.0, pubblicata nel Gennaio 2020 e rappresenta uno studio cradle-to-gate, includendo così le quattro fasi

principali del ciclo di vita del bitume sulla base di informazioni raccolte da fonti accessibili e disponibili per eventuali consulti:

1. *Crude oil extraction*: informazioni riguardanti estrazione del petrolio greggio valutata attraverso una media mobile di cinque anni (2013-2017 inclusi);

2. *Pipeline Sea transport*: dati riguardanti il trasporto del greggio forniti da un costruttore navale e fattori di emissione forniti dall'Organizzazione marittima internazionale, IMO.

3. *Refining*: dati forniti da CONCAWE, l'Associazione Europea dei Raffinatori di Petrolio focalizzata sulle scienze ambientali.

4. *Storage*: informazioni riguardanti lo stoccaggio del bitume in raffineria.

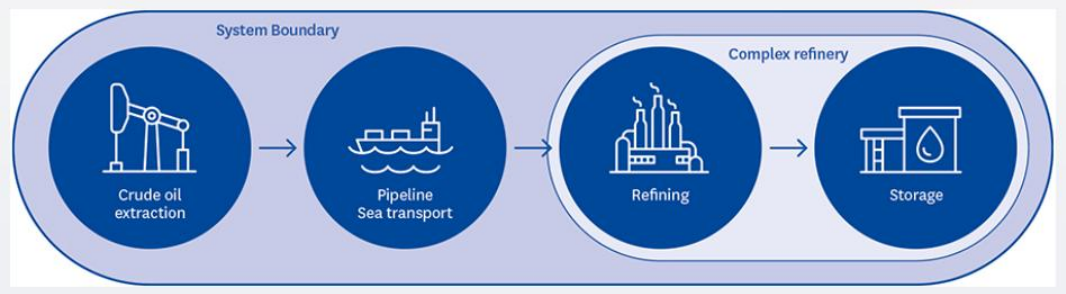


Figura 16 - Fasi LCA Bitume

L'importanza di utilizzare questo inventario come set di dati è legata alla validità europea e quindi italiana dell'analisi di inventario svolta da Eurobitume. Chiunque infatti voglia creare il nuovo processo denominato "Bitume" in SimaPro e software simili, può attingere al database di Eurobitume e impostare tali processi aventi informazioni su risorse ed emissioni del bitume sicuramente valide per la regione geografica corrente.

Per questo motivo che, come verrà illustrato in seguito, è stata adottata la banca dati di Eurobitume nello svolgimento del presente lavoro di tesi.

Inoltre, all'interno dello stesso report, sono pubblicate le LCI dei derivati del bitume vale a dire PMB (Polymer Modified Bitumen) e emulsione bituminosa. Ed ancora, Eurobitume fornisce i risultati di inventario per il ciclo di vita della produzione di 1 tonnellata di prodotto (bitume, polimero o emulsione bituminosa) così suddivisi:

- "process without infrastructure": è solo il processo di produzione del bitume, senza tenere in conto dell'infrastruttura e quindi di consumi ed emissioni della stessa;
- "process with infrastructure": include i flussi in entrata ed uscita legati oltre che alla produzione di bitume, anche alla realizzazione dell'infrastruttura richiesta per le fasi di produzione, trasporto e affinamento del petrolio greggio.

Si riporta di seguito l'analisi per il bitume.

LCI per la produzione di 1 tonnellata di bitume – senza infrastruttura

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

1) Excluding water cooling and turbine use

2) Excluding raw material

LCI per la produzione di 1 tonnellata di bitume – con infrastruttura

Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	26	1,0	0,054	0,082	27
Crude oil	kg	11,2	9,5	1,2	0,54	22
Consumption of non-energy resources						
Water[1)]	L	811	90	206	7,2	1 115
Emissions to air						
CO_2	g	130 157	33 258	19 278	6 650	189 343
SO_2	g	486	384	48	22	940
NO_x	g	549	646	20	8,3	1 224
CO	g	385	96	11,0	2,3	494
CH_4	g	486	42	4,3	2,7	535
NMVOC	g	411	39	3,0	0,98	455
Particulates	g	159	102	6,3	3,2	271
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	19 257	2 241	40	5,7	21 544
Biological Oxygen Demand	g	19 098	2 232	16	5,4	21 352
Suspended solids	g	260	34,2	7,22	0,55	302
Hydrocarbon (crude oil)	g	33,5	30	4,3	1,7	69,5
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	31,7	38	4,0	1,8	75

1) Excluding water cooling and turbine use

Tabella 1 - Confronto LCI bitume con e senza infrastrutture

2. IL SOFTWARE SIMAPRO

2.1 Un primo approccio col software

Il software di calcolo utilizzato nel presente lavoro di tesi è SimaPro. SimaPro, come altri software diffusi, è uno strumento di calcolo professionale che permette la ricostruzione di cicli di vita di prodotti e/o servizi, al fine di analizzarne e monitorarne le prestazioni ambientali, seguendo le direttive imposte dalle norme ISO 14040-14044, come già descritto precedentemente (To-be.it).

SimaPro ricopre molteplici compiti, tra i quali eseguire studi (LCA), eseguire computi per il rilascio della Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD), definire l'impronta ambientale a livello di prodotto e aziendale (carbon footprint e water footprint), nonché fungere da supporto nelle attività di comunicazione ambientale ed eco-design per aziende e marchi industriali.

Ad oggi sono disponibili differenti versioni, al fine di accomodare le esigenze dei diversi utenti, con pacchetti ad impronta professionale o semplicemente didattica.

La versione utilizzata in questo lavoro di tesi è la seguente: **SimaPro PhD with Share & Collect versione 9.1.1.7.**

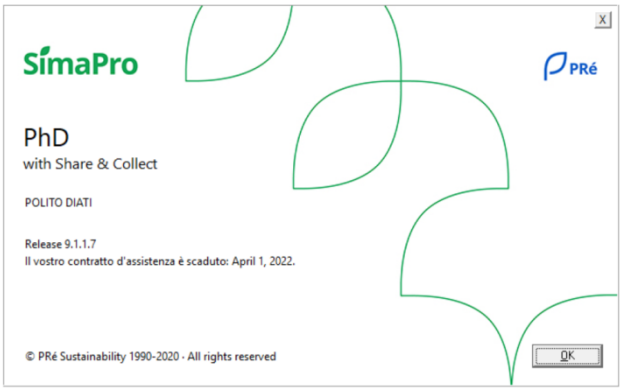


Figura 17 - Versione SimaPro

Aprendo il software, la prima finestra che appare è quella denominata "***Explorer analisi del ciclo di vita***", attraverso la quale è possibile avviare e svolgere lo studio LCA.

In particolare tale finestra si compone di 6 comparti principali, come illustrato nella seguente immagine.

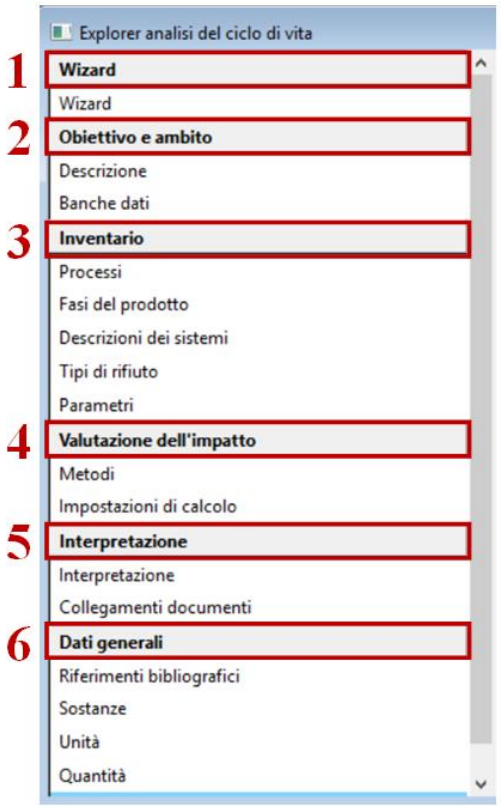


Figura 18 - Finestra "Explorer analisi del ciclo di vita"

1. Wizard

Attraverso la sezione Wizard, o in italiano Procedura guidata, è possibile sperimentare il software attraverso procedure guidate gratuite.

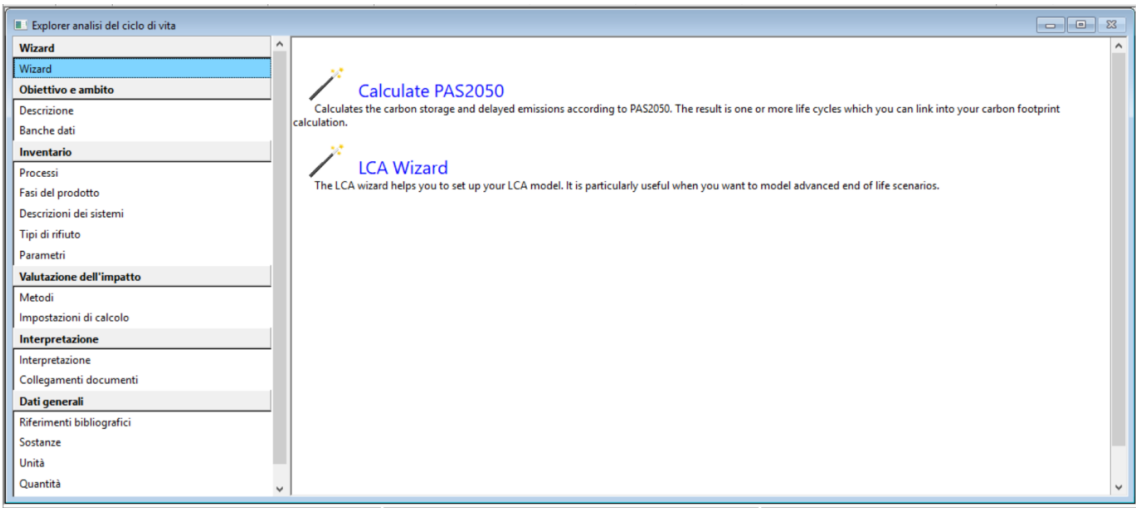


Figura 19 - Finestra "Wizard"

2. Obiettivo e ambito

È la sezione in cui è possibile appunto definire l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio LCA che si vuole condurre. Si compone a sua volta di due campi:

- **Descrizione**: in cui è possibile annotare svariate informazioni riguardanti il progetto che si vuole condurre, come ad esempio il titolo del progetto, la data, l'autore, il tipo di analisi condotta, l'obiettivo della stessa, l'unità funzionale e altro ancora.

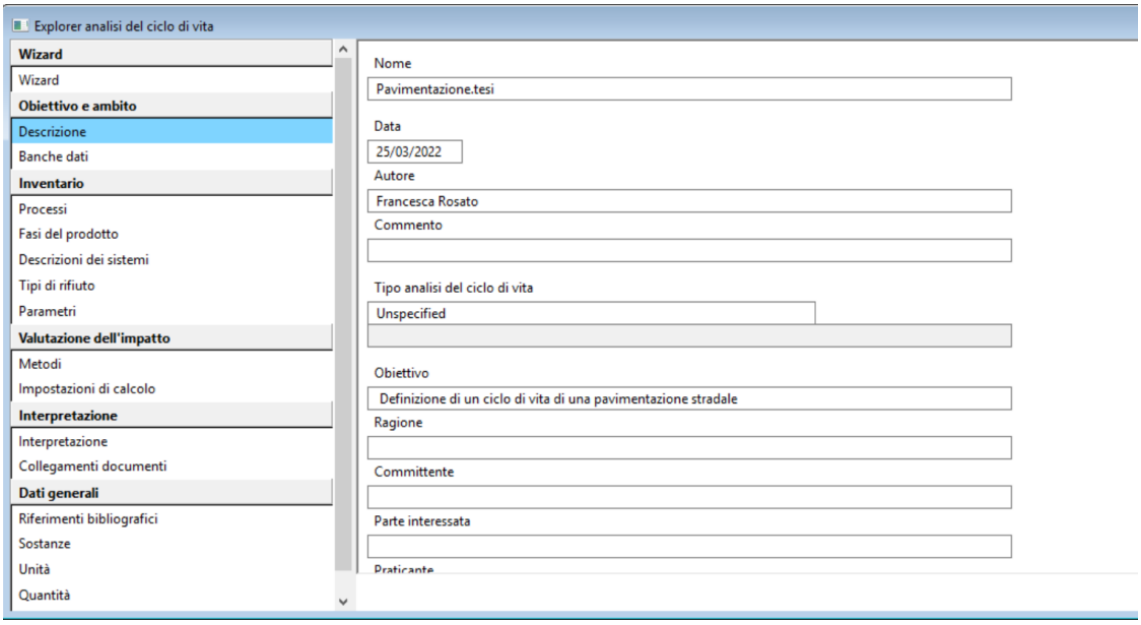


Figura 20 - Finestra "Obiettivo e ambito" ; Campo "Descrizione"

- **Banche dati**: in cui è possibile scegliere le librerie con dati standard che si ritengono adatte al progetto che si sta conducendo, anche in funzione del Paese in cui lo studio LCA viene condotto.

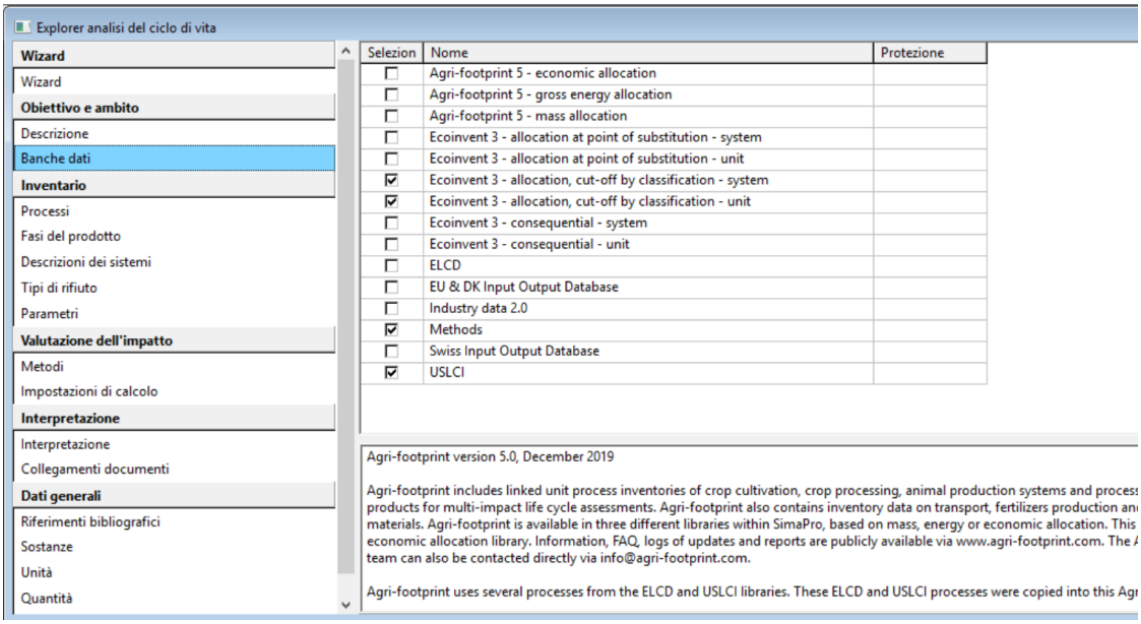


Figura 21 - Finestra "Obiettivo e ambito" ; Campo "Banche dati"

A tal proposito, si rimanda al concetto di dati di background citato nel precedente capitolo. SimaPro in particolare permette di distinguere dati di background che sono rilevanti per lo studio in esame da quelli che, momentaneamente, non ha senso utilizzare, perché poco rappresentativi delle situazioni esaminate. Ciò è realizzabile grazie al campo “Banche dati” della sezione “Obiettivo e ambito”, attraverso cui è possibile selezionare soltanto le librerie di interesse.

In tutte le versioni di SimaPro sono sempre presenti le librerie complete di Ecoinvent, la cui trattazione è rimandata nei capitoli successivi.

3. Inventario

Una volta selezionate le librerie, il software automaticamente carica tutti i processi contenuti nei database selezionati. Si passa quindi alla sezione “Inventario” in cui ha inizio praticamente la creazione del ciclo di vita.

Anche questa finestra si compone di diversi campi.

- **Processi:** è possibile scegliere e creare nuovi processi che compongono le fasi del ciclo di vita e scenari e processi di smaltimento.

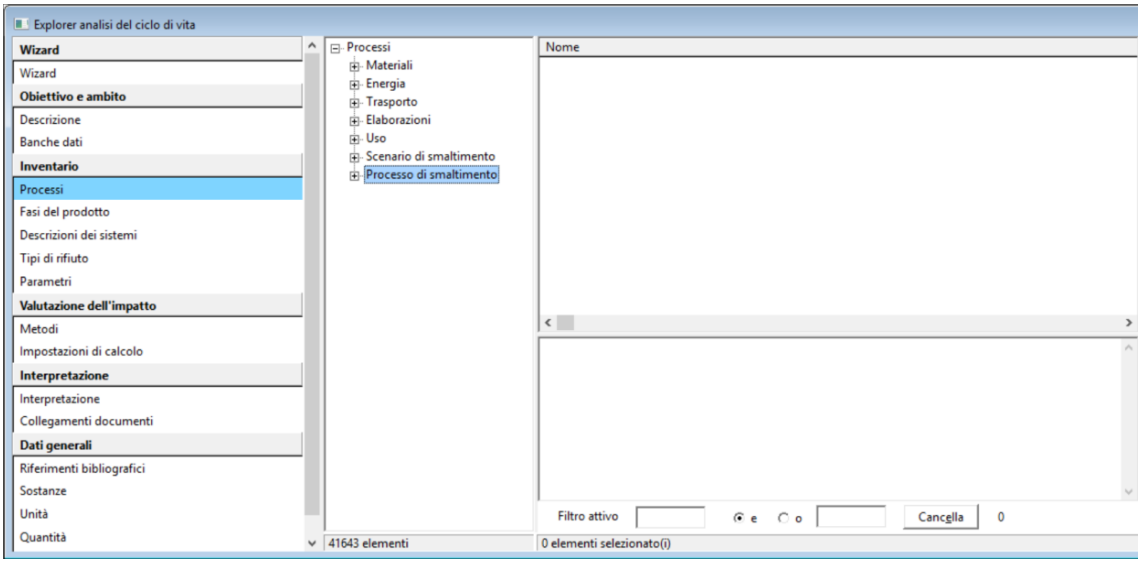


Figura 22 - Finestra "Inventario" ; Campo "Processi"

- **Fasi del prodotto:** è possibile creare assemblaggi e quindi cicli di vita completi dei processi precedentemente creati e/o selezionati, e ancora scenari di fine di vita e riutilizzo.

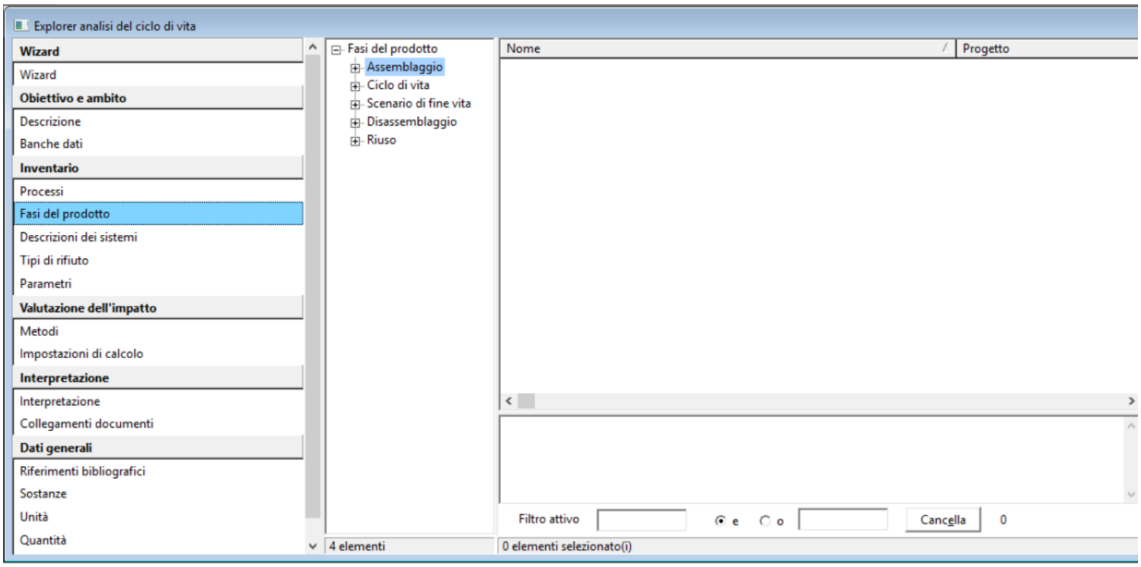


Figura 23 - Finestra "Inventario" ; Campo "Fasi del prodotto"

- **Descrizione dei sistemi:** in cui è possibile definire le caratteristiche dei metodi di valutazione scelti.

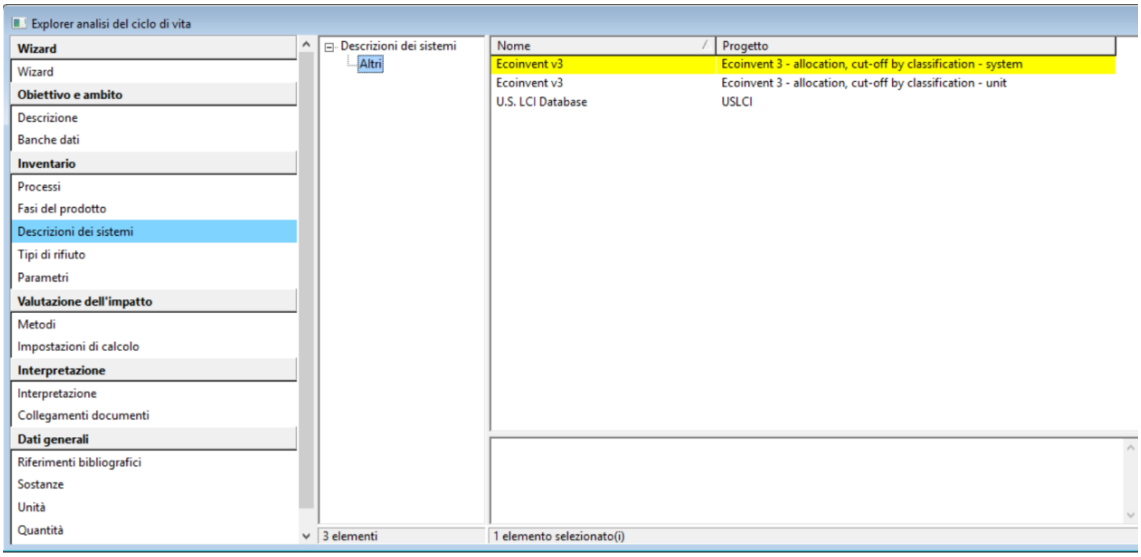


Figura 24 - Finestra "Inventario" ; Campo "Descrizione dei sistemi"

- **Tipi di rifiuto:** in cui è possibile selezionare i rifiuti risultanti dal ciclo di vita analizzato.

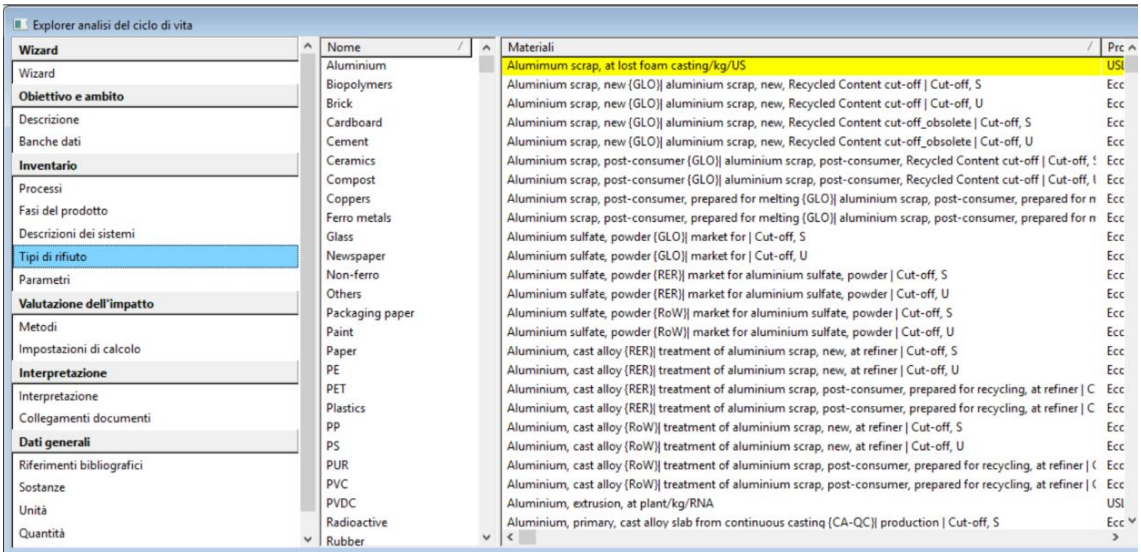


Figura 25 - Finestra"Inventario" ; Campo "Tipi di rifiuto"

- **Parametri:** in cui è possibile impostare dei parametri di valutazione.

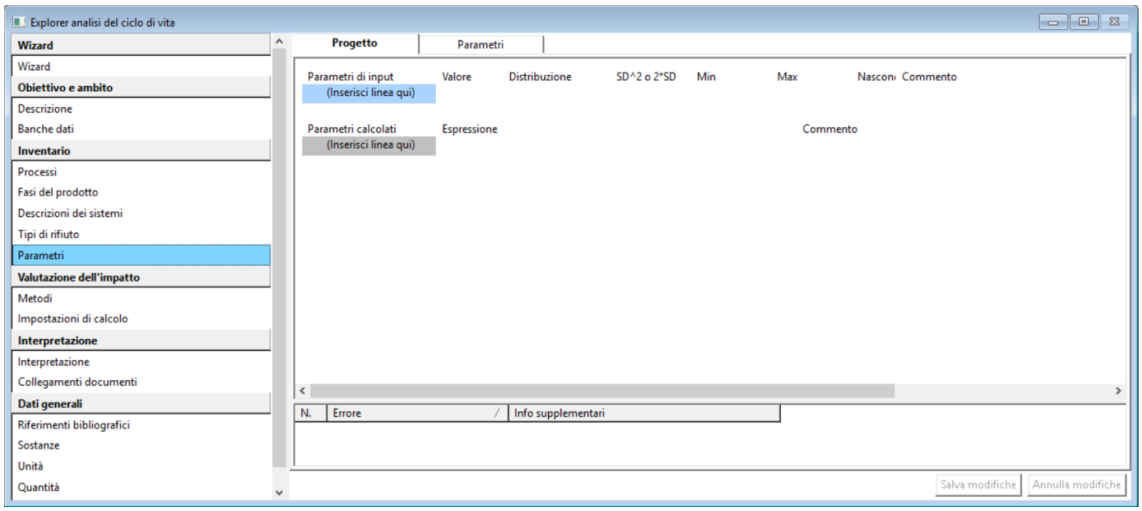


Figura 26 - Finestra "Inventario" ; Campo "Parametri"

4. Valutazione dell'impatto

SimaPro fornisce una vasta gamma di metodi di valutazione dell'impatto, ciascuno dei quali contiene a sua volta un numero variabile da 10 a 20 categorie di impatto. È possibile anche selezionare singole categorie di impatto, ma è consueto tra gli utenti scegliere un metodo e, attraverso l'apposita funzione del software, aggiungere o eliminare all'occorrenza categorie di impatto da o verso un metodo.

Questa finestra si compone di due campi:

- **Metodi:** attraverso cui è possibile selezionare uno o più metodi forniti dal software.

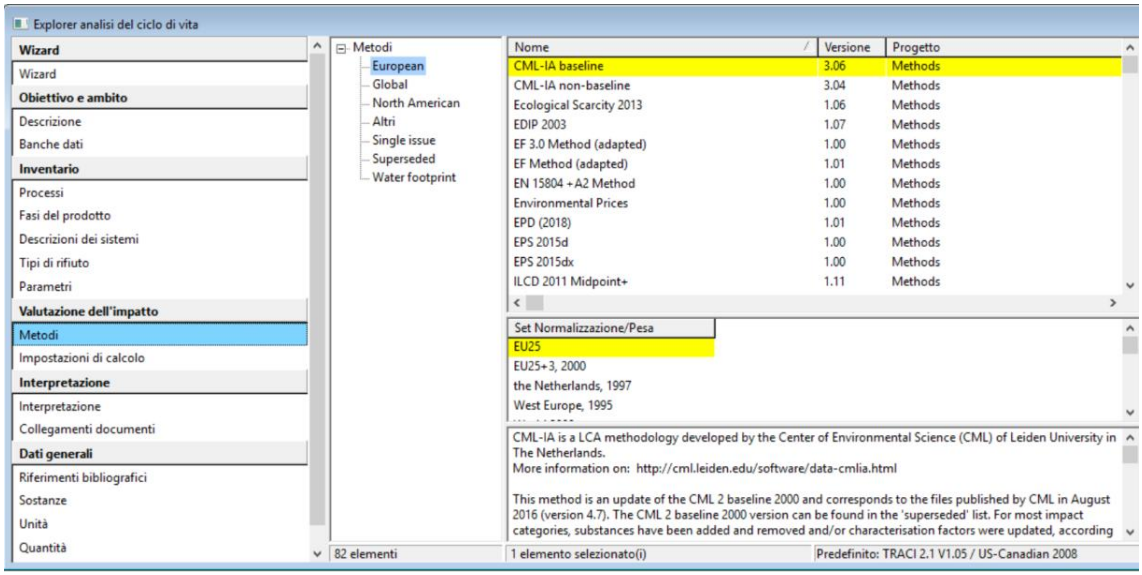


Figura 27 - Finestra "Valutazione dell'impatto" ; Campo "Metodi"

- **Impostazioni di calcolo:** attraverso cui è possibile definire le impostazioni di calcolo.

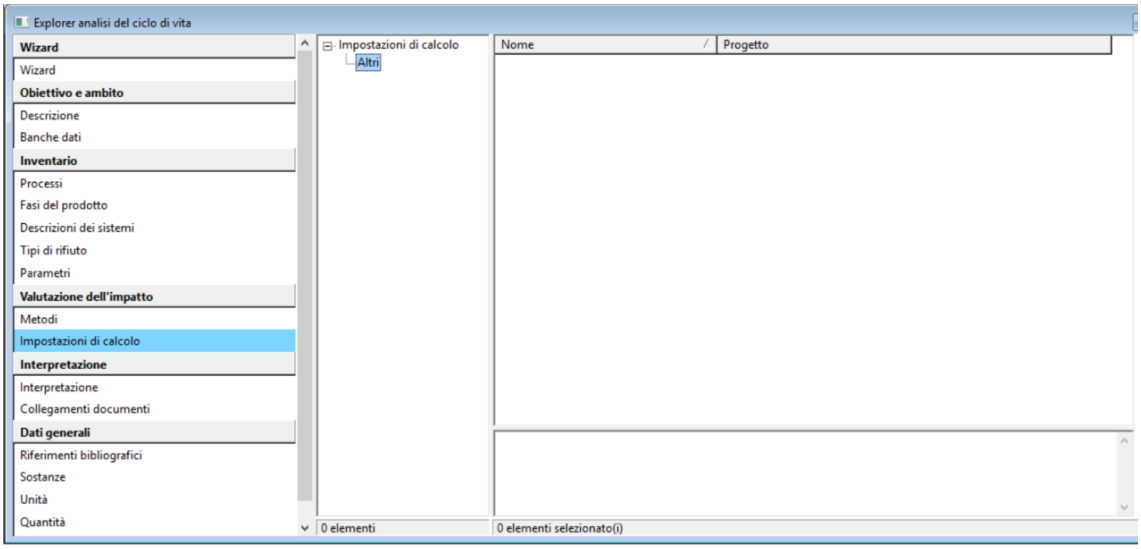


Figura 28 - Finestra "Valutazione dell'impatto" ; Campo "Impostazioni di calcolo"

5. *Interpretazione*

Questa sezione si rifà all'ultima fase di uno studio LCA, quella appunto dedicata all'interpretazione dei risultati.

Attraverso tale finestra è quindi possibile annotare informazioni, ragionamenti e deduzioni risultati dallo studio effettuato, al fine poi di generare, attraverso il comando dedicato, il report finale dello stesso.

Anche in questo caso, si distinguono due campi:

- **Interpretazione:** in cui è possibile, attraverso apposite sezioni fornite, annotare tutti i risultati dell'analisi.

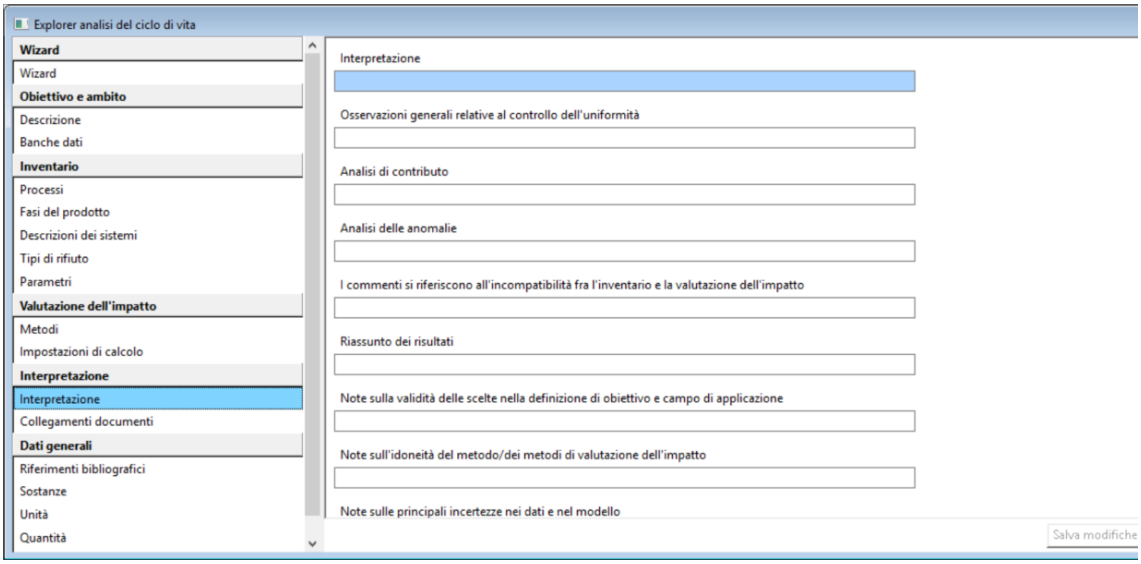


Figura 29 - Finestra "Interpretazione" ; Campo "Interpretazione"

- **Collegamenti documenti**: in cui è possibile inserire tutti i collegamenti in cui sono state trovate le informazioni utilizzate nello studio.

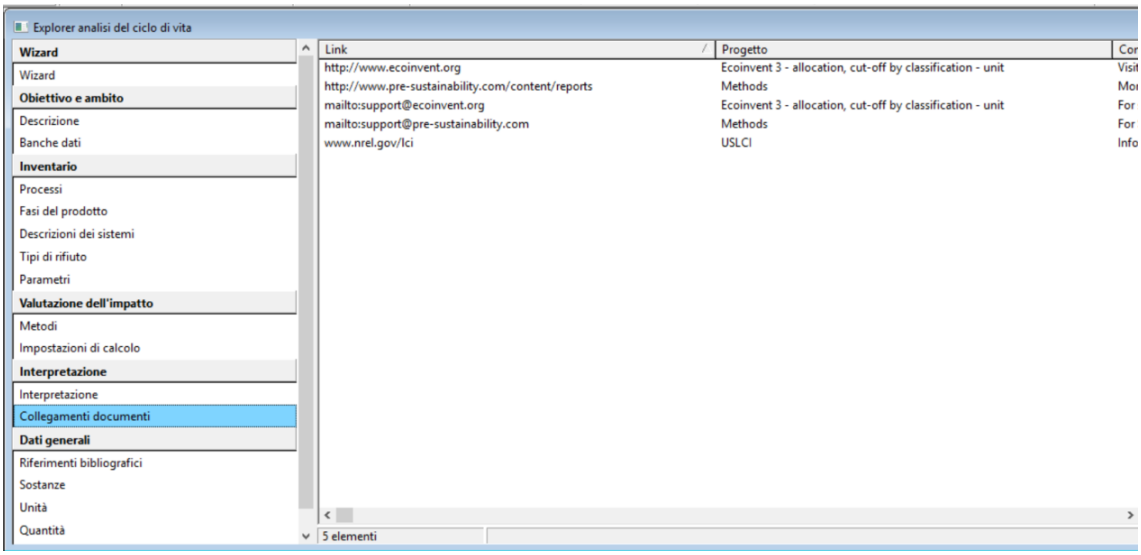


Figura 30 - Finestra "Interpretazione" ; Campo "Collegamenti documenti"

6. *Dati generali*

La sezione "Dati generali" è infine dedicata alle impostazioni del software. Attraverso tale sezione è possibile constatare ed eventualmente modificare le impostazioni base del software come ad esempio sostanze contenute, unità di misura e simili.

Si compone dei seguenti campi:

- **Riferimenti bibliografici:** contenenti le bibliografie dei database.

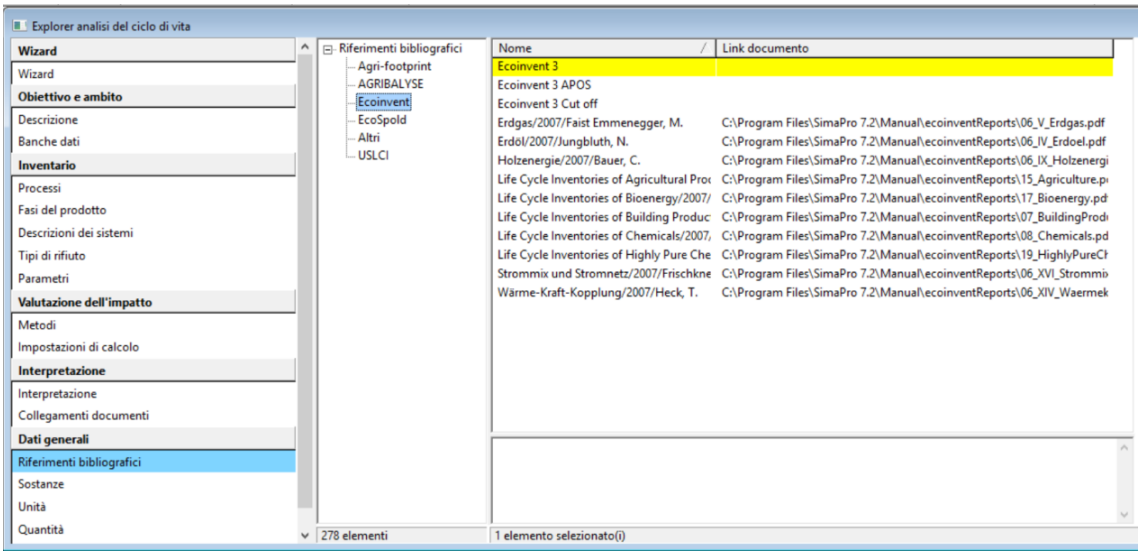


Figura 31 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Riferimenti bibliografici"

- **Sostanze:** contenenti tutte le sostanze possibili da utilizzare nell'analisi.

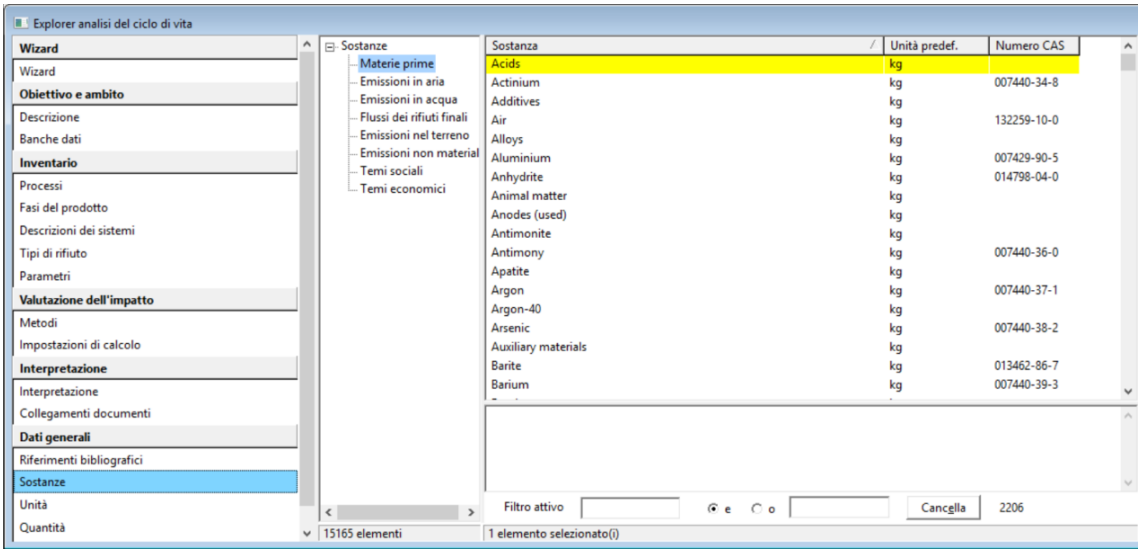


Figura 32 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Sostanze"

- **Unità:** contenenti le unità di misura utilizzabili.

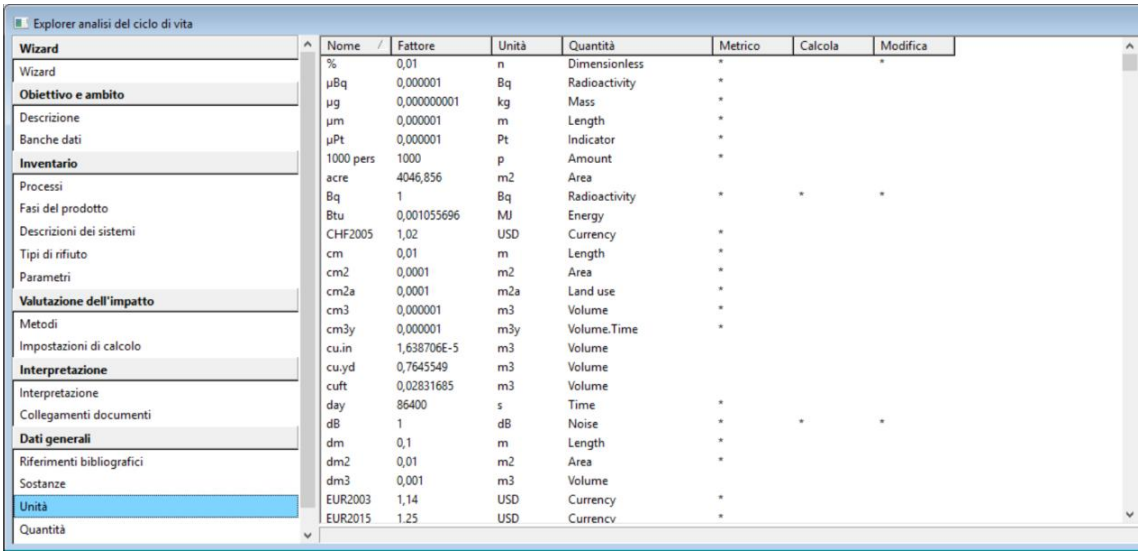


Figura 33 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Unità"

- **Quantità:** contenenti le dimensioni delle sostanze utilizzabili.

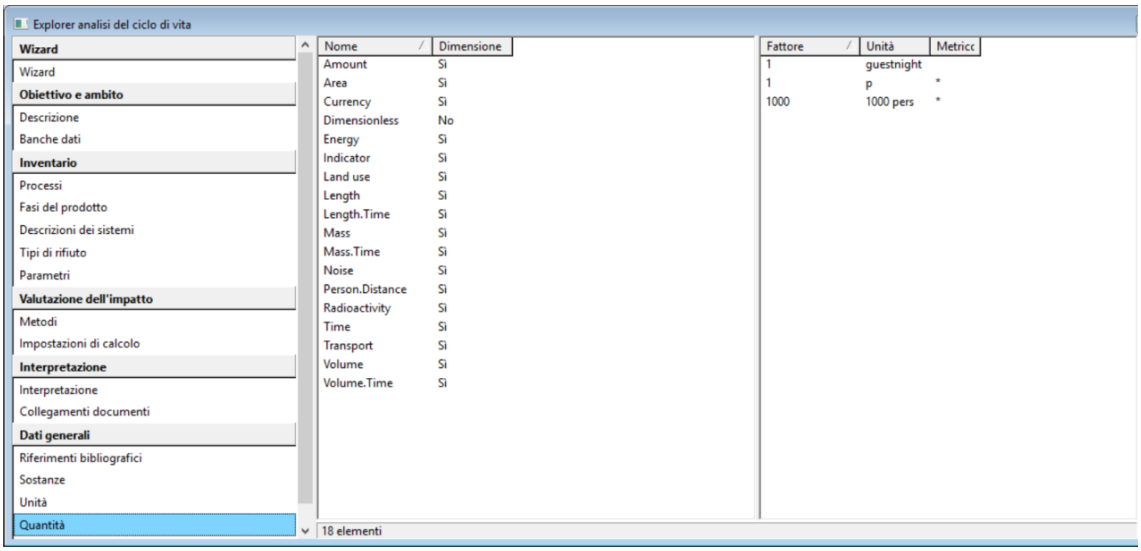


Figura 34 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Quantità"

- **Immagini:** contenenti le immagini installate nel software.

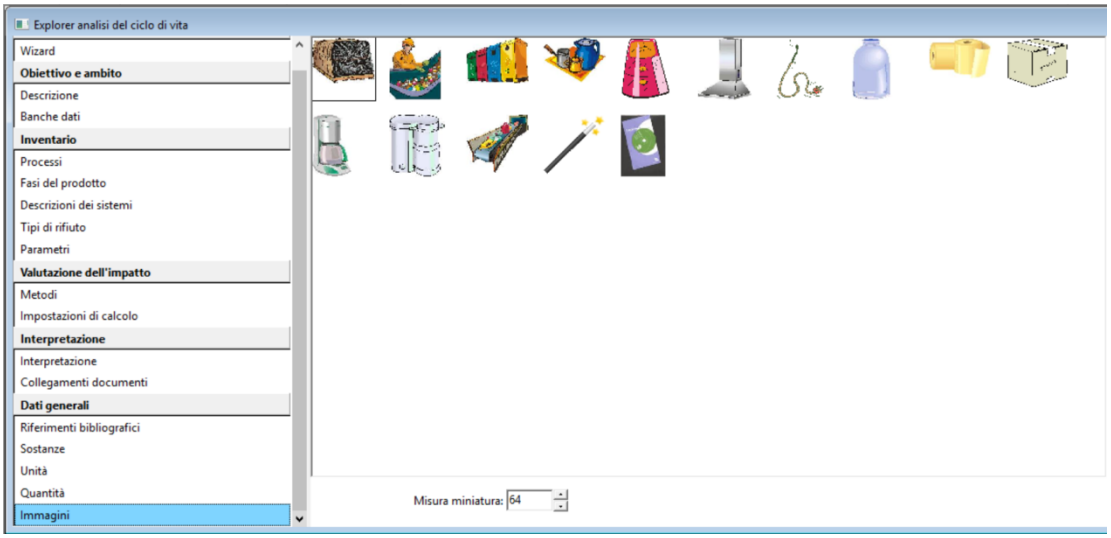


Figura 35 - Finestra "Dati generali" ; Campo "Immagini"

2.2 Le librerie di SimaPro

SimaPro supporta diverse banche dati quali:

- Ecoinvent
- Agri-footprint 4
- Agri-footprint 5
- EU & DK Input Output Library
- Swiss Input Output Library

Nel successivo paragrafo si porrà l'attenzione soltanto sulle librerie utilizzate nel presente lavoro di tesi.

2.2.1 Ecoinvent

Il database Ecoinvent è una libreria di alta qualità, integrata dal 2003 in SimaPro. Offre supporto ad aziende nella sperimentazione e produzione di prodotti armoniosamente con l'ambiente, e supporta la politica nelle scelte ambientali nonché invoglia i consumatori ad adottare stili e abitudini di vita meno impattanti a livello globale.

Ecoinvent è il risultato di uno sforzo congiunto di diverse istituzioni svizzere, ciascuna militante in diversi campi d'applicazione, come mostrato nella seguente immagine.

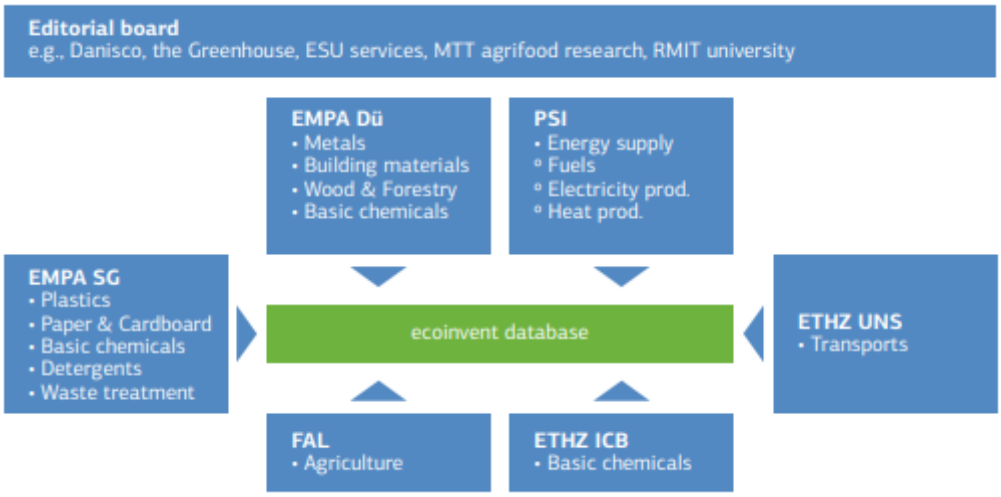


Figura 36 - Organizzazione Ecoinvent

ETH Zurigo, PSI, EMPA, EPF Losanna e ART forniscono ed aggiornano costantemente i dati per il database Ecoinvent. L'organizzazione inoltre si compone di un gruppo di esperti LCI, interno a tali istituzioni, responsabile della raccolta dei dati, e di un "Comitato editoriale", responsabile invece del controllo della qualità dei dati. Tuttavia, essi hanno il compito di eseguire la revisione, la convalida e la modifica di tutti i nuovi set di dati prima della loro inclusione nella banca dati LCI di Ecoinvent, sotto la supervisione degli esperti di LCI.

Questa libreria si compone di più di 18000 "set di dati", che modellano attività o processi umani ricadenti in differenti paesi regionali e globali. Ciascuno di questi "set di dati" si presenta come un piccolo ciclo di vita del prodotto e/o servizio rappresentato, e quindi consente già singolarmente di valutare l'impronta ambientale in termini di consumo di risorse naturali sottratte all'ambiente, di emissioni rilasciate in aria, suolo e acqua, ed ancora tutti i prodotti, come elettricità e carburante, richiesti da altri processi, co-prodotti e rifiuti prodotti (Ecoinvent.org).

I dataset contenuti in Ecoinvent rappresentano una fonte di dati conforme alle norme ISO 14040 e 14044, e ricoprono diversi settori industriali, tra i quali:

- Agricoltura e zootecnica
- Edilizia e costruzioni
- Prodotti chimici e plastica
- Energia
- Silvicoltura e legno
- Metalli
- Tessili
- Trasporti
- Alloggi turistici
- Trattamento dei rifiuti e riciclaggio
- Approvvigionamento idrico

Ogni set di dati è geograficamente localizzato e molto spesso è possibile scegliere tra set di dati omonimi ma differenti per collocazione geografica. Questo rappresenta uno dei punti di forza di Ecoinvent, in quanto permette di far riferimento a processi maggiormente rappresentabili per lo studio LCA che si sta conducendo.

Tuttavia, dal momento che la libreria di Ecoinvent rappresenta un database in background, l'obiettivo è quello di coprire le attività nelle aree geografiche più rilevanti per il prodotto o servizio selezionato ed, allo stesso tempo, la copertura geografica dipende dalla qualità e dalla disponibilità dei dati. Pertanto, quasi ogni attività nel database presenta un set di dati che rappresenta il processo a livello globale, ovvero la produzione globale media.

2.3 I metodi di valutazione dell'impatto

Anche per la scelta del metodo di valutazione dell'impatto, SimaPro offre differenti metodi, suddivisi tra le seguenti categorie:

- European
- Global
- North American
- Single Issue
- Superseded
- Water footprint
- Altri

Per il presente lavoro di tesi, le metodologie di valutazione dell'impatto usate sono state due: IPCC 2013 e TRACI.

IPPC 2013

Il metodo IPCC 2013 (Intergovernmental Panel on Climate Change) è l'evoluzione del precedente IPCC 2007, sviluppato dall'Organizzazione Internazione sui Cambiamenti Climatici (Prè, June 2020).

Questo metodo restituisce direttamente l'impatto dovuto al Global Warming Potential delle emissioni in aria. In particolare:

- È esclusa la formazione indiretta di monossido di azoto dalle emissioni di azoto.
- Non tiene conto del forzante radiativo dovuto alle emissioni di NOx, acqua, solfato,ecc nella bassa stratosfera e nella troposfera superiore.
- Non considera la gamma di effetti indiretti dovuta all'IPCC.
- Non include la formazione di CO2 dalle emissioni di CO.

TRACI

Il secondo metodo utilizzato è stato TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts). Quest'ultimo è stato sviluppato negli Stati Uniti dall'Agenzia Americana di Protezione Ambientale, US Environmental Protection Agency. Per tali ragioni rispecchia condizioni ambientali tipiche americane (Gabi.Sphera).

È un metodo di valutazione a punto medio, per cui le categorie di impatto sono caratterizzate a livello intermedio, ed includono:

- l'impoverimento dell'ozono,
- il riscaldamento globale,
- la formazione di smog,
- l'acidificazione,
- l'eutrofizzazione,
- le sostanze cancerogene per la salute umana,
- le sostanze non-cancerogene per la salute umana,
- tutti gli inquinanti per la salute umana,
- l'eco-tossicità,
- l'esaurimento dei combustibili fossili,
- l'uso del suolo e l'uso dell'acqua.

Anche tale metodo viene accuratamente aggiornato in funzione degli sviluppi attuali, dei regolamenti e delle politiche EPA.

3. Revisione di uno studio presente in letteratura

La prima fase di sperimentazione di tale lavoro di tesi ha riguardato lo studio del ciclo di vita di una pavimentazione flessibile standard, sulla base di uno studio condotto in Colombia da Vega A. et all. nel 2020.

Tale studio in particolare si poneva l'obiettivo di condurre una analisi comparativa, seguendo un approccio "cradle to gate", tra una pavimentazione flessibile standard, di seguito denominata HMA0, e tre altre pavimentazioni contenenti rispettivamente il 15%, 30% e 45% di RCA (Recycled Concrete Aggregates). I cicli di vita di tali pavimentazioni erano stati implementati con l'ausilio del software SimaPro 8.4.0, mentre la valutazione dell'impatto è stata analizzata seguendo il protocollo TRACI versione 2.1. I risultati ottenuti hanno evidenziato che miscele contenenti il 15% e 30% di RCA posso considerarsi ottime alternative "eco-friendly" alla miscela tradizionale HMA0, in quanto abbattono considerevolmente le produzioni degli indicatori d'impatto considerati. Al contrario, la miscela contenente il 45% di RCA si dimostra meno performante delle altre (Daniela L. Vega A., 2022).

3.1 Le basi dello studio colombiano

In Colombia, come del resto in tutti i Paesi, studi recenti dimostrano come il settore dell'industria sia cresciuto considerevolmente negli ultimi decenni. In particolare, il settore delle infrastrutture ha portato alla realizzazione di nuovi tratti stradali per un totale di 2700 nuove costruzioni e 40000 rifacimenti stradali(Martinez-Arguelles, 2019).

Tuttavia, insieme all'esigenza di nuove rotte stradali, si è diffusa sempre più l'esigenza di valutare l'impatto ambientale di queste nuove soluzioni. Tra le varie problematiche meritano di essere citati i seguenti campi di attenzione: il consumo e il danneggiamento del suolo terrestre, il consumo di energia, la generazione di rifiuti, le emissioni di rumori e gas, il consumo di fonti non rinnovabili di energia.

Come più spesso accennato, conseguentemente alla sensibilizzazione della comunità terrestre verso problematiche ambientali e conseguentemente alla consapevolezza della stessa società di un non ritorno alle condizioni passate, anche il mondo delle costruzioni stradali si è aperto alla sperimentazione di nuove tecniche di realizzazione meno impattanti. Il risultato di studio e sforzi congiunti ha portato, ad esempio, alla sperimentazione di miscele innovative contenenti scarti di materiale stradale bituminoso, noto come Recycled Asphalt Pavement (RAP), o il Recycled Concrete Aggregate (RCA), ed altro ancora.

3.2 Caso Studio

Il presente caso studio rappresenta l'analisi del ciclo di vita del solo strato binder di una pavimentazione flessibile tradizionale.

L'approccio adottato è del tipo "cradle to gate": dalla produzione dei materiali costituenti la miscela, alla realizzazione fisica dello strato di collegamento.

In particolare sono state identificate cinque fasi principali:

I. Produzione dei materiali;
II. Trasporto dei materiali all'impianto di miscelazione;
III. Lavorazione dei materiali e produzione della miscela nell'impianto;
IV. Trasporto della miscela fino al sito di realizzazione della pavimentazione;
V. Realizzazione della pavimentazione stradale.

La seguente immagine mostra i principali processi e i confini di sistema considerati.

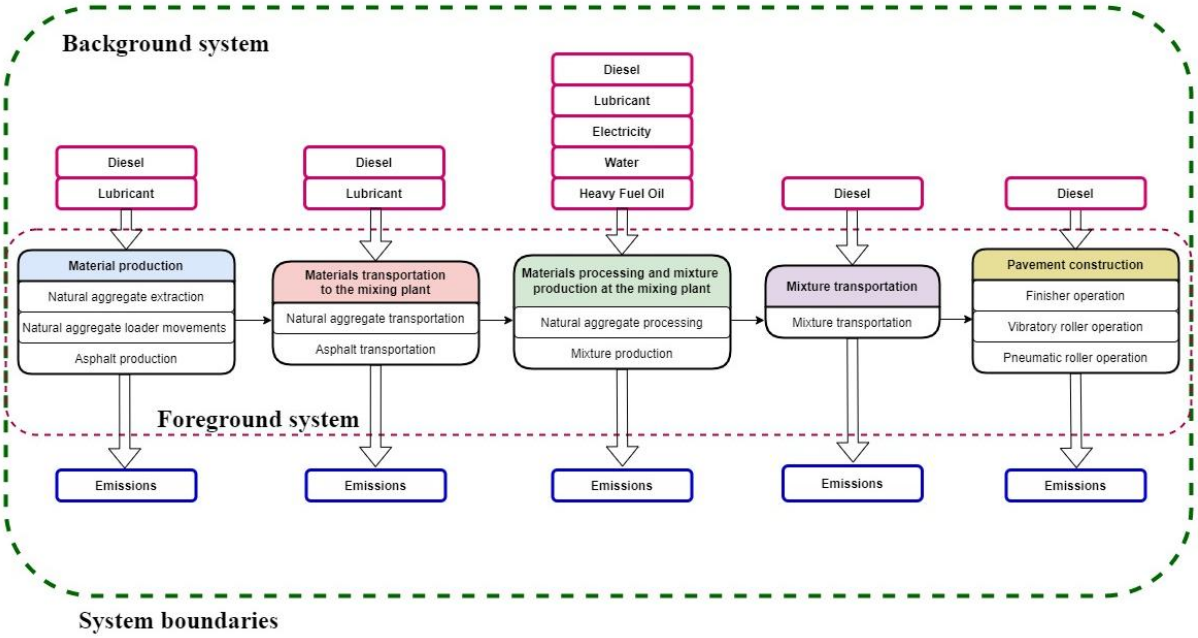


Figura 37 - Confini del sistema e processi principali

L'unità funzionale è rappresentata da una sezione tipica di una strada extraurbana colombiana, dalle seguenti caratteristiche:

- Lunghezza: 1 km;
- 1 sola corsia di larghezza 3,5 m.

La struttura della pavimentazione è stata identificata in accordo ai livelli e composizione di traffico e alla capacità portante del subgrade di Barranquilla, città della Colombia situata a nord del Dipartimento dell'Atlantico(Wikipedia).

In particolare, la struttura di progetto è stata definita per:

- Un livello di traffico pari a $5x10^6$ ESAL (Equivalent Single Axle Load) di 80 kN,
- Un CBR del 7,5%, e
- Una vita utile di 10 anni.

La stratigrafia della sezione considerata per la pavimentazione HMA0 è illustrata nella seguente immagine:

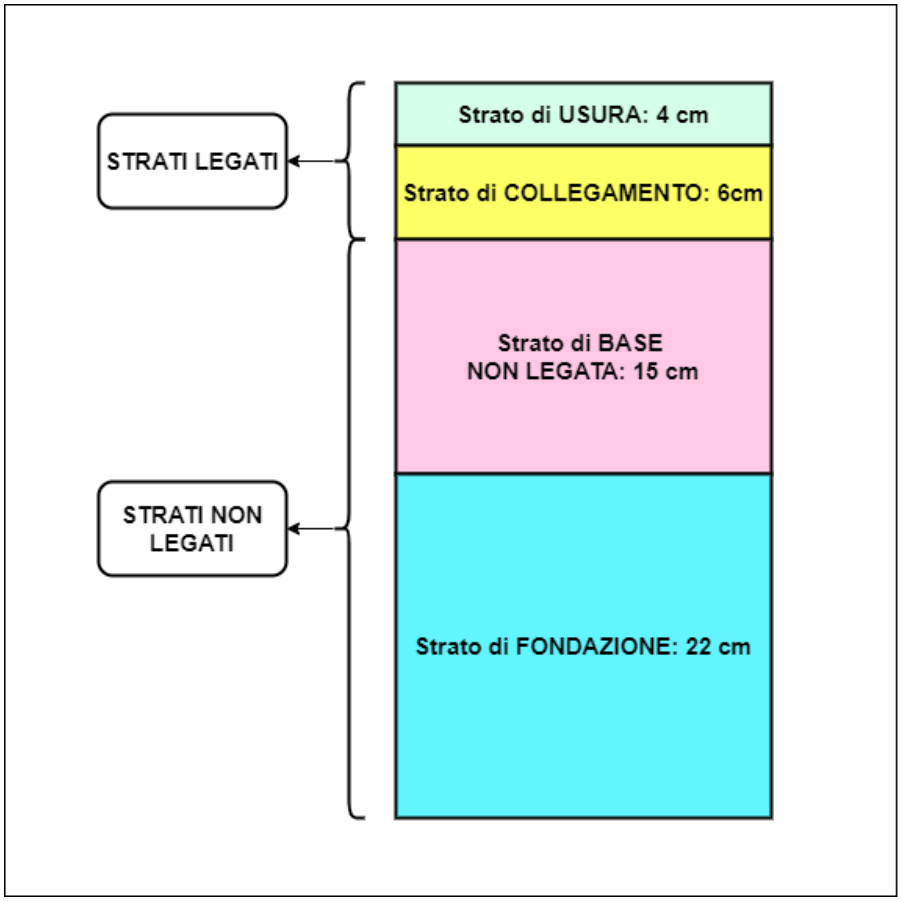


Figura 38 - Stratigrafia pavimentazione HMA

Il seguente studio LCA cerca di seguire quanto più fedelmente possibile le raccomandazioni ed i criteri definiti nel "Pavement LCA Framework" **(Harvey, 2016)**

In accordo a tali prescrizioni, l'unità funzionale scelta deve includere:

- Caratteristiche sulle dimensioni fisiche della sezione: ad esempio, lunghezza, larghezza e numero di corsie.
- Indicatori di performance della pavimentazione: ad esempio, la vita utile di progetto.

- Criteri di performance: ad esempio, sicurezza stradale, qualità della percorrenza, livelli di traffico, spettro di carico, velocità caratteristiche, condizioni climatiche e ingegneristiche.

Come già detto, questa sezione verrà confrontata con altre tre caratterizzate per la presenza di RCA nella miscela bituminosa. La nostra trattazione si limita alla riproduzione del solo studio LCA della pavimentazione HMA0, per un successivo confronto dei risultati ottenuti con quelli presentati dagli stessi autori dell'articolo.

Le pavimentazioni non convenzionali sono state implementare grazie a test di laboratorio al fine di definirne le caratteristiche geometriche e strutturali secondo gli standard convenzionali di design colombiani.

Si riporta in seguito una tabella riassuntiva delle proprietà delle pavimentazioni analizzate.

	Mixture			
	HMA0	**HMA15**	**HMA30**	**HMA45**
Natural Aggregate				
Quantity (%)	95,60%	88,30%	80,90%	73,50%
Recycled Concrete Aggregate				
Quantity (%)	0,00%	15,00%	30,00%	45,00%
Asphalt				
Quantity (%)	4,40%	4,50%	4,80%	5,20%
Properties				
Density (kg/m^3)	2366,00	2310,00	2305,00	2289,00
Air voids (%)	4,30%	4,80%	4,60%	4,80%
Voids filled with asphalt (%)	66,60%	66,50%	67,20%	66,00%
Voids in the mineral aggregate (%)	12,70%	14,20%	13,90%	14,20%
Stability (kN)	17,20	14,80	16,70	20,10
Flows (mm)	2,90	2,70	3,00	3,40
Resilient Modulus (MPa)	1531,00	2077,00	2066,00	1223,00

Tabella 2 - Composizione e caratteristiche miscele

Infine, attraverso il software di calcolo Pitra Pave 1.0.0 sono state definite le caratteristiche di progetto delle diverse pavimentazioni in accordo con le caratteristiche e gli standard di performance delle miscele tipiche colombiane. Cosi facendo, sono state definite tensione e deformazione critiche in differenti punti della pavimentazione al fine di valutare la risposta a rutting e fessurazione.

I valori di input per tale software sono stati i seguenti:

	Subgrade	Traffic	Modulus (MPa)			
Type of mixture	**Mr (MPa)**	**ESAL (80 kN)**	**SC**	**BC**	**GB**	**SGB**
HMA0	78	$5x10^6$	2856	1531	250	200
HMA15	78	$5x10^6$	2856	2077	250	200
HMA30	78	$5x10^6$	2856	2066	250	200
HMA45	78,00	$5x10^6$	2857	1223	250	200

Tabella 3 - Dati input Pitra Pave 1.0.0

Nella seguente tabella invece si riportano i risultati restituiti da Pitra Pave 1.0.0 in termini di composizione stratigrafica delle 4 tipologie di pavimentazioni.

	Thickness (cm)				
	Asphalt layers		Granular layers		
Type of mixture	**SC**	**BC**	**GB**	**SGB**	**Total**
HMA0	4	6	15	22	47
HMA15	4	5	15	22	46
HMA30	4	5	15	22	46
HMA45	4	7,5	15	22	48,5

Tabella 4 - Output Pitra Pave 1.0.0

I dati utilizzati nel presente ciclo di vita derivano da indagini e test di laboratorio. In particolare, sono stati esaminati 4 differenti impianti di miscelazione dai quali sono stati ricavati dati importanti. Questi dati poi sono stai combinati con altri derivanti da informazioni circa il design delle miscele, le proprietà degli aggregati e le performance meccaniche di conglomerati bituminosi ottenuti da specifici test di laboratorio. Accanto ai dati primari, sono stati utilizzati dati secondari, derivanti da letteratura e database, come Ecoinvent.

3.2.1 LCI - Inventario

L'analisi di inventario del LCA si compone di dati primari provenienti da interviste ed indagini effettuate e dati secondari, ricavati da database forniti da SimaPro, come Ecoinvent e USLCI.

Riassumendo, si ottiene la seguente tabella:

FASE LCA	Nome del processo	Data set	Tipo di dato	Dato input
I. Produzione dei materiali	Natural aggregate extraction	"Gravel, crushed {RoW} | production | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Diesel = 0,272 MJ/kg
	Natural aggregate load movements	"Loader operation, large" [USLCI]	Primario	Diesel = 26 gal/hr Lubrificante = 0,3 kg/hr
	Asphalt production	"Bitumen, at refinery/kg/US" [USLCI]	Secondario	-
II. Trasporto dei materiali all'impianto di miscelazione	Natural aggregate transportation	"Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW} | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Diesel = 0,025 kg/tkm Distanza = 73 km
	Asphalt transportation	"Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW} | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Diesel = 0,023 kg/tkm Distanza = 592 km
III. Lavorazione dei materiali e produzione della miscela nell'impianto	Natural aggregate processing	"Diesel, burned in building machine {GLO} | market for | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Diesel = 10,989 MJ/ton Lubrificante = 0,69 g/ton Elettricità = 2,33 kWh/ton Acqua = 100 kg/ton
	Mixture production	"Heat, district or industrial, other than antural gas {RoW} | heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Energia = 241,4 MJ/ton
IV. Trasporto della miscela al sito di realizzazione della pavimentazione	Mixture transportation	"Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW} | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Primario	Diesel = 0,025 kg/tkm Distanza = 9,4 km
V. Realizzazione della pavimentazione stradale	Finisher operation	"Machine operation, diesel, >=74,57 kW, high load factor {GLO} | market for | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Secondario	Performance = 60 m^3/hr
	Vibratory roller operation	"Machine operation, diesel, >=74,57 kW, high load factor {GLO} | market for | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Secondario	Performance = 65 m^3/hr
	Pneumatic roller operation	"Machine operation, diesel, >=74,57 kW, high load factor {GLO} | market for | Alloc Def, U" [Ecoivent]	Secondario	Performance = 65 m^3/hr

Tabella 5 - Inventario LCA

3.3 Implementazione sul software

Avendo a disposizione dati primari da immettere come dati input, l'implementazione sul software ha seguito differenti fasi. Di seguito la spiegazione.

Fase 1: Realizzazione di un flow-chart

In qualsiasi studio LCA, è importante valutare la logica alla base del ciclo di vita che è necessario creare. La prima fase consiste quindi nella redazione di un flow-chart, attraverso cui comprendere la sequenza delle fasi del ciclo di vita e comprendere come

rappresentare questo sul software. Su SimaPro infatti è possibile creare assemblaggi o processi che comprendano a loro volta sottoprocessi. Per far ciò è quindi importante avere idea di cosa dover riprodurre sul software.

In particolare, nel presente caso studio sono stati individuati 3 stadi principali lungo i quali si sviluppa il ciclo di vita.

- STADIO 1: Comprende i processi di produzione dei materiali utili alla composizione della miscela.
- STADIO 2: Comprende i processi di produzione della miscela all'interno dell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso.
- STADIO 3: Comprende i processi finali di realizzazione dello strato binder.

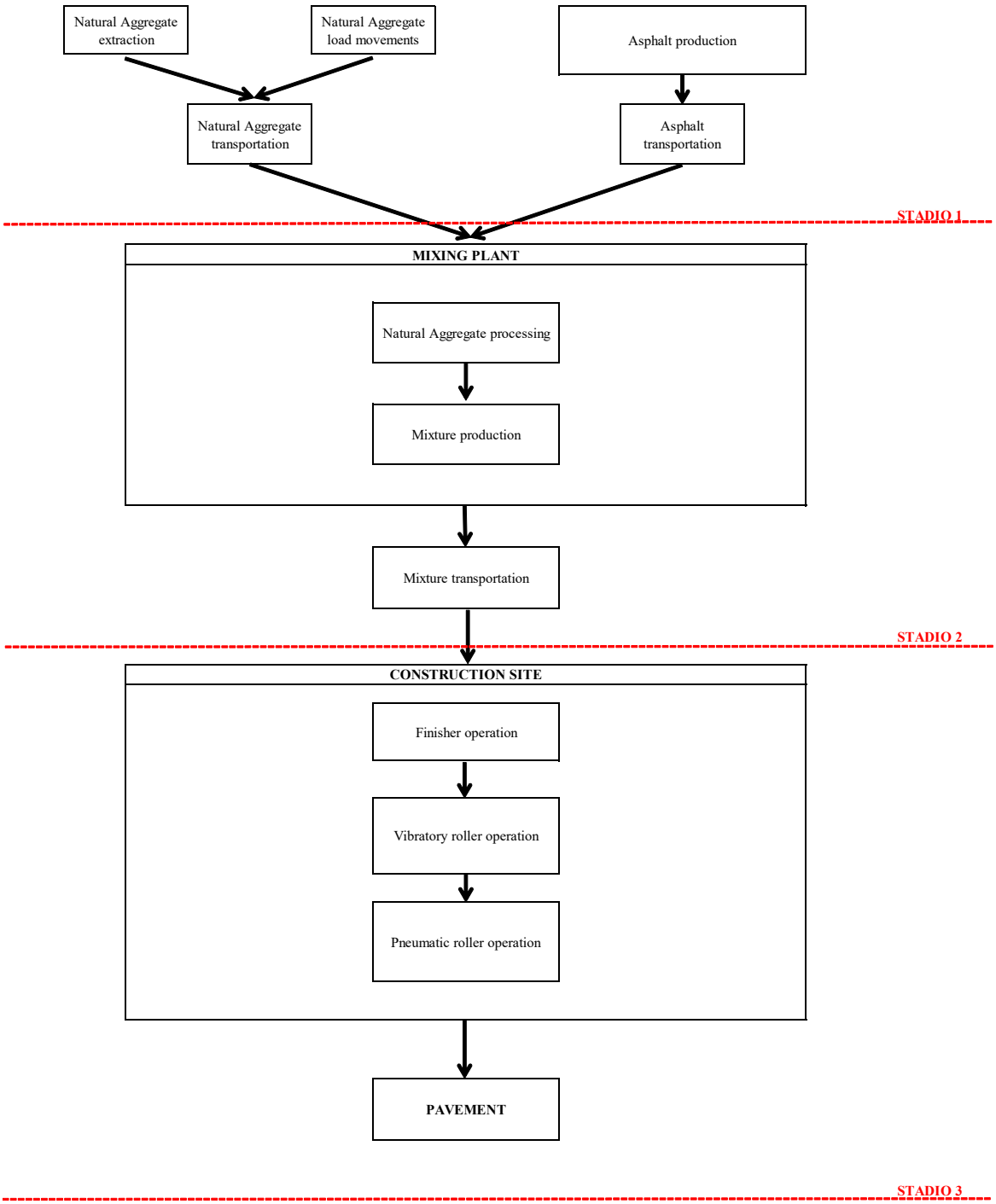


Figura 39 - Flow-chart iniziale di analisi

Fase 2: Ricerca dei processi su SimaPro

Successivamente si è passato alla definizione dei processi.

SimaPro, grazie ai suoi database, dispone di un ingente numero di processi, tale da non consentire una facile individuazione degli stessi. Inoltre, dispone di omonimi processi differenti però per collocazione geografica o caratteristiche proprie del processo selezionato. Ad esempio, se bisogna ricercare processi sull'elettricità, SimaPro fornisce processi differenti per Paese considerato e processi differenti per voltaggio.

Per venire incontro a tale difficoltà, SimaPro fornisce uno strumento di ricerca attraverso il quale, immettendo delle parole chiave, è possibile ricercare il processo desiderato.

Per arrivare a tale comando è necessario seguire alcuni passaggi:

1. Creare un nuovo processo;
2. Posizionarsi in una delle caselle dedicate all'immissione di input;

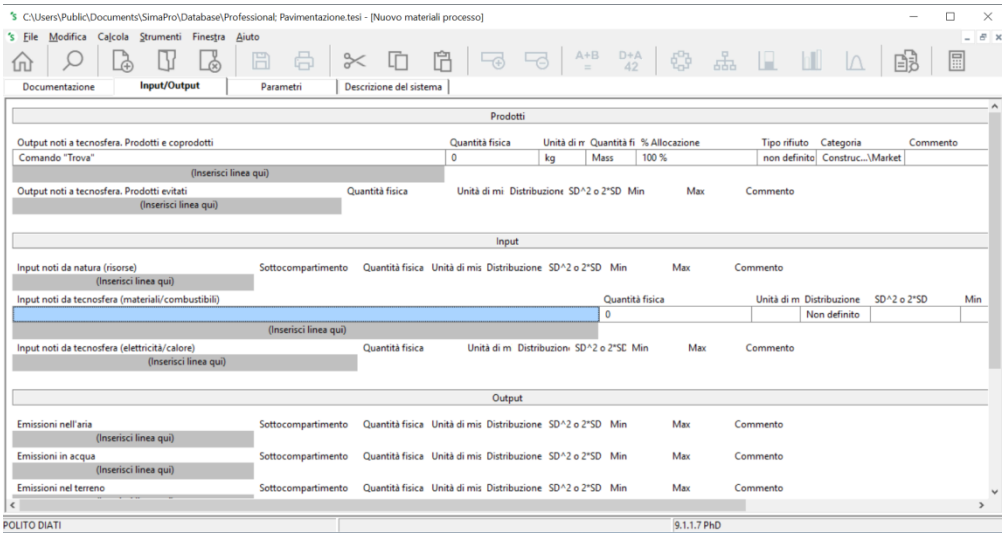


Figura 40 - Passaggi 1-2 comando "Trova"

3. Si aprirà la finestra "Seleziona un prodotto", scegliere quindi il comando "Trova" posto sulla sinistra;

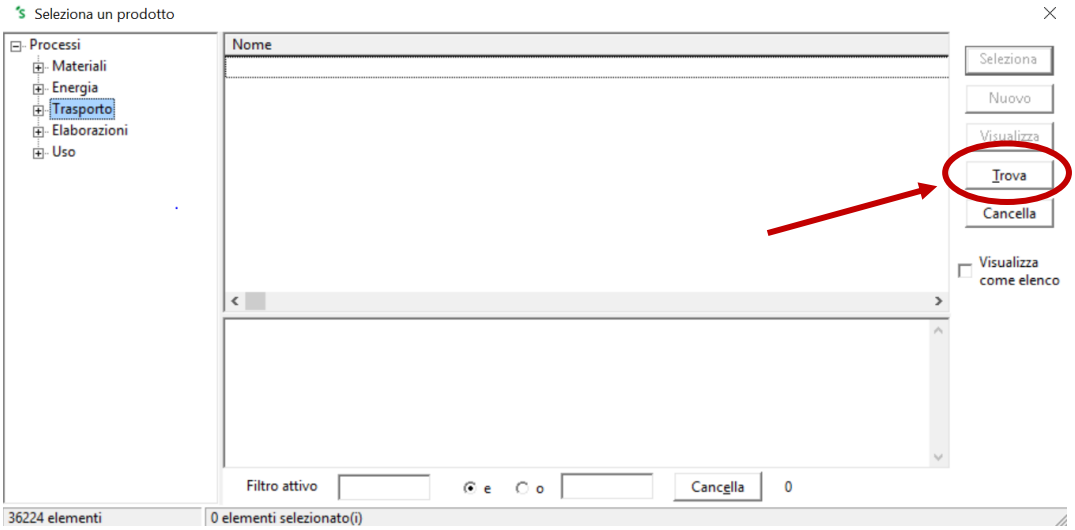


Figura 41 - Passaggio 3 comando "Trova"

4. Quindi si aprirà la finestra “Trova”, e compilando il campo “Testo” è possibile effettuare la ricerca.

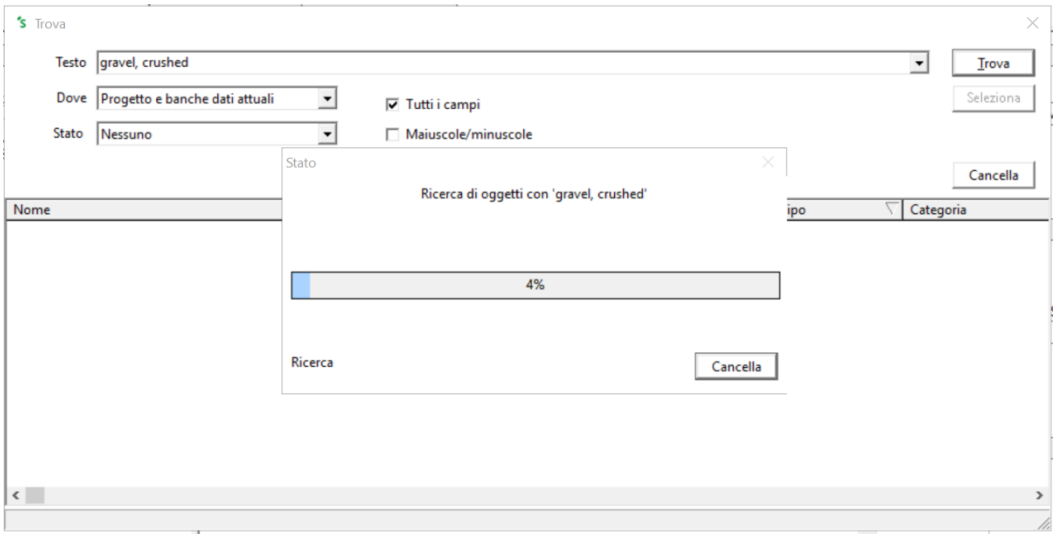


Figura 42 - Passaggio 4 comando "Trova"

Tuttavia, se il processo da ricercare appartiene al database Ecoinvent, è possibile effettuare una ricerca online del database sul sito *www.ecoinvent.org*. Anche in questo caso il procedimento è molto semplice, previa registrazione, gratuita per gli utenti con licenza SimaPro, sul sito dell’organizzazione.

1. Collegarsi sul sito *www.ecoinvent.org* ed effettuare il login al database, cliccando in alto a destra sul comando “Login Database”;

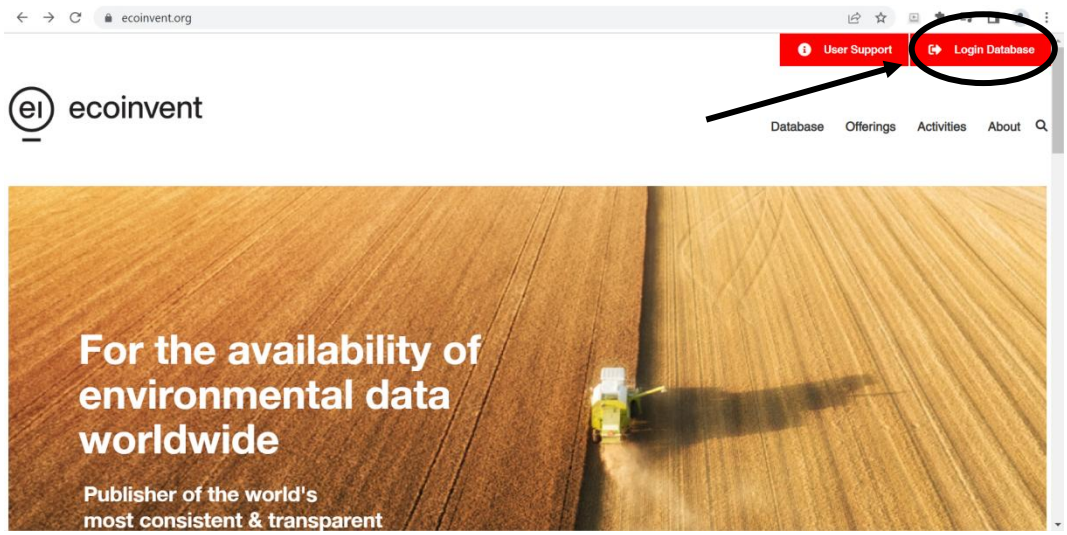
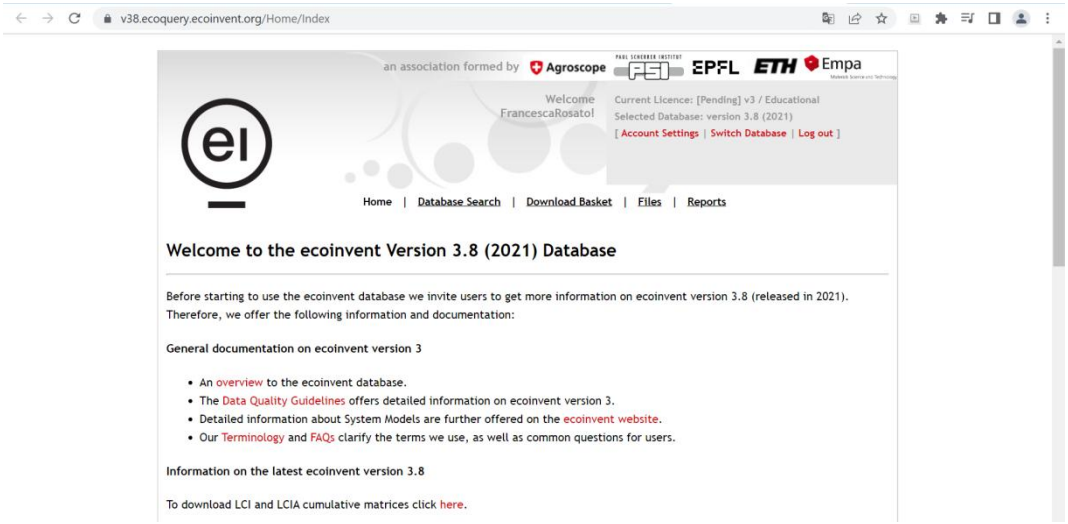


Figura 43 - Passaggio 1 ricerca database Ecoinvent

2. Effettuando il login, si aprirà la seguente schermata di benvenuto: selezionare la versione di database nella quale si vuole effettuare la ricerca, quindi "Search database";



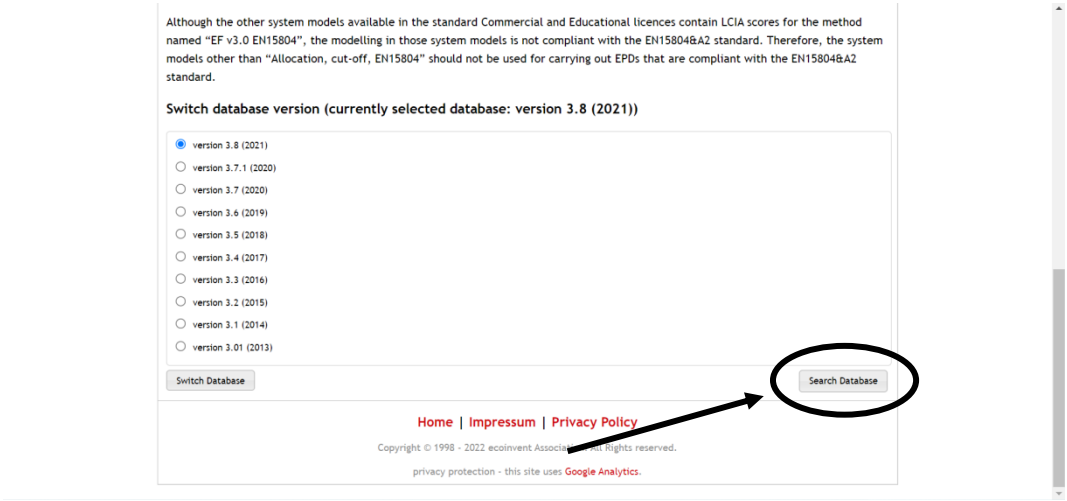


Figura 44 - Passaggio 2 ricerca database Ecoinvent

3. Immettere la parola chiave da ricercare e selezionare il modello di sistema necessario, quindi cliccare su "cerca";

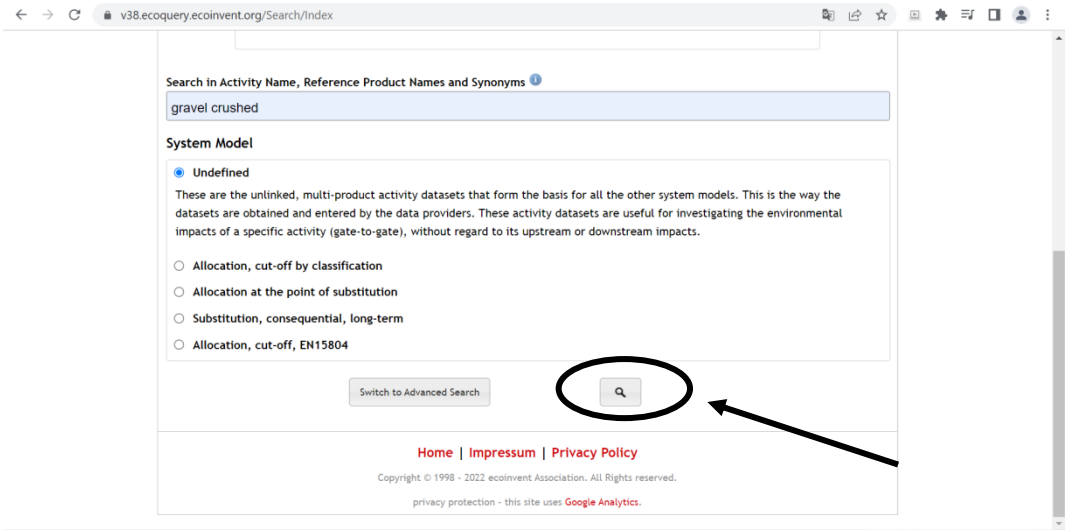


Figura 45 - Passaggio 3 ricerca database Ecoinvent

4. Come ultimo passaggio si aprirà l'elenco dei processi disponibili.

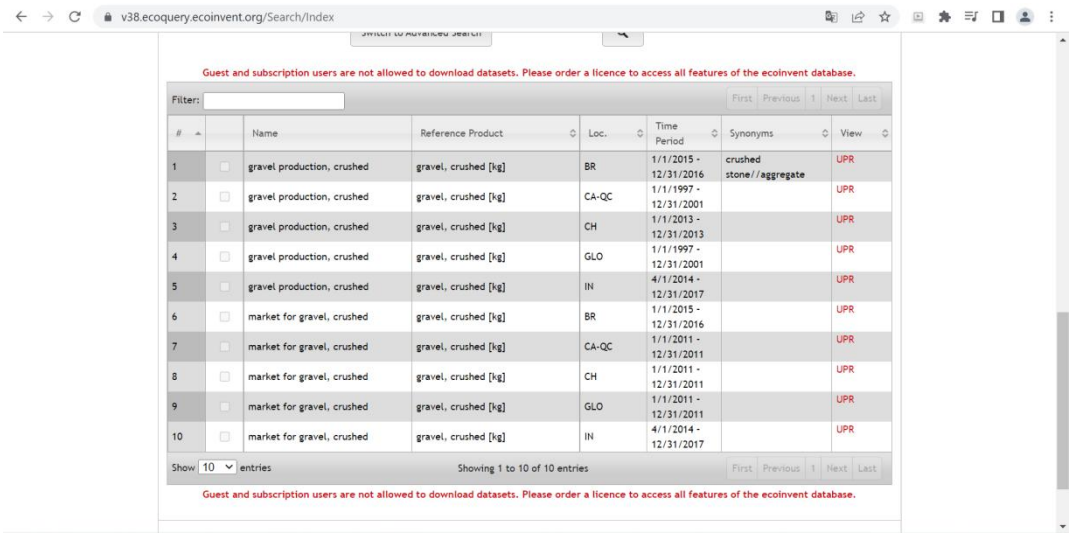


Figura 46 - Passaggio 4 ricerca database Ecoinvent

Fase 3: Creazione nuovi processi

Si è più volte ribadito come l'inventario di tale ciclo di vita si compone di dati primari e dati secondari. In particolare, nonostante molti dei processi siano già disponibili nei database di SimaPro, affinché si possano utilizzare i dati primari a disposizione, è necessario creare delle copie dei processi e modificare gli input di tali processi.

Ad esempio, il processo contenuto nel database USLCI presenta dati input differenti rispetto ai dati primari a disposizione, per cui si è provveduto alla modifica del processo inserendo i dati corretti.

Processo: Loader operation, large		
Materials/fuels	**Dato: USLCI**	**Dato: Primario**
Diesel, combusted in industrial equipment/US	18,9375 l	26 gal = 98,42 l
Dummy_Lubricants, unspecified, at plant/US	0,233529 kg	0,3 kg

Tabella 6 - Dati input processo "Loader operation"

Fase 4: Creazione del macro-processi

È noto come è possibile creare macro processi su SimaPro seguendo procedure differenti. In questo caso, non sono stati creati degli assemblaggi, bensì processi aventi per input sub-processi.

L'unico macro-processo della presente analisi è poi il risultato finale della stessa:

- PAVEMENT

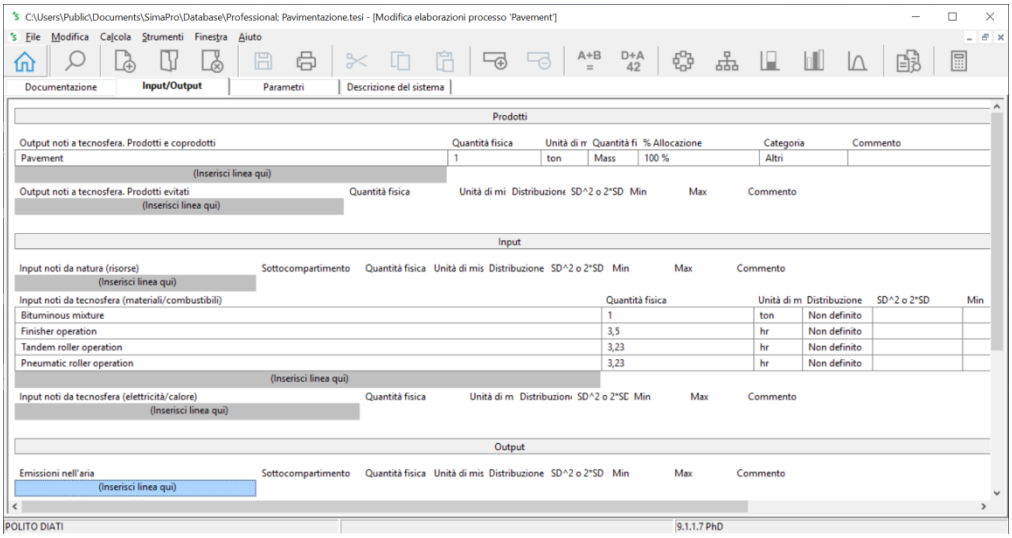


Figura 47 - Macro-processo "Pavement"

Fase 5: Creazione della rete finale

Definito quindi il processo finale “Pavement” è possibile visualizzare la rete finale di 1 tonnellata di pavimentazione realizzata.

Modalità di visualizzazione: **Caratterizzazione**

Indicatore: **Global Warming (kg CO2 eq)**

Cut Off: **1%**

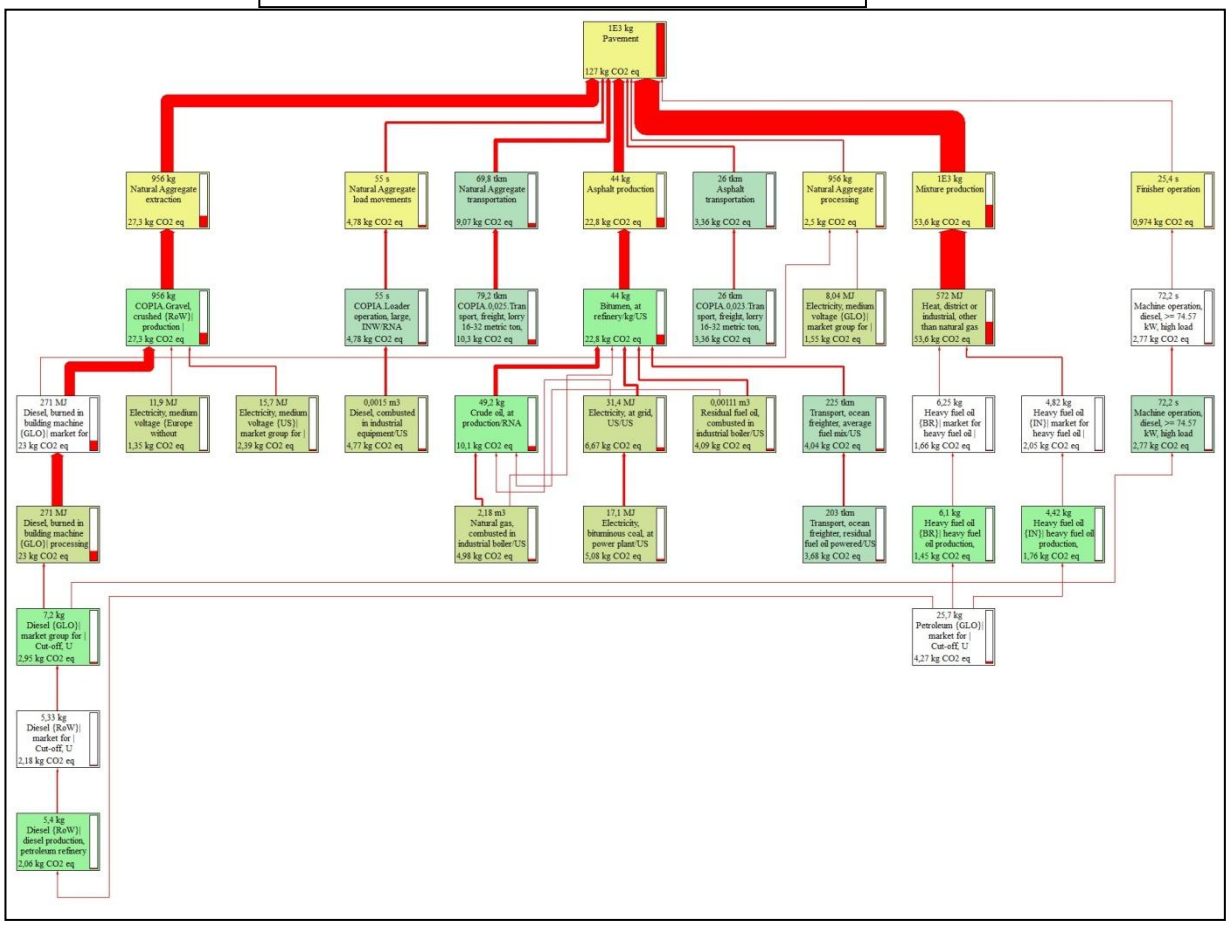
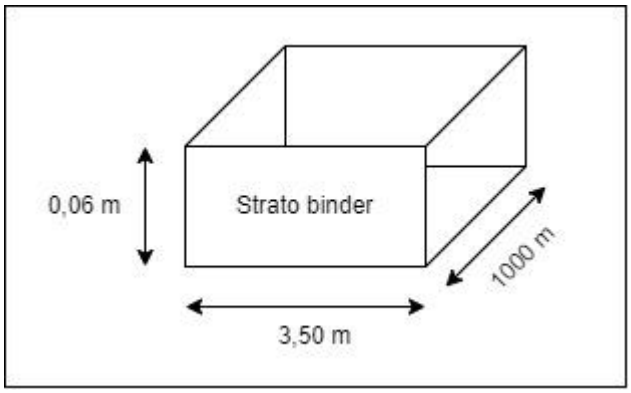


Figura 48 - Rete macro-processo "Pavement"

3.4 Risultati

Per effettuare un confronto tra i risultati ottenuti con questa versione di SimaPro e quelli pubblicati da Vega A. et al. è necessario impostare la stessa unità funzionale.

In particolare, nota la densità della miscela e il volume dello strato binder è possibile determinare la quantità di miscela necessaria per tale strato.



Data la geometria dello strato il suo volume si determina come:

$$Volume = 0{,}06\ m * 3{,}50\ m * 1000\ m = 210\ m^3$$

La densità della miscela è pari a:

$$Densità = 2{,}366\ ton/m^3$$

Quindi la quantità di miscela necessaria a coprire tale volume è:

$$Quantità = 2{,}366 \frac{ton}{m^3} * 210\ m^3 = 496{,}86\ ton$$

Valutando pertanto il ciclo di vita della pavimentazione per 496,86 ton di miscela si ottengono i seguenti risultati:

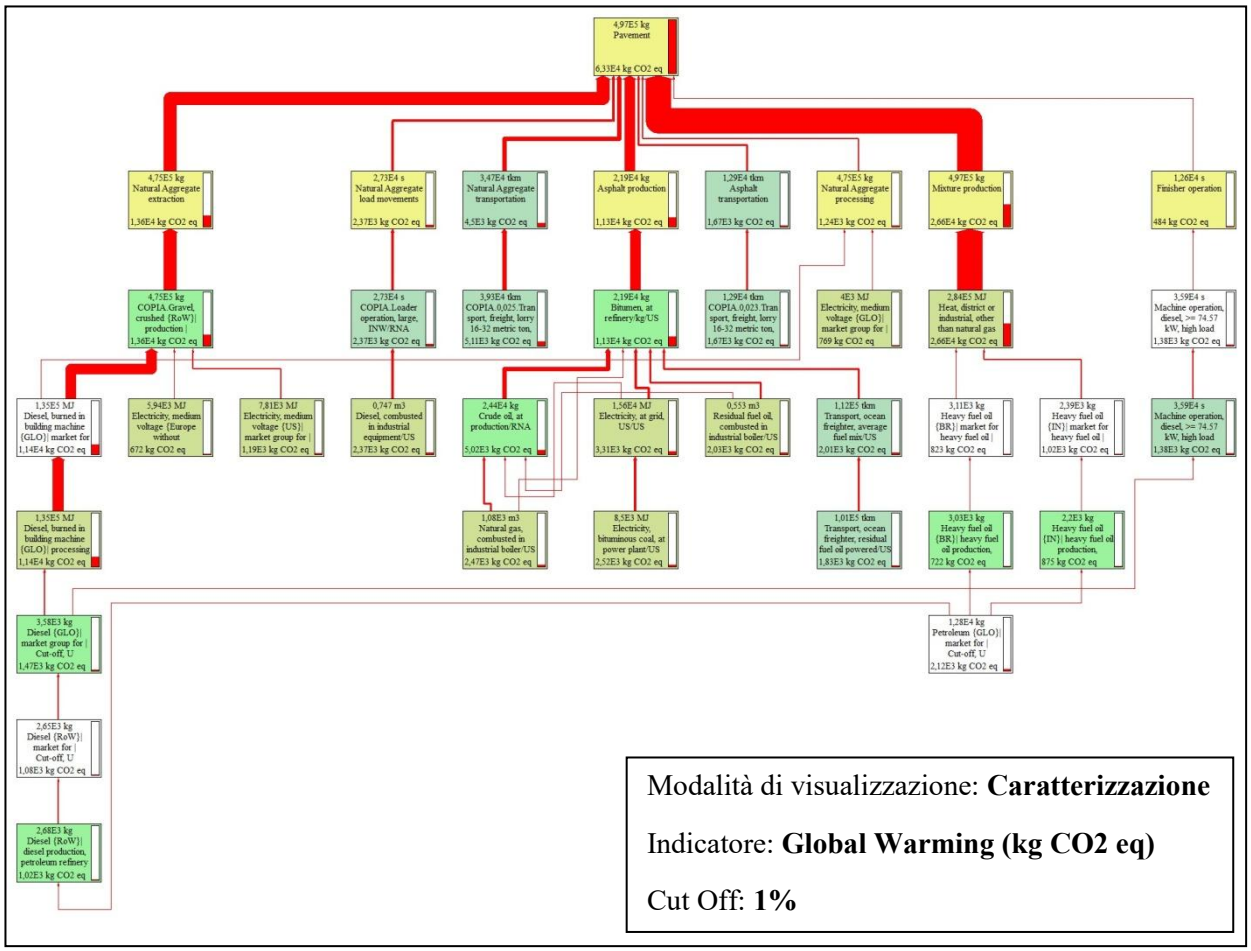


Figura 49 - Rete "Pavement" con 496,86 ton di miscela

OZONE DEPLETION	
Processo	**kg CFC-11 eq**
Natural Aggregate extraction	2,87E-03
Natural Aggregate load movements	1,90E-06
Natural Aggregate transportation	7,81E-04
Asphalt production	3,27E-06
Asphalt transportation	2,68E-04
Natural Aggregate processing	1,53E-04
Mixture production	5,67E-03
Mixture transportation	1,05E-04
Finisher operation	1,15E-04
Pneumatic roller operation	1,06E-04
Vibratory roller operation	1,06E-04
TOTALE	**1,02E-02**

GLOBAL WARMING	
Processo	**kg CO2 eq**
Natural Aggregate extraction	1,36E+04
Natural Aggregate load movements	2,37E+03
Natural Aggregate transportation	4,50E+03
Asphalt production	1,13E+04
Asphalt transportation	1,67E+03
Natural Aggregate processing	1,24E+03
Mixture production	2,66E+04
Mixture transportation	6,07E+02
Finisher operation	4,84E+02
Pneumatic roller operation	4,46E+02
Vibratory roller operation	4,46E+02
TOTALE	**6,33E+04**

SMOG	
Processo	**kg O3 eq**
Natural Aggregate extraction	3,52E+03
Natural Aggregate load movements	1,03E+03
Natural Aggregate transportation	5,07E+02
Asphalt production	1,73E+03
Asphalt transportation	1,88E+02
Natural Aggregate processing	1,81E+02
Mixture production	1,03E+03
Mixture transportation	6,83E+01
Finisher operation	4,89E+01
Pneumatic roller operation	4,52E+01
Vibratory roller operation	4,52E+01
TOTALE	**8,40E+03**

ACIDIFICATION	
Processo	**kg SO2 eq**
Natural Aggregate extraction	1,20E+02
Natural Aggregate load movements	3,26E+01
Natural Aggregate transportation	1,76E+01
Asphalt production	1,51E+02
Asphalt transportation	6,46E+00
Natural Aggregate processing	7,88E+00
Mixture production	1,67E+02
Mixture transportation	2,38E+00
Finisher operation	1,84E+00
Pneumatic roller operation	1,69E+00
Vibratory roller operation	1,69E+00
TOTALE	**5,11E+02**

EUTROPHICATION	
Processo	**kg N eq**
Natural Aggregate extraction	1,14E+01
Natural Aggregate load movements	1,95E+00
Natural Aggregate transportation	1,90E+00
Asphalt production	6,74E+00
Asphalt transportation	6,79E-01
Natural Aggregate processing	8,14E-01
Mixture production	9,60E+00
Mixture transportation	2,56E-01
Finisher operation	2,36E-01
Pneumatic roller operation	2,18E-01
Vibratory roller operation	2,18E-01
TOTALE	**3,41E+01**

CARCINOGENICS	
Processo	**CTUh**
Natural Aggregate extraction	2,93E-05
Natural Aggregate load movements	3,51E-05
Natural Aggregate transportation	2,43E-06
Asphalt production	1,18E-03
Asphalt transportation	8,88E-07
Natural Aggregate processing	4,39E-06
Mixture production	2,82E-05
Mixture transportation	3,27E-07
Finisher operation	3,17E-07
Pneumatic roller operation	2,92E-07
Vibratory roller operation	2,92E-07
TOTALE	**1,28E-03**

NON CARCINOGENICS	
Processo	**CTUh**
Natural Aggregate extraction	3,50E-04
Natural Aggregate load movements	3,37E-04
Natural Aggregate transportation	6,44E-04
Asphalt production	1,13E-02
Asphalt transportation	2,40E-04
Natural Aggregate processing	6,74E-05
Mixture production	1,01E-03
Mixture transportation	8,68E-05
Finisher operation	6,34E-06
Pneumatic roller operation	5,85E-06
Vibratory roller operation	5,85E-06
TOTALE	**1,41E-02**

RESPIRATORY EFFECTS	
Processo	**kg PM2.5 eq**
Natural Aggregate extraction	1,83E+01
Natural Aggregate load movements	6,72E-01
Natural Aggregate transportation	1,71E+00
Asphalt production	3,39E+00
Asphalt transportation	6,27E-01
Natural Aggregate processing	1,77E+00
Mixture production	1,23E+01
Mixture transportation	2,30E-01
Finisher operation	1,43E-01
Pneumatic roller operation	1,32E-01
Vibratory roller operation	1,32E-01
TOTALE	**3,94E+01**

FOSSIL FUEL DEPLETION	
Processo	**MJ surplus**
Natural Aggregate extraction	2,57E+04
Natural Aggregate load movements	4,90E+03
Natural Aggregate transportation	6,90E+03
Asphalt production	1,64E+05
Asphalt transportation	2,37E+03
Natural Aggregate processing	1,52E+03
Mixture production	5,02E+04
Mixture transportation	9,29E+02
Finisher operation	1,02E+03
Pneumatic roller operation	9,39E+02
Vibratory roller operation	9,39E+02
TOTALE	**2,60E+05**

ECOTOXICITY	
Processo	**CTUe**
Natural Aggregate extraction	2,38E+03
Natural Aggregate load movements	6,50E+03
Natural Aggregate transportation	1,33E+04
Asphalt production	2,19E+05
Asphalt transportation	4,93E+03
Natural Aggregate processing	2,72E+02
Mixture production	1,77E+04
Mixture transportation	1,79E+03
Finisher operation	7,08E+01
Pneumatic roller operation	6,53E+01
Vibratory roller operation	6,53E+01
TOTALE	**2,66E+05**

Figura 50 - Risultati singoli indicatori d'impatto

Confrontando i risultati ottenuti con quelli pubblicati da Vega A. et al. si osserva come i risultati sono per lo più simili e confrontabili.

	Unità di misura	Risultati ottenuti	Risultati Vega A. et al.
OZONE DEPLETION	**kg CFC-11 eq**	**1,02E-02**	**6,03E-03**
GLOBAL WARMING	**kg CO2 eq**	**6,33E+04**	**3,39E+04**
SMOG	**kg O3 eq**	**8,40E+03**	**4,75E+03**
ACIDIFICATION	**kg SO2 eq**	**5,11E+02**	**3,18E+02**
EUTROPHICATION	**kg N eq**	**3,41E+01**	**2,82E+01**
CARCINOGENICS	**CTUh**	**1,28E-03**	**1,70E-03**
NON CARCINOGENICS	**CTUh**	**1,41E-02**	**1,27E-02**
RESPIRATORY EFFECTS	**kg PM2.5 eq**	**3,94E+01**	**2,23E+01**
ECOTOXICITY	**CTUe**	**2,66E+05**	**2,50E+05**
FOSSIL FUEL DEPLETION	**MJ surplus**	**2,60E+05**	**2,14E+05**

Tabella 7 - Confronto risultati ottenuti con quelli pubblicati da Vega A. et al.

La leggera differenza tra alcuni punti è da imputare a differenti cause.

In primo luogo sono state utilizzate due versioni differenti di software: versioni più recenti probabilmente contengono processi da database più aggiornati. Il software utilizzato è SimaPro versione 9.1.1.7, quello utilizzato da Vega et al è la versione 7.1. Trattandosi di due versioni di differenza, i processi e i database sono aggiornati e quindi i risultati saranno differenti.

In secondo luogo c'è da tenere in conto anche della versione di metodo di valutazione dell'impatto adottato. In questa rivisitazione è stato adottato il metodo TRACI 2.1 US8 –CANADIAN, mentre nella versione pubblicata non si hanno informazioni al riguardo. Anche questo influisce, in quanto ogni versione ha la propria metodologia di calcolo.

Tuttavia gli ordini di grandezza dei risultati combaciano, e questo può rassicurare dal punto di vista scientifico circa la validità dei risultati.

Analizzando attentamente i risultati, si osserva come le emissioni principali riguardano le categorie “Ecotoxicity” e “Fossil fuel depletion”.

3.5 Confronto tra i diversi scenari analizzati

Ritornando ai 4 scenari analizzati da Vega A. et al. è possibile analizzare l’impatto relativo delle tre miscele contenenti RCA rispetto alla miscela tradizionale HMA0. L’immagine seguente mostra la variazione relativa degli impatti tra la miscela HMA0 e le miscele innovative HMA15, HMA30, HMA45, relativamente alla realizzazione del solo strato binder.

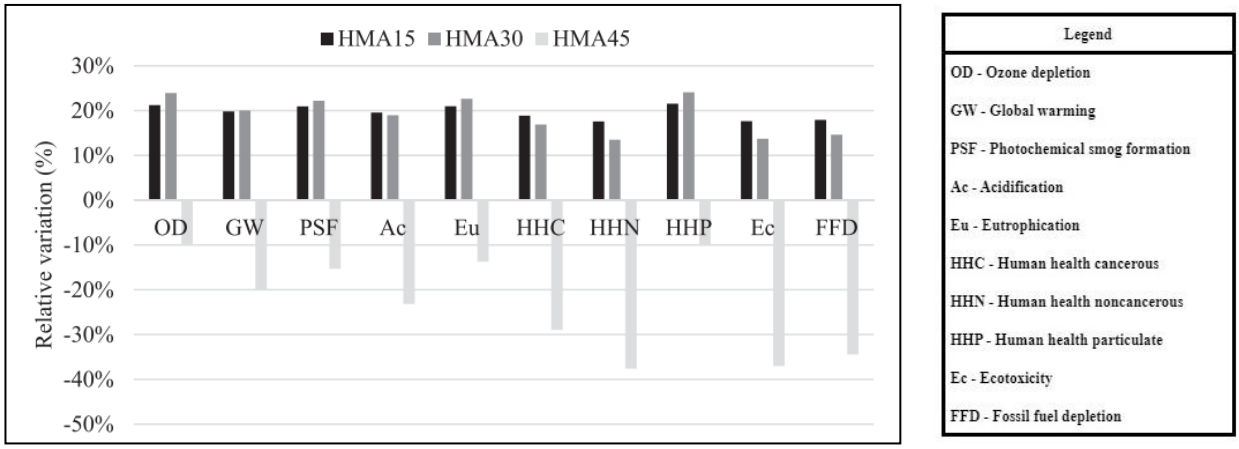


Figura 51 - Variazione relativa risultati differenti scenari(Daniela L. Vega A., 2022)

La figura mostra come le miscele HMA15 e HMA30 posso essere considerate alternative eco-friendly alla miscela HMA0, poiché abbattono tutti gli indicatori di impatto. Le migliorie più evidenti si hanno per la miscela HMA30 nelle categorie HHP, OD e Eu, mentre migliorie minori si hanno per le categorie HHN, Ec e FFD.

Contrariamente a questa tendenza, la miscela HMA45 porta ad un aumento delle percentuali di impatto. Questo può essere vista come combinazione di due effetti:

1. La miscela HMA45 presenta una performance minore rispetto alla miscela tradizionale, e perciò richiede uno spessore minore del 25% dello strato binder rispetto a quello dell’altra, in modo da ottenere lo stesso grado di performance.
2. La presenza di RCA nella miscela incrementa il valore ottimale di bitume: si passa dal 4,4% nella miscela HMA0 al 5,2% nella miscela HMA45.

Il minor grado di performance della miscela HMA45 è dovuto al fatto che lo strato di malta che ricopre gli aggregati naturali insieme alle particelle RCA ha una porosità maggiore e una densità minore rispetto al caso standard, e presenta un legame più debole. Tutto ciò influenza negativamente le proprietà degli aggregati RCA.

Riguardo invece al secondo punto, l’aumento del valore ottimale di bitume è dovuto alla maggiore porosità dello strato di malta-RCA (Pasandín, 2014). Tuttavia, le

proprietà meccaniche peggiori della miscela HMA45, non si osservano per le altre due miscele contenenti RCA.

Ne risulta pertanto che l'utilizzo di RCA nelle miscele è ottimale se contenuto in centri limiti percentuali, altrimenti si osserva l'effetto opposto.

4. CASO STUDIO

L'analisi dettagliata di SimaPro e la revisione della letteratura esistente pone le fondamenta per la trattazione del caso studio descritto in questo capitolo.

4.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Obiettivo del presente studio LCA è la valutazione degli impatti ambientali generati nel ciclo di vita di una sezione di pavimentazione composta da un pacchetto stradale standard in conglomerato bituminoso e da uno strato di fondazione meno impattante, contenente aggregati RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Tale obiettivo è la conseguenza dell'attuale interesse dei settori delle costruzioni nella realizzazione di opere ad impatto zero. In particolare, nell'ambito delle infrastrutture stradali tale scopo è perseguito dal riutilizzo di materiali di scarto quali fresato bituminoso e sludge, in concomitanza al trend di sperimentazione di tecnologie a minor impatto.

È noto infatti come le pavimentazioni stradali siano soggette, nel corso della loro vita di esercizio, a carichi ciclici derivanti principalmente dal traffico veicolare e ad esposizioni aggressive dovute ad agenti climatici e ambientali. Conseguentemente a ciò, pertanto, sono richiesti manutenzione e ripristini tali da garantire le performance strutturali e funzionali delle pavimentazioni stesse. Da un punto di vista ambientale, si è intervenuti, cercando di riutilizzare materiale stradale provenienti dai suddetti interventi, il cosiddetto RAP, quale materiale da riempimento per gli strati di fondazione e non solo.

Al fine di poter effettuare un confronto, sono stati analizzati 2 scenari differenti:

- Scenario 1: Pavimentazione sostenibile.
- Scenario 2: Pavimentazione standard.

Il software SimaPro si è prestato quindi allo svolgimento di tale analisi.

L'unità funzionale del ciclo di vita analizzato è rappresentata da 1 km di pavimentazione stradale. La differenza tra i due scenari è legata allo strato di fondazione. In entrambi i casi si tratta di un misto granulare stabilizzato a cemento composto da aggregati per il 50 % vergini e per il 50 % da riciclo per il caso 1, e per il 100% da aggregati vergini per il caso 2. Per la composizione di questo strato sono stati utilizzati i risultati ottenuti da Santagata et al. nel 2013 (Santagata E., 2013).

In riferimento alla struttura del pacchetto stradale si è scelto di utilizzare la composizione stratigrafica e volumetrica degli strati legati in conglomerato bituminoso, presentata nello studio di Calcagnile et al. (Salvatore Antonio Calcagnile, A.A. 2020/2021) per la sezione CG.

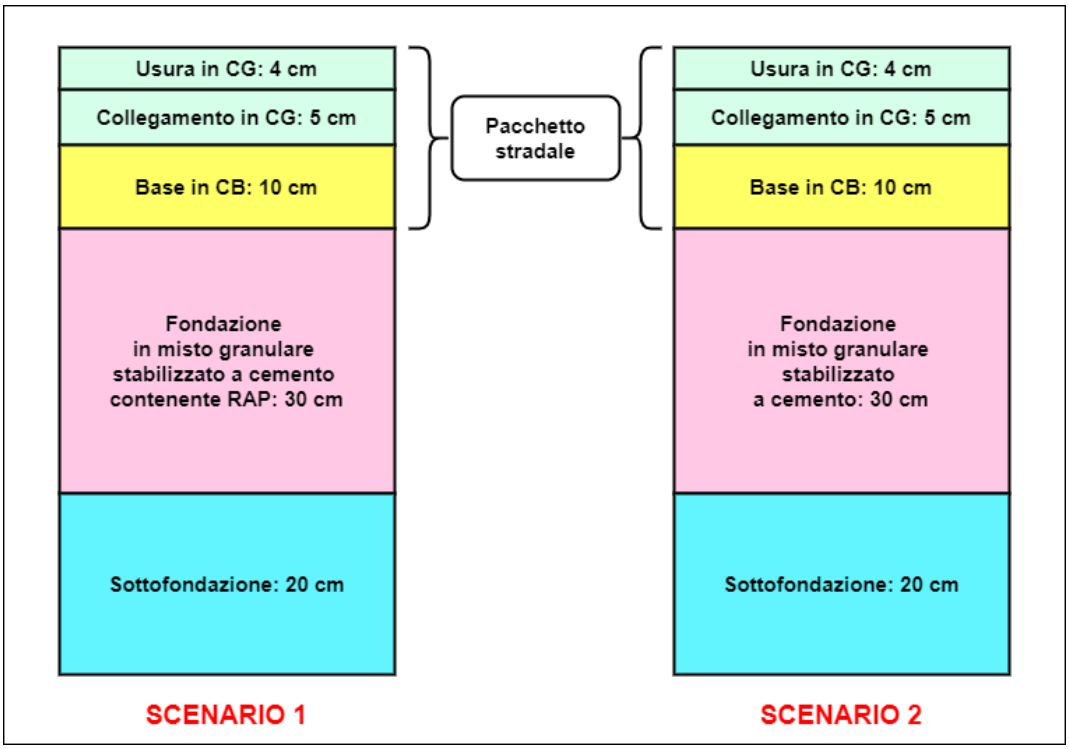


Figura 52 - Stratigrafie scenari

La sezione stradale tipo è composta da una piattaforma stradale della larghezza complessiva di 6 m, a sua volta composta da 2 corsie di 2,75 m e 2 banchine esterne di 0,25 m ciascuna.

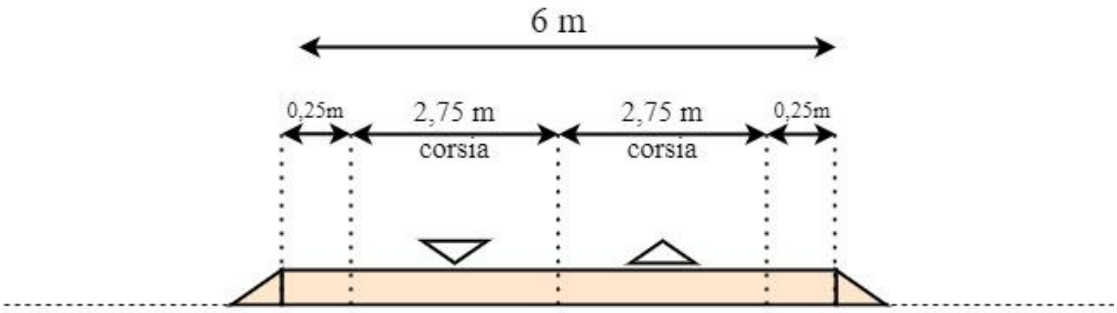


Figura 53 - Sezione stradale

L'approccio adottato è del tipo "cradle to gate": è stata posta l'attenzione ai processi di estrazione delle materie prime, alle loro successive fasi di lavorazione, alle fasi di realizzazione dell'opera oggetto di esame.

4.2 Analisi d'inventario

Avendo già a disposizione un modello di ciclo di vita adottato per la revisione dello studio effettuato da Vega A. et al., si è scelto di procedere utilizzando in parte il data set a disposizione, in parte altri inventari disponibili in letteratura.

Il Life Cycle Inventory (LCI) ha riguardato quindi le componenti principali della miscela, (vale a dire aggregati, bitume, polimero ed emulsione bituminosa), le componenti innovative degli strati non legati (aggregati e materiali di recupero) ed infine le operazioni principali di realizzazione della pavimentazione.

4.2.1 Composizione stratigrafica

La sezione stradale in esame è composta da:

- Uno strato di usura in conglomerato bituminoso: 4 cm;
- Uno strato di collegamento in conglomerato bituminoso: 5 cm;
- Uno strato di base in conglomerato bituminoso: 10 cm;
- Uno strato di fondazione stabilizzato a cemento contenente o meno RAP: 30 cm;
- Uno strato di sottofondazione: 20 cm.

Si ipotizza inoltre di inserire strati di emulsione bituminosa rispettivamente tra gli strati di usura e collegamento, tra gli strati di collegamento e base e, ancora, tra gli strati di base e fondazione, le cui caratteristiche sono state determinate in accordo ai quaderni Anas vol. 5.2.

Per la definizione dei volumi del pacchetto legato sono state ricavate informazioni utili dalla tesi di Salvatore Antonio Calcagnile. In particolare, la miscela in conglomerato bituminoso è prodotta nell'impianto di Salbertrand di Sitalfa ed è composta da aggregati naturali, bitume e polimero. L'aggiunta di polimero in fase di miscelazione, e non come componente del bitume modificato, consente di ottenere una miscela dalle prestazioni e caratteristiche migliori.

Si ipotizza che:

- Gli aggregati siano composti da sabbione (3/8, 8/18, 18/30 mm) e filler;
- Il bitume sia del tipo 50/70 fornito dall'azienda Iplom S.p.a,
- Il polimero, denominato Superplast, sia fornito da Iterchimica s.r.l.

È necessario ribadire ancora come siano stati utilizzati questi dati forniti dal precedente studio di Calcagnile et. al. , al fine di impostare il caso sul software, adottando però i processi a disposizione dalla letteratura e dai database. Pertanto, il riferimento a tali aziende produttrici di materiali è puramente casuale, al solo scopo di utilizzare dati concreti e validi per il territorio italiano, quale collocazione del presente lavoro di tesi, in relazione ai processi di produzione e trasporto degli stessi materiali.

Come imposto dal Capitolato del Ministero, la miscela dovrà raggiungere una densità minima pari al 98% di quella Marshall o di progetto. A tal scopo nelle successive fasi di calcolo, si è adottata una densità delle miscele costituenti gli strati del pacchetto legato pari al 98% della densità di progetto.

Inoltre, per ciascuno dei tre strati, note le loro caratteristiche geometriche, le percentuali volumetriche e le densità di progetto della miscela, sono stati valutati i volumi delle tre componenti (aggregati, polimero e bitume) dapprima per 1 m^3 di miscela e poi il volume dello strato.

Per la definizione dei volumi dello strato di fondazione e sottofondazione, invece, sono stati utilizzati i quantitativi di materiale definiti da Santagata et al, riassunti come segue.

Strato pavimentazione	Materiali	Quantità
Fondazione contentente RAP	Aggregati	4115 ton
	RAP	4115 ton
	Cemento	247 ton
	Acqua	453 ton
Fondazione non contentente RAP	Aggregati	8230 ton
	RAP	-
	Cemento	247 ton
	Acqua	453 ton
Sottofondazione	Aggregati	6710 ton

Tabella 8 - Quantitativi di materiale strato di fondazione(Santagata E., 2013)

Strato di usura

Lo strato di usura presenta un volume totale di 240 m^3 e le seguenti caratteristiche volumetriche:

Strato di USURA in CB (4 cm)		
Volume strato usura in CB		
V[m^3] = length x width x depth		
lenght	1000	[m]
width	6	[m]
depth	0,04	[m]
Volume	**240**	**[m^3]**

Caratteristiche volumetriche (Usura)		
Percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati	[%]	5,5
Percentuale di bitume rispetto al peso del conglomerato	[%]	5,21
Percentuale di polimero rispetto al peso del conglomerato	[%]	0,3
Vuoti residui	[%]	5,39
Massa volumica miscela secca	[g/cm^3]	2,708
Densità del bitume	[g/cm^3]	1,025
Densità del polimero	[g/cm^3]	0,5
Densità Marshall (di progetto)	[g/cm^3]	2,418

Figura 54 - Caratteristiche strato di usura

Note pertanto le densità dei costituenti la miscela e loro percentuali in peso, considerando una densità della miscela in fase di controllo pari al 98% della densità di progetto, risulta:

$$Massa\ Bitume = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ bitume\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}418 \frac{g}{cm^3} * 0{,}0521 = 0{,}12346 \frac{g}{cm^3} = 123{,}46 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Polimero = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ polimero\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}418 \frac{g}{cm^3} * 0{,}003 = 0{,}00711 \frac{g}{cm^3} = 7{,}11 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Aggregati\ =$$
$$= (98\% * Densità\ Marshall) - (Massa\ Bitume)$$
$$- (Massa\ Polimero) =$$
$$= \left(0{,}98 * 2{,}418 \frac{g}{cm^3}\right) - 0{,}12346\ \frac{g}{cm^3} - 0{,}00711\ \frac{g}{cm^3} =$$
$$= 2{,}23907 \frac{g}{cm^3} = 2239{,}07\ \frac{kg}{m^3}$$

Riassumendo si ha quindi:

Masse dei singoli componenti del CB per 1 m^3 di miscela		
Massa Bitume = 5,21 % di bitume sulla miscela	123,46	[kg/m^3]
Massa Polimero = 0,3% di polimero sulla miscela	7,11	[kg/m^3]
Massa Aggregati	2239,07	[kg/m^3]

Tabella 9 - Masse componenti strato di usura

Ora, noto il volume totale dello strato di usura, il volume di ciascuna componente si calcola come:

$$Volume\ Bitume = \frac{(Massa\ Bitume) * (Volume\ strato\ di\ usura)}{Densità\ del\ bitume} =$$
$$= \frac{\left(123{,}46 \frac{kg}{m^3} * 240\ m^3\right)}{1{,}025 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 28{,}9\ m^3$$

$$Volume\ Aggregati = \frac{(Massa\ Aggregati) * (Volume\ strato\ di\ usura)}{Massa\ volumica\ miscela\ secca} =$$
$$= \frac{\left(2239{,}07\ \frac{kg}{m^3} * 240\ m^3\right)}{2{,}708 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 198{,}4\ m^3$$

$$Volume\ Polimero = \frac{(Massa\ Polimero) * (Volume\ strato\ di\ usura)}{Densità\ del\ polimero} =$$
$$= \frac{\left(7{,}11\ \frac{kg}{m^3} * 240\ m^3\right)}{0{,}5 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 3{,}4\ m^3$$

Usura	
Materiale	[m^3]
Aggregati	198,4
Bitume	28,9
Polimero	3,4
TOTALE	**230,8**

Tabella 10 - Quantità materiali strato di usura

In tabella 11 sono dunque riportate le quantità totali necessarie per lo strato di usura.

Strato di binder

Lo strato di binder o collegamento presenta un volume totale di 300 m^3 e le seguenti caratteristiche volumetriche:

Strato di BINDER in CB (5 cm)		
Volume strato binder in CB		
V[m^3] = length x width x depth		
lenght	1000	[m]
width	6	[m]
depth	0,05	[m]
Volume	**300**	**[m^3]**

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

Figura 55 - Caratteristiche strato di binder

Note pertanto le densità dei costituenti la miscela e loro percentuali in peso, considerando una densità della miscela in fase di controllo pari al 98% della densità di progetto, risulta:

$$Massa\ Bitume = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ bitume\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}373 \frac{g}{cm^3} * 0{,}0476 = 0{,}11070 \frac{g}{cm^3} = 110{,}70 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Polimero = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ polimero\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}373 \frac{g}{cm^3} * 0{,}003 = 0{,}0070 \frac{g}{cm^3} = 7{,}00 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Aggregati\ = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) - \ (Massa\ Bitume) \\ - \ (Massa\ Polimero) = \\ = \left(0{,}98 * 2{,}373 \frac{g}{cm^3}\right) - 0{,}11070\ \frac{g}{cm^3} - 0{,}0070\ \frac{g}{cm^3} = \\ = 2{,}2079 \frac{g}{cm^3} = 2207{,}90\ \frac{kg}{m^3}$$

Riassumendo si ha quindi:

Masse dei singoli componenti del CB per 1 m^3 di miscela		
Massa Bitume = 4,76 % di bitume sulla miscela	110,7	[kg/m^3]
Massa Polimero = 0,3% sul peso del conglomerato	7,0	[kg/m^3]
Massa Aggregati	2207,9	[kg/m^3]

Tabella 11 - Masse componenti strato di binder

Ora, noto il volume totale dello strato di usura, il volume di ciascuna componente si calcola come:

$$Volume\ Bitume = \frac{(Massa\ Bitume) * (Volume\ strato\ di\ binder)}{Densità\ del\ bitume} = \\ = \frac{\left(110{,}70 \frac{kg}{m^3} * 300\ m^3\right)}{1{,}025 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 32{,}40\ m^3$$

$$Volume\ Aggregati = \frac{(Massa\ Aggregati) * (Volume\ strato\ di\ binder)}{Massa\ volumica\ miscela\ secca} = \\ = \frac{\left(2207{,}90\ \frac{kg}{m^3} * 300\ m^3\right)}{2{,}728 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 242{,}80\ m^3$$

$$Volume\ Polimero = \frac{(Massa\ Polimero) * (Volume\ strato\ di\ binder)}{Densità\ del\ polimero} =$$

$$= \frac{\left(7{,}00\ \frac{kg}{m^3} * 300\ m^3\right)}{0{,}5 * 1000\ \frac{kg}{m^3}} = 4{,}2\ m^3$$

Binder	
Materiale	[m^3]
Aggregati	242,8
Bitume	32,40
Polimero	4,2
TOTALE	**279,4**

Tabella 12 - Quantità materiali strato di binder

In tabella 13 sono dunque riportate le quantità totali necessarie per lo strato di binder.

Strato di base

Lo strato di base presenta un volume totale di 600 m^3 e le seguenti caratteristiche volumetriche:

Strato di BASE in CB (10 cm)		
Volume strato base in CB		
V[m^3] = length x width x depth		
lenght	1000	[m]
width	6	[m]
depth	0,1	[m]
Volume	**600**	**[m^3]**

Caratteristiche volumetriche (Base)		
Percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati	[%]	4
Percentuale di bitume rispetto al peso del conglomerato	[%]	3,85
Percentuale di polimero rispetto al peso del conglomerato	[%]	0,3
Vuoti residui	[%]	5,39
Massa volumica miscela secca	[g/cm^3]	2,735
Densità del bitume	[g/cm^3]	1,025
Densità del polimero	[g/cm^3]	0,5
Densità Marshall (di progetto)	[g/cm^3]	2,36

Figura 56 - Caratteristiche strato di usura

Note pertanto le densità dei costituenti la miscela e loro percentuali in peso, considerando una densità della miscela in fase di controllo pari al 98% della densità di progetto, risulta:

$$Massa\ Bitume = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ bitume\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}36 \frac{g}{cm^3} * 0{,}0385 = 0{,}08904\ \frac{g}{cm^3} = 89{,}04 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Polimero = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) \\ * (Percentuale\ di\ polimero\ rispetto\ al\ peso\ del\ conglomerato) \\ = 0{,}98 * 2{,}36 \frac{g}{cm^3} * 0{,}003 = 0{,}0069 \frac{g}{cm^3} = 6{,}90 \frac{kg}{m^3}$$

$$Massa\ Aggregati\ = \\ = (98\% * Densità\ Marshall) - \ (Massa\ Bitume) \\ - \ (Massa\ Polimero) = \\ = \left(0{,}98 * 2{,}36\ \frac{g}{cm^3}\right) - 0{,}11070\ \frac{g}{cm^3} - 0{,}0070\ \frac{g}{cm^3} = \\ = 2{,}21686 \frac{g}{cm^3} = 2216{,}86\ \frac{kg}{m^3}$$

Riassumendo si ha quindi:

Masse dei singoli componenti del CB per 1 m^3 di miscela		
Massa Bitume = 3,85 % di bitume sulla miscela	89,0	[kg/m^3]
Massa Polimero = 0,3% sul peso del conglomerato	6,9	[kg/m^3]
Massa Aggregati	2216,8	[kg/m^3]

Tabella 13 - Masse componenti strato di base

Ora, noto il volume totale dello strato di usura, il volume di ciascuna componente si calcola come:

$$Volume\ Bitume = \frac{(Massa\ Bitume) * (Volume\ strato\ di\ base)}{Densità\ del\ bitume} = \\ = \frac{\left(89{,}00 \frac{kg}{m^3}\ *\ 600\ m^3\right)}{1{,}025 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 52{,}10\ m^3$$

$$Volume\ Aggregati = \frac{(Massa\ Aggregati) * (Volume\ strato\ di\ base)}{Massa\ volumica\ miscela\ secca} =$$

$$= \frac{\left(2216{,}80\ \frac{kg}{m^3}\ *\ 600\ m^3\right)}{2{,}735 * 1000\frac{kg}{m^3}} = 486{,}30\ m^3$$

$$Volume\ Polimero = \frac{(Massa\ Polimero) * (Volume\ strato\ di\ base)}{Densità\ del\ polimero} =$$

$$= \frac{\left(6{,}90\ \frac{kg}{m^3}\ *\ 600\ m^3\right)}{0{,}5 * 1000\frac{kg}{m^3}} = 8{,}30\ m^3$$

Base	
Materiale	[m^3]
Aggregati	486,3
Bitume	52,1
Polimero	8,3
TOTALE	**546,7**

Tabella 14 - Quantità materiali strato di base

In tabella 15 sono dunque riportate le quantità totali necessarie per lo strato di base.

Emulsione bituminosa

Con emulsione bituminosa ci si riferisce ad una *"dispersione di bitume in acqua stabilizzata con sostanze tensioattive anioniche o cationiche"*(Wikipedia).

Esistono differenti tipologie di emulsioni, classificabili per:

- Carattere ionico: cationiche o anioniche;
- Velocità di rottura del legame: rapida, media, lenta;
- Percentuale di bitume contenuto: tipicamente dal 50% al 70%.

La maggior parte di emulsioni generate industrialmente è di tipo cationico.

È buona norma, preparare gli strati in conglomerato bituminoso attraverso le cosiddette mani d'attacco o, all'occorrenza, mani di ancoraggio. Si tratti di strati dallo spessore impercettibile di emulsione bituminosa, i quali hanno il compito di permettere la giusta adesione tra gli strati legati in conglomerato bituminoso.

La differenza tra mano d'attacco e mano di ancoraggio è legata agli strati tra i quali l'emulsione trova spazio.

La mano di ancoraggio garantisce l'adesione tra uno strato non legato in misto granulare, quale in questo caso lo strato di fondazione, e uno strato in conglomerato

bituminoso, al fine di aumentare la rigidezza della parte superficiale dello strato in misto granulare a diretto contatto con lo strato legato, riempiendone così i vuoti.

La mano d'attacco invece è nota per connettere due strati in conglomerato bituminoso, con lo scopo di rendere impermeabile il primo strato e legarlo solidamente a quello superiore.

Nel caso oggetto di studio, come già anticipato, sono previste:

- N. 1 mano di ancoraggio tra fondazione e base.
- N. 2 mani d'attacco tra base e collegamento, e tra collegamento e usura.

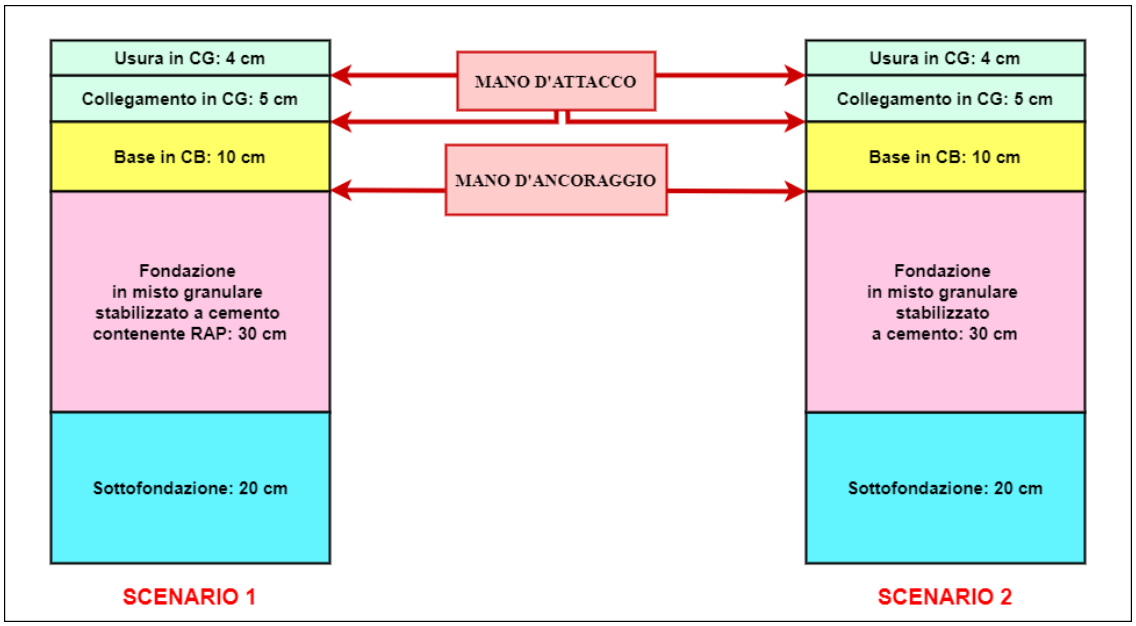


Figura 57 - Emulsione bituminosa

Per quanto riguarda la scelta dell'emulsione, si fa riferimento ai risultati ottenuti nel precedente lavoro di tesi (Salvatore Antonio Calcagnile, A.A. 2020/2021).

Si è scelto di utilizzare un'emulsione contenente una quantità di bitume residuo pari a 0,30 kg/m^2. Tuttavia le caratteristiche dell'emulsione bituminosa sono riassunte nella seguente tabella:

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

Tabella 15 - Caratteristiche emulsione bituminosa

Di seguito si riportano i volumi di emulsione necessari per le mani di attacco e ancoraggio.

MANO D'ATTACCO	
Bitume residuo per mano d'attacco	1800 kg
Acqua	1200 kg
Massa totale emulsione bituminosa	3000 kg
Volume emulsione bituminosa	3 m^3

Tabella 16 - Mano di attacco

MANO D'ANCORAGGIO	
Bitume residuo per mano d'attacco	6000 kg
Acqua	400 kg
Massa totale emulsione bituminosa	10000 kg
Volume emulsione bituminosa	10 m^3

Tabella 17 - Mano di ancoraggio

Strato di fondazione

Lo strato di fondazione rappresenta il primo strato composto da materiale lavorato a diretto contatto con il terreno di sottofondo. Il suo compito è quello di ridistribuire e uniformare i carichi verticali, provenienti dal pacchetto stradale, sullo strato non legato di sottofondo.

Generalmente questo strato si compone di misto granulare e/o materiali di recupero certificati per il riutilizzo in ambito di costruzione stradali, vale a dire fresato in conglomerato bituminoso, materiale demolito da altre fondazioni stradali che hanno terminato il loro ciclo vitale o materiali provenienti da scavi. Alle volte però, per ottenere livelli di portanza maggiori, oltre a fondazioni composte semplicemente in misto granulare, si realizzano fondazioni stabilizzate, per esempio, a cemento. Ciò permette di ottenere vantaggi da un punto di vista economico e ambientale: non vi è la necessità di rimuovere il terreno presente in situ, evitandone così il conferimento in discarica, e quindi non è necessario l'acquisto o rifornimento di altre tipologie di terreno, perché, l'aggiunta di legante, quale in questo caso il cemento, permette di ottenere uno strato di fondazione dalle caratteristiche strutturali adatte alle circostanze per cui viene realizzato.

Per il presente lavoro di tesi, viste le premesse e le motivazioni di cui discusso in precedenza, si è scelto pertanto di adottare una fondazione in misto granulare stabilizzata a cemento, contenente il 50% di aggregati vergini e il 50% di RAP, aggregati recuperati da demolizioni stradali, nello scenario 1 e solo aggregati vergini nello scenario 2 (Santagata E., 2013).

Quindi, per tale strato saranno necessarie le quantità di materiali riportate in tabella 9.

Strato di sottofondazione

L'ultimo strato della pavimentazione è rappresentato dal sottofondo stradale, lo strato più profondo che ha il compito di distribuire e assorbire i carichi evitandone la concentrazione in un unico punto con potenziali rischi di cedimenti e di fessurazione dell'intera pavimentazione stradale.

Anche in questo, per tale strato saranno necessarie le quantità di aggregati riportate in tabella 9.

4.2.2 Definizione delle distanze

Affinché sia possibile definire un ciclo di vita completo, è necessario valutare le distanze tra i centri di produzione/estrazione delle materie prime e i siti di lavorazione.

Si è ipotizzato che la miscela in conglomerato bituminoso e l'emulsione siano prodotte nell'impianto di Salbertrand e poi successivamente trasportate fino al sito di realizzazione della pavimentazione, localizzabile orientativamente al confine con la Francia, nei pressi del Traforo del Frejus.

Pertanto, ciascun materiale che comporrà la miscela verrà a sua volta trasportato dal proprio sito di lavorazione fino allo stesso impianto di cui sopra.

Nell'immagine seguente si mostra l'organizzazione alle spalle del cantiere in esame in riferimento ai soli strati legati, mentre nella successiva tabella vengono riassunte distanze e modalità di trasporto.

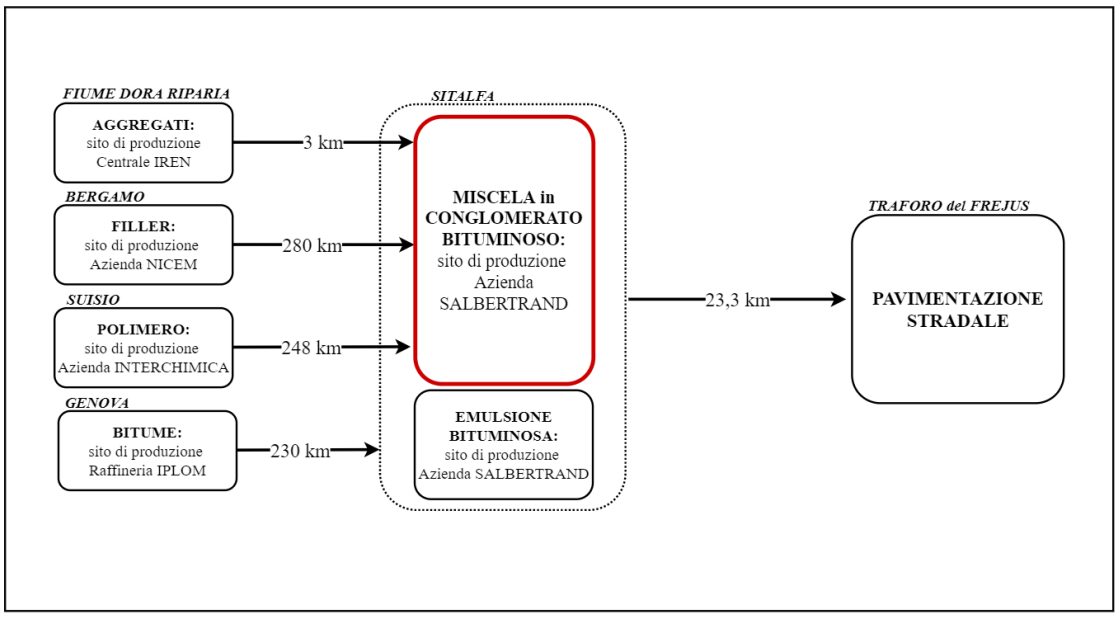


Figura 58 - Organizzazione distanze e luoghi di lavorazione miscela ed emulsione

Distanze di trasporto		
	[km]	**Mezzo di trasporto**
Miscela di CB (aggregati, bitume, polimero) Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	Dumper truck
Fornitura bitume : raffineria IPLOM S.p.a di Busalla (Genova) IPLOM - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	230	Tanker truck
Fornitura polimero : Iterchimica s.r.l (Suisio prov. Bergamo) Iterchimica - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	248	Dumper truck
Fornitura filler : NICEM s.r.l. (Bergamo) NICEM - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	280	Dumper truck
Fornitura aggregati : fiume Dora Riparia - Centrale IREN Centrale IREN - Impianto Sitalfa (Salbertrand)	3	Dumper truck
Emulsione bituminosa Impianto Sitalfa (Salbertrand) - Traforo del Frejus	23,3	Tanker truck

Tabella 18 - Distanze e modalità di trasporto

Come emerge dalla tabella n 19, le modalità di trasporto per le componenti degli strati legati sono principalmente due:

- Dumper truck: dumper o autocarro con cassone ribaltabile utilizzato per il trasporto di aggregati e filler, o miscela secca, e polimero fino all'impianto di miscelazione;
- Tanker truck: autocisterna utilizzata per il trasporto di bitume fino all'impianto di miscelazione ed emulsione bituminosa fino al sito di realizzazione della pavimentazione.

In particolare, è noto come la miscela secca sia l'aggregazione di filler e aggregati naturali di pezzatura maggiore. In questo caso, per la determinazione della distanza finale tra fornitore della miscela secca e sito di miscelazione Sitalfa, si è determinata una distanza finale quale media pesata delle due componenti (filler ed aggregati), sulla base della informazioni ricavate dalla stessa azienda produttrice. Quindi i risultati ottenuti sono i seguenti:

	Aggregati	**Filler**	**Distanza Fornitore-Sitalfa**
	[%]	**[%]**	**[km]**
Usura	93	7	22,39
Binder	95	5	16,85
Base	96	4	14,08

Tabella 19 - Distanze strati legati miscela secca

In riferimento invece alle distanze di trasporto considerate per l'approvvigionamento delle materie prime necessarie per gli strati di fondazione e sottofondazione, sono state assunte le seguenti ipotesi:

- Si è considerata una distanza di 6 km per l'approvvigionamento degli aggregati vergini necessari per gli strati di sottofondo e fondazione.
- Si è assunta una distanza di 100 km, invece, per l'approvvigionamento del cemento necessario per gli strati di fondazione.
- Per quanto riguarda il RAP, si è assunto che tale materiale venga prodotto da un impianto mobile di frantumazione del tipo CENTAURO CAMS, che combina trituratore, vaglio e un deferizzatore magnetico in un'unica macchina. Pertanto, si suppone che la distanza di trasporto sia nulla, considerando di disporre dell'impianto direttamente in cantiere.

Strato pavimentazione	Materiali	Distanze di trasporto
Fondazione	Aggregati	6 km
	RAP	-
	Cemento	100 km
	Acqua	-
Sottofondazione	Aggregati	6 km

Tabella 20 - Distanze di trasporto materiale per fondazione e sottofondazione

4.3 Life Cycle Inventory

Una volta effettuata una analisi di inventario, la fase successiva di un ciclo di vita consiste nel definire realmente l'inventario e quindi trasferire tutte le informazioni sul software.

In particolare, in SimaPro è possibile scegliere processi già pre-impostati, forniti da database pre-installati, oppure, è possibile crearne nuovi, se si dispone di tutte le informazioni legate ai processi trattati: informazioni riguardanti gli input ambientali e non, quali risorse naturali ed energetiche, e gli output o sotto-processi generati.

Come verrà di seguito mostrato, per la presente analisi sono stati utilizzati processi già creati per la revisione di Vega A. et al. e processi derivanti da letteratura.

4.3.1 Life Cycle Inventory Bitume

Per l'inventario del bitume si è scelto di adottare il "The bitumen Life Cycle Inventory" implementato da Eurobitume.

L'inventario fornito da Eurobitume sviluppa un'analisi del tipo cradle to gate e pertanto sviluppa il ciclo di vita a partire dall'approvvigionamento delle materie prime fino allo stoccaggio del prodotto finale. Nel presente studio, è stato considerato il processo *"Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)"*, valutando in tal modo gli output ambientali del ciclo di vita del processo di produzione del bitume comprendendo altresì la costruzione dell'infrastrutture dedite ai processi di produzione, trasporto e affinamento del petrolio greggio.

Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	26	1,0	0,054	0,082	27
Crude oil	kg	11,2	9,5	1,2	0,54	22
Consumption of non-energy resources						
Water[1)]	L	811	90	206	7,2	1 115
Emissions to air						
CO_2	g	130 157	33 258	19 278	6 650	189 343
SO_2	g	486	384	48	22	940
NO_x	g	549	646	20	8,3	1 224
CO	g	385	96	11,0	2,3	494
CH_4	g	486	42	4,3	2,7	535
NMVOC	g	411	39	3,0	0,98	455
Particulates	g	159	102	6,3	3,2	271
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	19 257	2 241	40	5,7	21 544
Biological Oxygen Demand	g	19 098	2 232	16	5,4	21 352
Suspended solids	g	260	34,2	7,22	0,55	302
Hydrocarbon (crude oil)	g	33,5	30	4,3	1,7	69,5
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	31,7	38	4,0	1,8	75

1) Excluding water cooling and turbine use

Figura 59 - LCI Bitume con infrastrutture

Ovviamente, Eurobitume sviluppa analisi di inventario e cicli di vita di processi conformemente alla normativa vigente in ambito di LCA, vale a dire in conformità alle norme ISO 14040 e ISO 14044.

Adottando quindi i risultati di Eurobitume riportati in figura 45, è stato creato in SimaPro il nuovo processo denominato: “BITUMEN”.

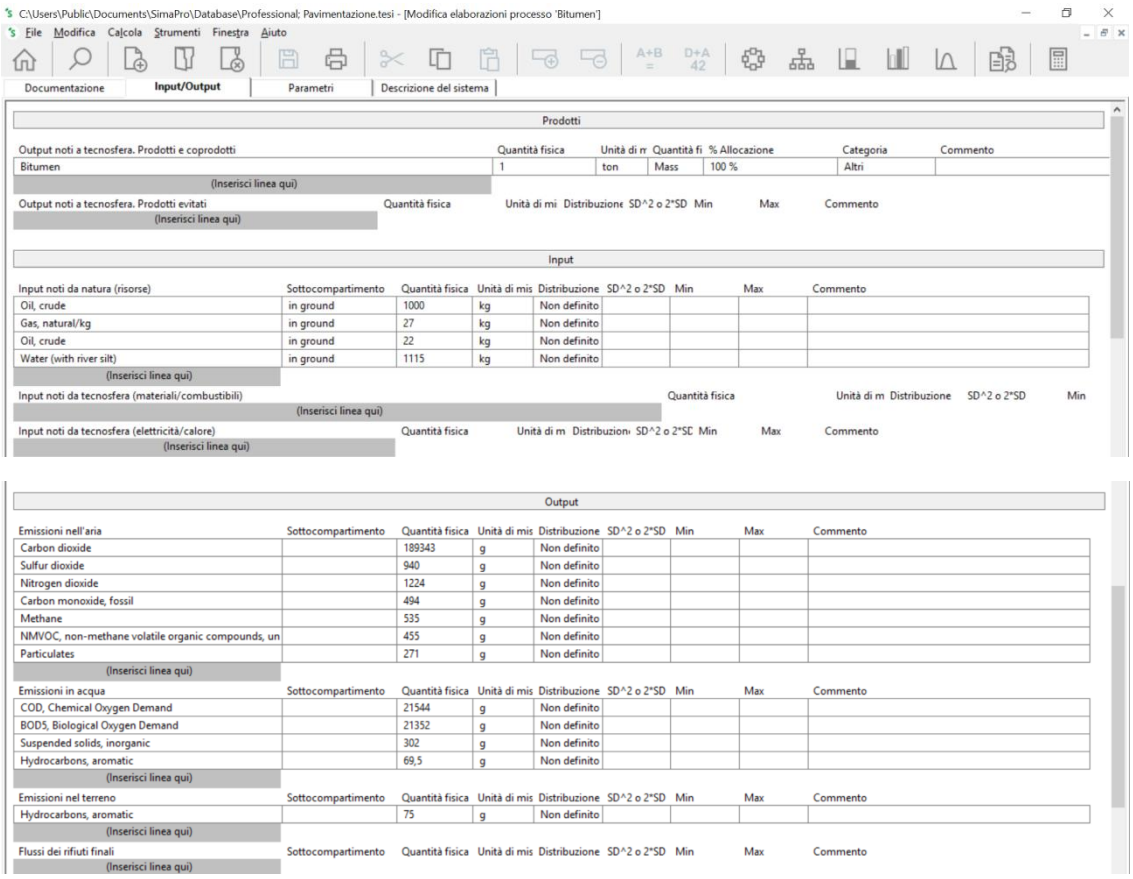


Figura 60 - Processo "Bitumen" creato su SimaPro

4.3.2 Life Cycle Inventory Polimero

La miscela in conglomerato bituminoso adottata presenta tra i suoi componenti il polimero. L'inventario adottato per il polimero è stato estratto sempre dal LCA sul bitume svolto da Eurobitume, però nella versione precedente del 2012.

In particolare, Eurobitume svolge un'analisi base del ciclo di vita di una tipologia di polimero più comunemente usata in Europa. Secondo uno studio interno ad una industria produttrice di bitumi modificati con polimero, è risultato che il contenuto tipico di polimero finale è pari al 3,5%. L'impianto di produzione di PMB (Polymer Modified Bitumen) è allocato all'interno della raffineria e si assume che l'energia totale per la produzione di tale tipologia di bitume derivi completamente dai processi di produzione di bitume a 175° e di miscelazione.

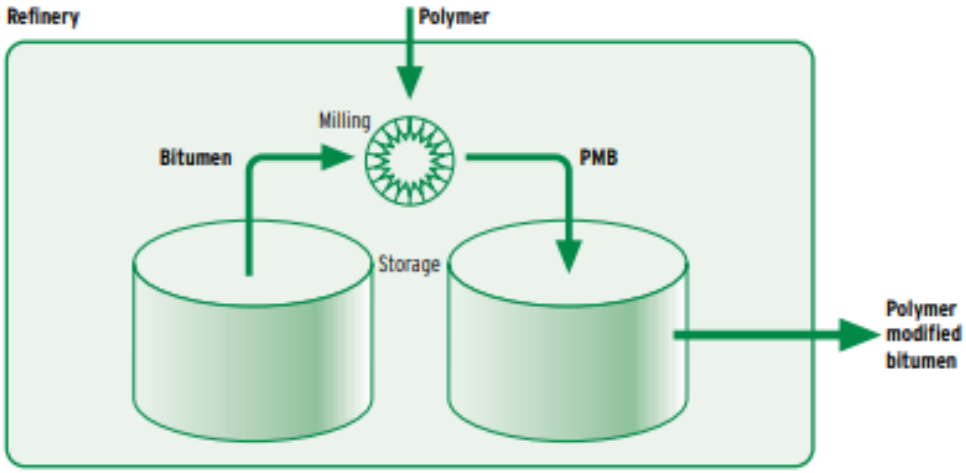


Figura 61 - Produzione di PMB (Fonte: Eutobitume 2012)

Anche per il PMB, Eurobitume fornisce due differenti inventari comprensivi o meno dell'infrastruttura necessaria alla produzione, al trasporto e alla raffinazione del petrolio greggio.

Production of 1 tonne of PMB (process without infrastructure)	Unit	Bitumen	SBS (production & transport)	PMB milling	Total
Consumption of non energy resources					
Water [1]	l	138	6 843	97	7 078
Emissions to air					
CO_2	g	168 146	117 719	10 046	295 910
SO_2	g	754	842	34	1 630
NO_x	g	743	614	18	1 375
CO	g	591	76	3	671
CH_4	g	574	493	18	1 085
Hydrocarbon	g	45,2	1 017	1	1 063
NMVOC	g	319	10	1	331
Particulates	g	155,6	99,8	9,9	265
Emissions to water					
Chemical Oxygen Demand	g	324	42	4	370
Biological Oxygen Demand	g	313	8	4	325
Suspended solids	g	29	56,6	14,4	100
Hydrocarbon	g	106,0	10,2	1,3	117
Phosphorous compounds	g	13,6	0,85	31,8	46,2
Nitrogen compounds	g	6,62	0,89	9,66	17,16
Sulphur compounds	g	336	35	788	1 159
Emissions to soil					
Hydrocarbon (oils)	g	111,6	1,9	1,3	115

1) Excluding water cooling and turbine use

Figura 62 - LCI della produzione di 1 tonnellata di PMB senza infrastrutture

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

1) Excluding water cooling and turbine use

Figura 63 - LCI della produzione di 1 tonnellata di PMB con infrastrutture

Nel caso però analizzato nel presente lavoro di tesi, si ipotizza che il polimero sia aggiunto in fase di miscelazione presso l'impianto, e pertanto dall'inventario proposto da Eurobitume sono stati estrapolati solamente i dati evidenziati nella seguente immagine.

LCI POLIMERO		
Consumption of energy resources	**Unit**	**SBS (production and transport)**
Natural gas	kg	29,8
Crude oil	kg	20,1
Coal	kg	5,4
Uranium	kg	0
Consumption of non energy resources	**Unit**	**SBS (production and transport)**
Water	l	6843
Emission to air	**Unit**	**SBS (production and transport)**
C02	g	117719
SO2	g	842
Nox	g	614
CO	g	76
CH4	g	493
Particulates	g	99,8

Figura 64 - Dati input polimero

Ancora una volta come per il precedente LCI estratto da Eurobitume, l'analisi svolta per il PMB è del tipo cradle-to-gate, conformemente alle norme ISO 14040 e ISO 14044.

Adottando quindi i risultati di Eurobitume riportati in figura 64, è stato creato in SimaPro il nuovo processo denominato: "POLYMER MODIFIED BITUMEN (PMB)".

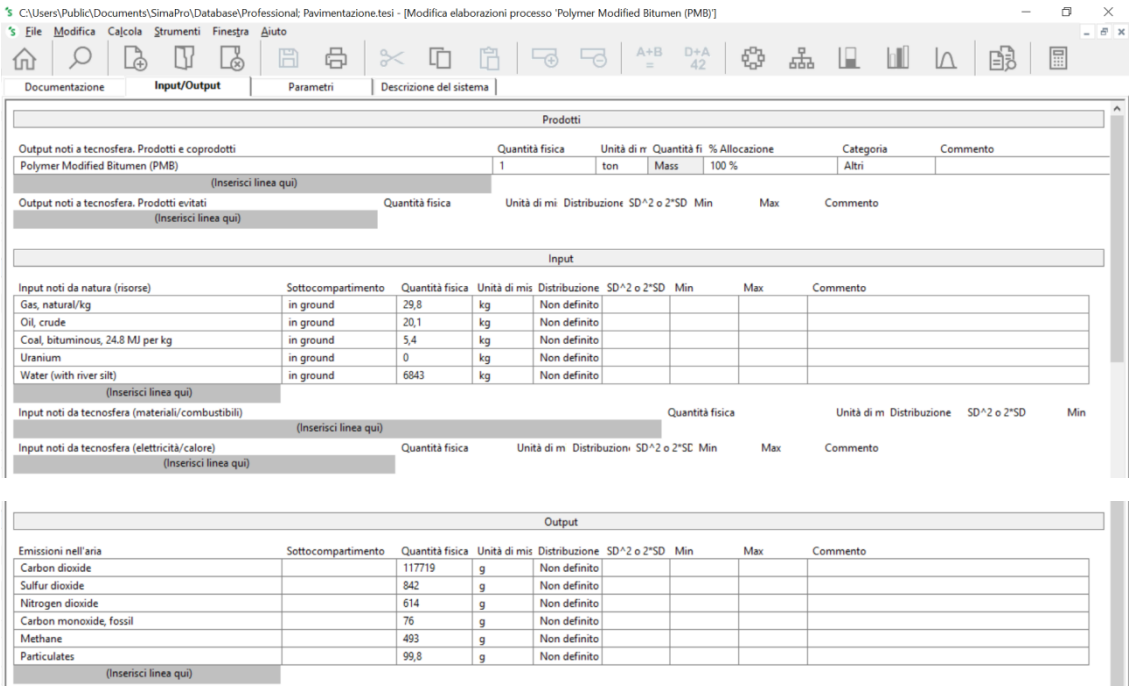


Figura 65 - Processo "Polymer Modified Bitumen (PMB)" creato su SimaPro

4.3.3 Life Cycle Inventory Aggregati vergini

Per la definizione dell'inventario degli aggregati vergini, si è scelto di adottare l'inventario proposto da Blengini et al. in uno studio effettuato nel 2010 (Gian Andrea Blengini, 2010).

Nello specifico sono stati creati tre nuovi processi: il primo denominato "Aggregate(quarry)" contenente i dati necessari per la produzione di 1 tonnellata di aggregati vergini, e gli altri due denominati rispettivamente "Quarry infrastructure" e "Recultivation", rappresentanti i processi di realizzazione dell'infrastruttura necessaria alla produzione di aggregati e il processo di ricoltivazione degli stessi.

Di seguito si riportano i suddetti LCI.

LCI Aggregate (quarry)		
Resources & Land use		
Gravel, in ground	1.04	t
Water	1.38	m^3
Occupation, mineral extraction site	0.0125*13	m^2a
Transformation, from forest	0.0125	m^2
Transformation, to mineral extraction site	0.0125	m^2
Materials/fuels		
Diesel	4.904	MJ
Electricity	10.803	MJ
Light fuel oil	2.44	MJ
Hammers/jaws	0.0112	kg
Steel screen	0.02	t
Lubricating oil	0.00181	kg
Steel	0.013	kg
Synthetic rubber	0.0073	kg
Tap water	10.1	kg
Infrastructure and recultivation		
Quarry infrastructure	1/(500000*30)	Unit
Recultivation	0.0125	m^2

Tabella 21 - LCI Aggregate (quarry)

LCI Quarry infrastructure		
Land use		
Occupation, industrial area, built up	150000	m^2a
Occupation, industrial area, vegetation	2100000	m^2a
Occupation, traffic area, road network	750000	m^2a
Transformation, from forest	60000	m^2
Transformation, to industrial area, built up	3000	m^2
Transformation, to industrial area, vegetation	42000	m^2
Transformation, to traffic area, road network	15000	m^2
Materials/fuels		
Concrete	2000	m^3
Steel	450	t
Belt conveyor	2200	m

Tabella 22 - LCI Quarry infrastructure

LCI Recultivation	
Land use	
Transformation, from mineral extraction site	1 m^2
Transformation, to water bodies, artificial	0.65 m^2
Transformation, to forest	0.25 m^2
Transformation, to traffic area, road network	0.1 m^2
Materials/fuels	
Diesel	6 MJ

Tabella 23 - LCI Recultivation

4.3.4 Life Cycle Inventory RAP

Recenti studi hanno dimostrato come è possibile riciclare il fresato d'asfalto al 100%. Ciò comporta sia vantaggi economici, vale a dire minor spese in nuovi aggregati vergini, ed ambientali. In particolare, il riutilizzo di materiale, derivante da vecchie pavimentazioni, comporta un minor prelievo di risorse naturali e un conseguente minor conferimento di rifiuti in discarica.

Tra le tecniche di recupero, le principali sono due: riciclaggio a caldo con recupero fino al 50% del fresato, e a freddo con recupero fino al 100%. Entrambi i trattamenti possono essere realizzati in impianti fissi oppure direttamente in sito attraverso apposite macchine (CAMS, 2021).

Nel presente caso studio, si è scelto di utilizzare un impianto di riciclaggio mobile, in quanto più versatile dell'altro, prodotto dall'azienda CAMS. Questo macchinario è chiamato Centauro e combina un frantumatore, un granulatore e un vaglio e deferizzatore magnetico a due piani.

Non avendo a disposizione dati reali provenienti da impianti di produzione e riciclaggio di RAP, l'analisi effettuata ha lo scopo di determinare le differenti emissioni derivanti dai processi di produzione di RAP, nel caso della pavimentazione sostenibile, e produzione degli aggregati vergini, nel caso di pavimentazione standard.

Note le caratteristiche della macchina scelta, al fine di utilizzare processi contenuti nel database di Ecoinvent, si è creato il nuovo processo RAP, avente quale dato input il processo *"Machine operation, diesel, >=74.57 kW, high load factor {GLO} | machine operation, diesel, >=74.57 kW, high load factor".*

4.3.5 Life Cycle Inventory Attrezzature

Per le fasi di trasporto e per le fasi di lavorazione che riguarderanno i materiali e gli strati di pavimentazione, è necessario definire l'attrezzatura che verrà utilizzata.

In primo luogo, nel caso studio analizzato le fasi di trasporto riguardano:

- Trasporto degli aggregati;

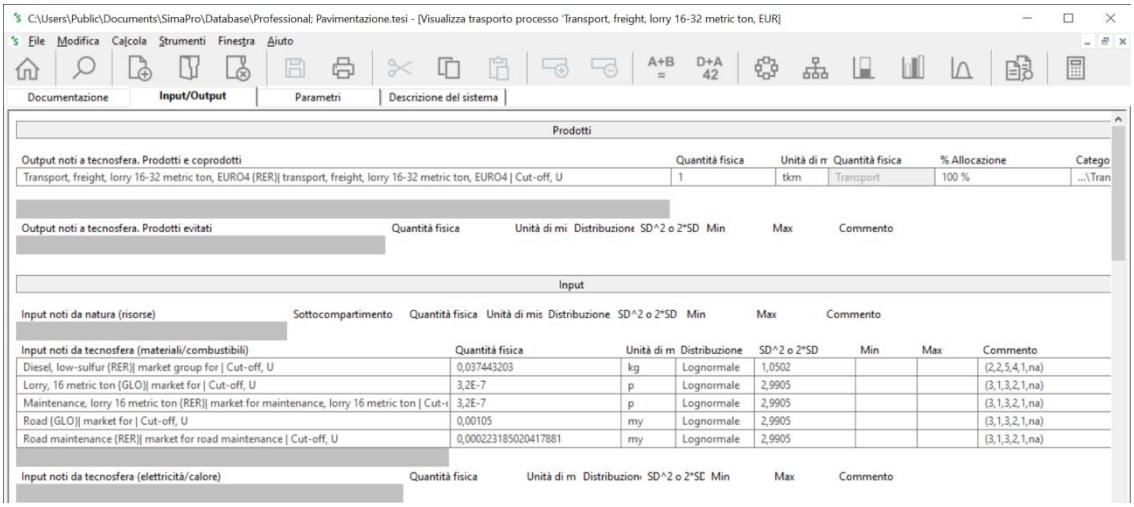
- Trasporto del bitume;
- Trasporto del polimero;
- Trasporto della miscela;
- Trasporto del cemento;

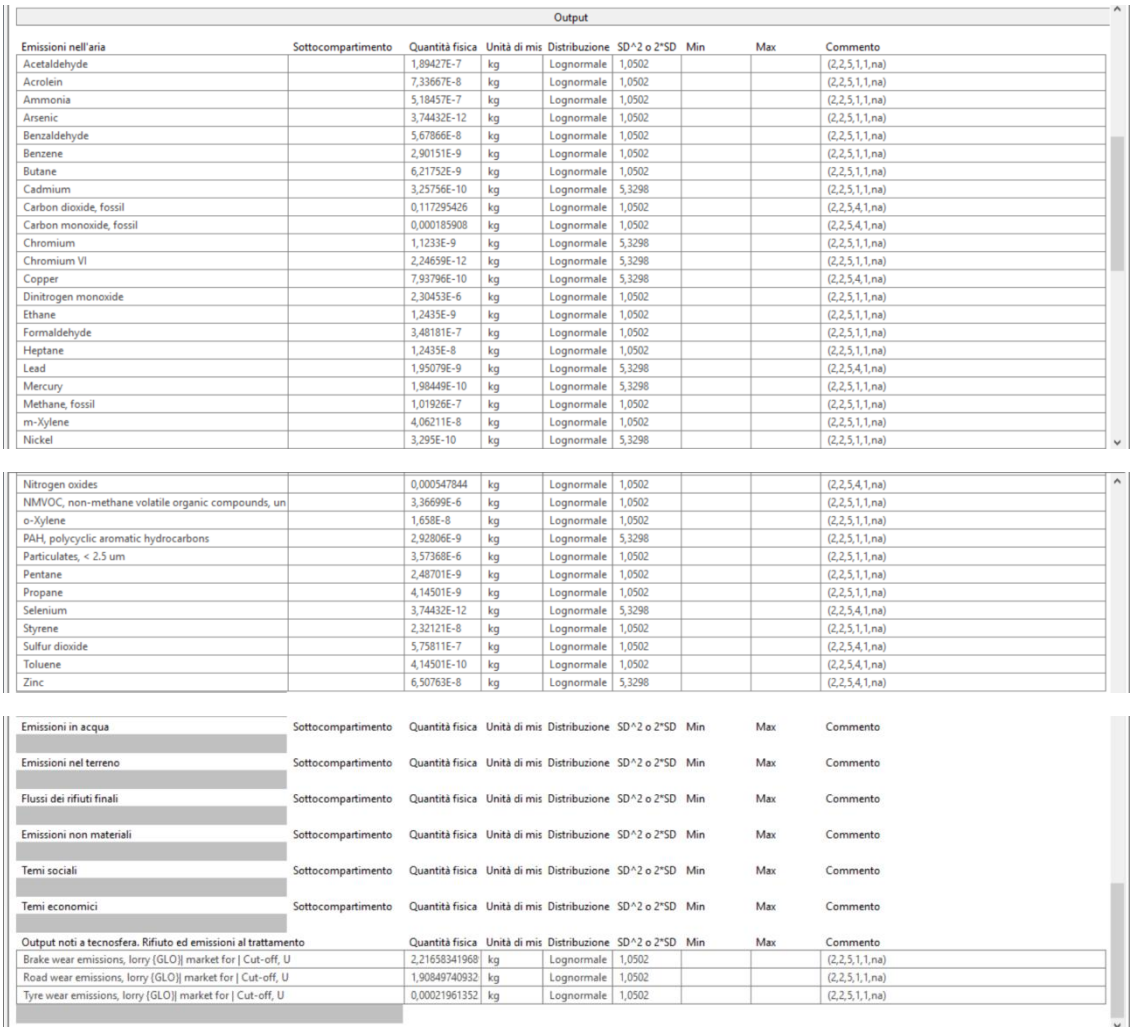
Da ricerche effettuate su materiale presente in letteratura, è risultato come, generalmente, i mezzi di trasporto utilizzati abbiano le seguenti caratteristiche:

- Capacità di circa 200 Mg;
- Consumo di circa 0,30-0,40 l/km di carburante.

Sulla base di tali constatazioni, si è scelto il processo di Ecoinvent presente in SimaPro denominato *"Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4".*

Tale processo descrive il servizio di trasporto merci di 1tkm in un camion della classe di dimensioni 16-32 tonnellate di peso lordo (GVW) e della classe di emissioni Euro IV. I set di dati sui trasporti si riferiscono all'intero ciclo di vita del trasporto, ovvero alla costruzione, esercizio, manutenzione e fine vita di veicoli e infrastrutture stradali. Il consumo di carburante e le emissioni si riferiscono ai viaggi e ai fattori di carico medi europei e non rappresentano uno scenario di trasporto specifico (Ecoinvent).





Output

Emissioni nell'aria	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
Acetaldehyde		1,89427E-7	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Acrolein		7,33667E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Ammonia		5,18457E-7	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Arsenic		3,74432E-12	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Benzaldehyde		5,67866E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Benzene		2,90151E-9	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Butane		6,21752E-9	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Cadmium		3,25756E-10	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Carbon dioxide, fossil		0,117295426	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,4,1,na)
Carbon monoxide, fossil		0,000185908	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,4,1,na)
Chromium		1,1233E-9	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Chromium VI		2,24659E-12	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Copper		7,93796E-10	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,4,1,na)
Dinitrogen monoxide		2,30453E-6	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Ethane		1,2435E-9	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Formaldehyde		3,48181E-7	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Heptane		1,2435E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Lead		1,95079E-9	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,4,1,na)
Mercury		1,98449E-10	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Methane, fossil		1,01926E-7	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
m-Xylene		4,06211E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Nickel		3,295E-10	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Nitrogen oxides		0,000547844	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,4,1,na)
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, un		3,36699E-6	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
o-Xylene		1,658E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons		2,92806E-9	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,1,1,na)
Particulates, < 2.5 um		3,57368E-6	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Pentane		2,48701E-9	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Propane		4,14501E-9	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Selenium		3,74432E-12	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,4,1,na)
Styrene		2,32121E-8	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Sulfur dioxide		5,75811E-7	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,4,1,na)
Toluene		4,14501E-10	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,4,1,na)
Zinc		6,50763E-8	kg	Lognormale	5,3298			(2,2,5,4,1,na)

Emissioni in acqua	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Emissioni nel terreno	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Flussi dei rifiuti finali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Emissioni non materiali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Temi sociali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Temi economici	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento

Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
Brake wear emissions, lorry {GLO}| market for | Cut-off, U	2,21658341968	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Road wear emissions, lorry {GLO}| market for | Cut-off, U	1,90849740932	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)
Tyre wear emissions, lorry {GLO}| market for | Cut-off, U	0,00021961352	kg	Lognormale	1,0502			(2,2,5,1,1,na)

Figura 66 - Processo Ecoinvent "Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, {RoW}"

Questo processo quindi è stato utilizzato per la creazione dei seguenti processi:

A. Natural Aggregate transportation

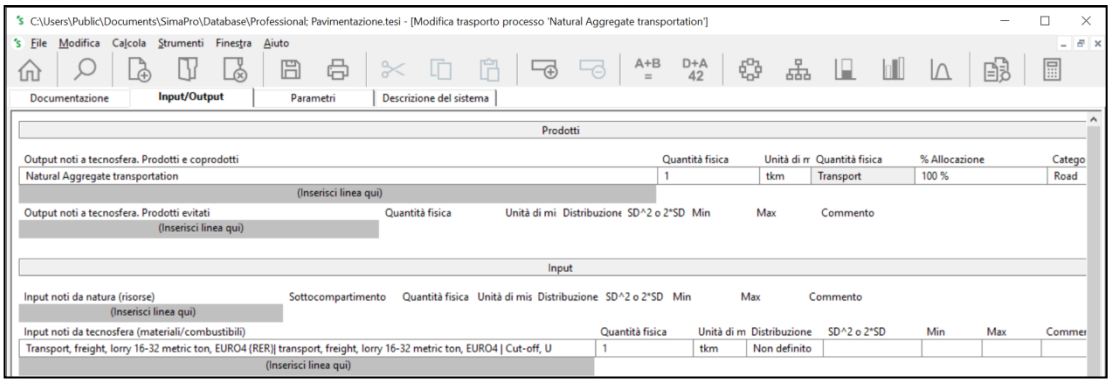


Figura 67 - Processo "Natural Aggregate transportation"

B. Bitumen transportation

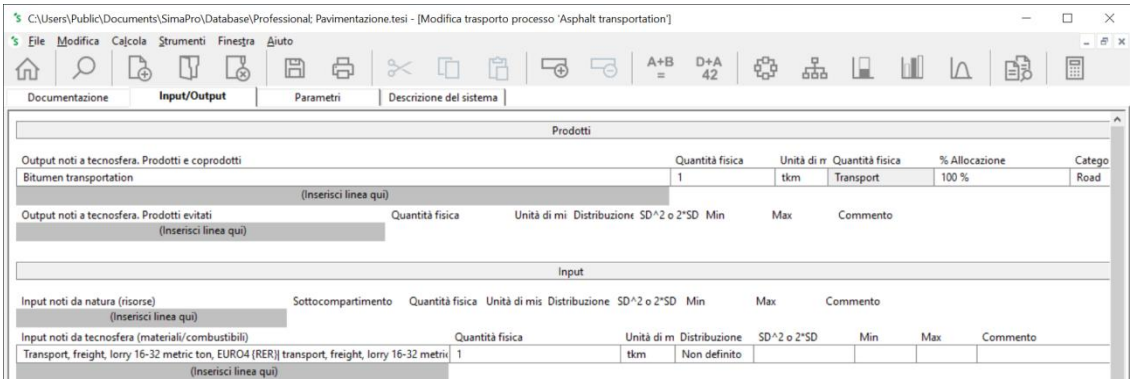


Figura 68 - Processo "Bitumen transportation"

C. PMB transportation

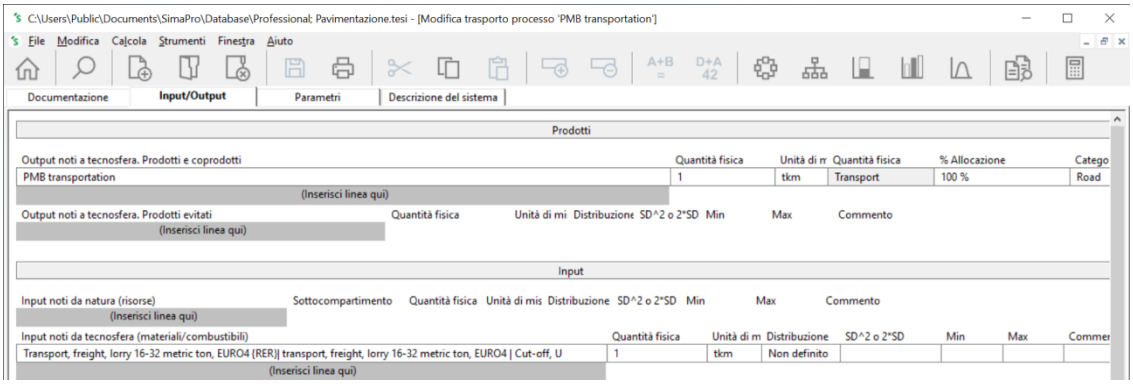


Figura 69 - Processo "PMB transportation"

D. Mixture transportation

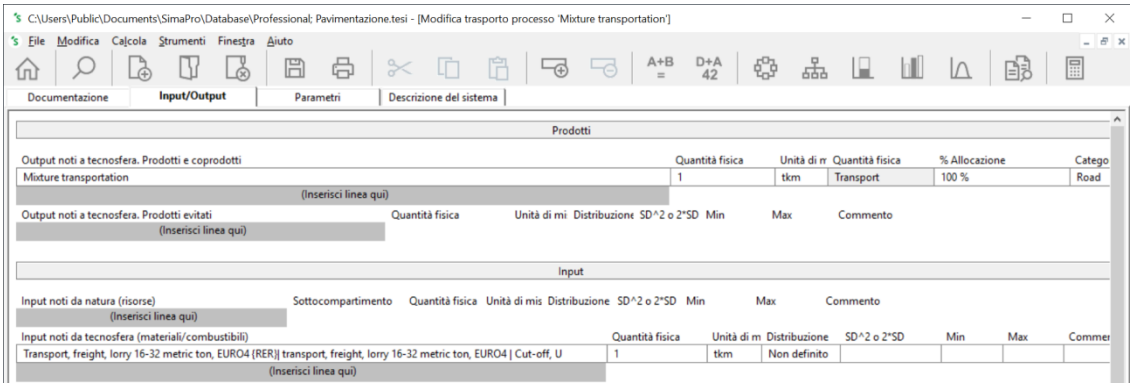


Figura 70 - Processo "Mixture transportation"

E. Concrete transportation

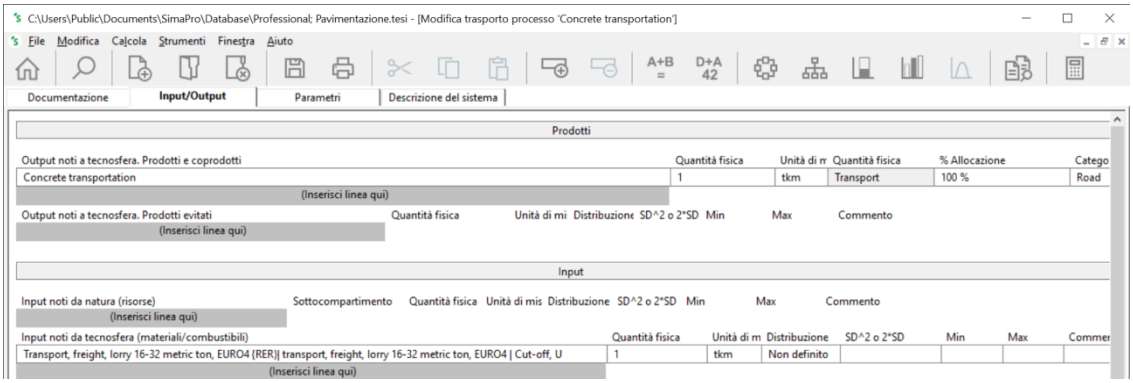


Figura 71 - Processo "Concrete transportation"

Una volta definiti i processi di trasporto, per le fasi finale di realizzazione della sovrastruttura stradale, sono state prese in conto le seguenti macchine da cantiere.

Strato pavimentazione	Mezzi di cantiere	Modello	Alimentazione	Potenza motore
Pacchetto stradale (strati di usura, binder e base)	Vibrofinitrice	SUPER 700i WIRTGEN GROUP	DIESEL	55,4 kW
	Rullo gommato	CW34 CATERPILLAR	DIESEL	98 kW
	Rullo metallico	CS54B CATERPILLAR	DIESEL	98 kW
Fondazione	Grader	G930C VOLVO	DIESEL	142 kW
	Pulvimixer	WR240i WIRTGEN GROUP	DIESEL	455 kW
	Rullo gommato	CW34 CATERPILLAR	DIESEL	98 kW
	Rullo metallico	CS54B CATERPILLAR	DIESEL	98 kW
Sottofondazione	Pala gommata	988H CATERPILLAR	DIESEL	397 kW
	Rullo gommato	CW34 CATERPILLAR	DIESEL	98 kW
	Rullo metallico	CS54B CATERPILLAR	DIESEL	98 kW

Tabella 24 - Mezzi di cantiere

Per ciascuna macchina sono state valutate le produttività medie, note le densità dei materiali da trattare e le caratteristiche delle stesse macchine. I risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella.

Strato pavimentazione	Mezzi di cantiere	Produttività
USURA	Vibrofinitrice	250 t/h
	Rullo gommato	188,1 m^3/h
	Rullo metallico	92,66 m^3/h
BINDER	Vibrofinitrice	250 t/h
	Rullo gommato	235,13 m^3/h
	Rullo metallico	115,82 m^3/h
BASE	Vibrofinitrice	250 t/h
	Rullo gommato	470,25 m^3/h
	Rullo metallico	231,64 m^3/h
Fondazione	Grader	600 m^3/h
	Pulvimixer	800 m^3/h
	Rullo gommato	1410,75 m^3/h
	Rullo metallico	694,91 m^3/h
Sottofondazione	Pala gommata	500 m^3/h
	Rullo gommato	940,5 m^3/h
	Rullo metallico	463,27 m^3/h

Tabella 25 - Produttività macchine di cantiere

Al fine di poter utilizzare anche in questo caso processi forniti da Ecoinvent, note le caratteristiche della macchine descritte nella precedente tabella, sono stati scelti i seguenti processi:

- *"Machine operation, diesel, >=74.57 kW, high load factor {GLO} | machine operation, diesel, >=74.57 kW, high load factor",* il quale descrive il funzionamento di macchine edili/industriali/terminali aeroportuali e simili, sulla base del modello US EPA NONROAD2008 per macchine fuoristrada. In particolare, è rappresentativo delle macchine alimentate a diesel con potenza del motore oltre a 100 CV.
- *"Machine operation, diesel, >=18.64 kW and <74.57 kW, high load factor {GLO} | machine operation, diesel, >=74.57 kW, high load factor",* il quale descrive il funzionamento di macchine edili/industriali/terminali aeroportuali e simili, sulla base del modello US EPA NONROAD2008 per macchine fuoristrada. In particolare, è rappresentativo delle macchine alimentate a diesel con potenza del motore tra 25 e 100 CV.

Per ultimo resta da descrivere il processo definito per la stesa dell'emulsione bituminosa. Trattando terreni stabilizzati, è importante prevedere le giuste quantità di emulsione legante e far in modo che la sua stesa avvenga nel massimo della precisione. A tal fine si è scelto di adottare come macchina spandi legante una macchina portata prodotta dall'azienda WIRTGEN GROUP.

La macchina scelta è il modello WIRTGEN SW16MC da 268 kW, con portata di 10 m^3/h. Il processo creato è quindi di seguito mostrato.

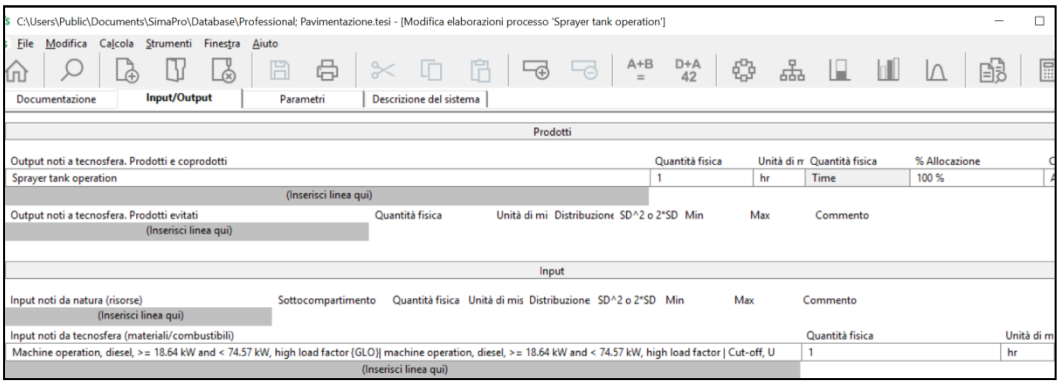


Figura 72 - Processo "Sprayer tank operation"

4.4 Modellazione rete su SimaPro

La fase di modellazione del ciclo di vita su un software è un passaggio importante e delicato da affrontare. È necessario saper legare bene i processi che si andranno a modellare, ed è altrettanto importante avere un'idea ben fondata di rete che si vuole realizzare.

È stato già presentato come, seguendo vie differenti, è possibile creare processi su SimaPro, ma per far ciò è necessario aver preventivamente realizzato un flow chart rappresentativo del modello da implementare.

In questo caso sono stati individuati 3 componenti principali della pavimentazione da modellare:

- Pacchetto legato: unione dei tre strati superficiali in conglomerato bituminoso, rispettivamente usura, binder e base.
- Strato di fondazione.
- Sottofondazione.

Figura 73 - Processi principali caso studio

Una volta identificate le 3 componenti di cui sopra, si è cercato di individuare il legame tra queste componenti e i loro processi che le compongono, aumentando in tal modo il livello di dettaglio dell'analisi preliminare.

In particolare, è stato constatato quanto segue.

Pacchetto legato.

Il pacchetto legato è a sua volta composto dai 3 strati in conglomerato bituminoso. È noto che, per poter realizzare uno strato generico in conglomerato bituminoso, bisogna avere a disposizione la miscela in conglomerato bituminoso e i mezzi di cantiere adatti ad eseguire le operazioni principali di stesa e compattazione.

Detto ciò, per ogni strato (usura, binder e base) sono stati identificati quattro sub-processi denominati rispettivamente *"Bituminous mixture"*, *"Equipment"*, *"Bitumen emulsion"* e *"Equipment(emulsion)".*

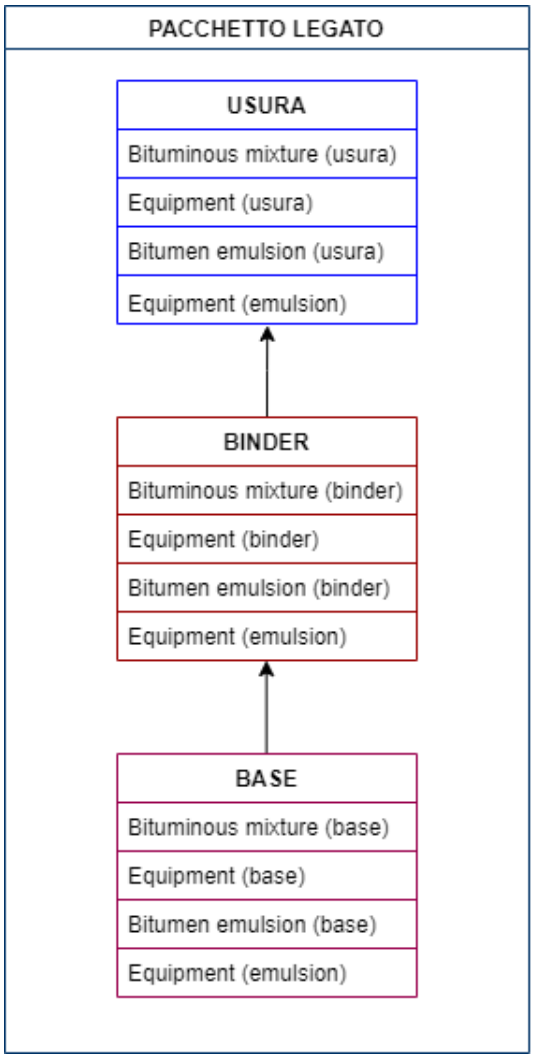


Figura 74 - Analisi processi di dettaglio 2

Il processo *"Bituminous mixture"* è quel processo che restituisce, quale output finale, la miscela in conglomerato bituminoso. Tiene pertanto conto delle fasi di estrazione e produzione di aggregati, bitume e polimero e trasporto fino all'impianto di produzione della miscela, nonché delle fasi di produzione della stessa e trasporto fino al sito di realizzazione della pavimentazione.

BITUMINOUS MIXTURE
Natural aggregate extraction
Natural aggregate load movements
Natural aggregate processing
Natural aggregate transportation
Bitumen
Bitumen transportation
Mixture production
Polymer Modified Bitumen (PMB)
PMB transportation
Mixture transportation

Tabella 26 – Processo "Bituminous mixture"

Prodotti

Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti	Quantità fisica	Unità di m	Quantità fisica	% Allocazione	Categ
Bituminous mixture (base)	1	m3	Volume	100 %	Altri
(Inserisci linea qui)					

Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)							

Input

Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								

Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica	Unità di m	Distribuzione	SD^2 o 2*SD
Natural Aggregate extraction	2216,8	kg	Non definito	
Natural Aggregate load movements	55*2216,8*0,001 = 122	s		
Natural Aggregate processing	2216,8	kg	Non definito	
Natural Aggregate transportation	2216,8*0,001*14,08 = 31,2	tkm		
Bitumen	89	kg	Non definito	
Bitumen transportation	89*0,001*230 = 20,5	tkm		
Mixture production (base)	1	m3	Non definito	
Polymer Modified Bitumen (PMB)	6,9	kg	Non definito	
PMB transportation	6,9*0,001*248 = 1,71	tkm		
Mixture transportation	23,3*2,3128 = 53,9	tkm		
(Inserisci linea qui)				

Figura 75 - Esempio processo "Bituminous mixture (base)" implementato sul software

Il processo “Equipment” racchiude in sé tutto l’equipaggiamento da cantiere per la realizzazione dello strato, che, come visto in precedenza, è composto da vibrofinitrice, rullo gommato e rullo metallico.

EQUIPMENT (base)
Paver operation
Pneumatic roller operation
Tandem roller operation

Figura 76 - Componenti del processo "Equipment (base)"

Prodotti

Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti	Quantità fisica	Unità di m	Quantità fisica	% Allocazione
Equipment (base)	1	m3	Volume	100 %
(Inserisci linea qui)				

Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Comm
(Inserisci linea qui)							

Input

Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Comment
(Inserisci linea qui)								

Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica	Unità di m	Distribuzione
Paver operation	(1/250)*(2,3128) = 0,00925	hr	
Pneumatic roller operation	1/470,25 = 0,00213	hr	
Tandem roller operation	1/231,64 = 0,00432	hr	
(Inserisci linea qui)			

Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)	Quantità fisica	Unità di m	Distribuzion	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Comm
(Inserisci linea qui)							

Figura 77 - Esempio processo "Equipment (base)" implementato sul software

Infine, avendo previsto tra ciascun strato una stesa di emulsione bituminosa, sono stati implementati i processi *"Bitumen emulsion"* e *"Equipment (emulsion)"*.

Procedendo in tal modo per tutti e i tre gli strati legati, il processo "Pacchetto stradale" risultante è stato il seguente.

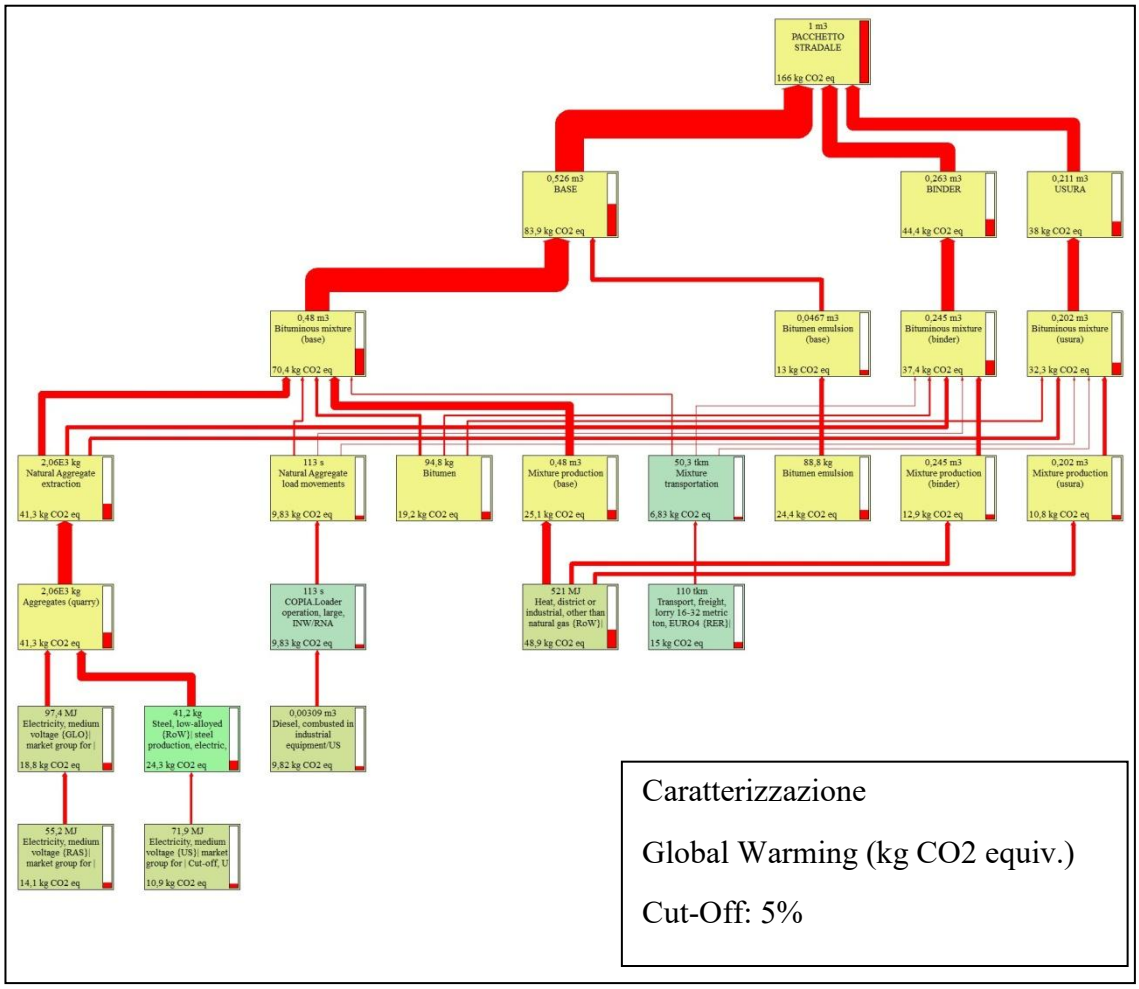


Figura 78 - Rete "PACCHETTO STRADALE" (1 m^3)

Fondazione.

Anche per la realizzazione dello strato di fondazione sono necessari i processi di lavorazione dei materiali (aggregati, cemento, acqua) che lo compongono e le macchine per le operazioni di cantiere. Di conseguenza, il macro processo "Fondazione", sarà a sua volta composto da due sotto-processi denominati "Foundation processing" ed "Equipment (foundation)".

FONDAZIONE
Foundation processing
Equipment (foundation)

Figura 79 - Componenti del processo "Fondazione"

Il processo "Foundation processing" include le lavorazioni necessarie ad ottenere gli elementi principali che andranno a comporre lo strato di fondazione.

Il processo "Equipment (foundation)" include invece le macchine da cantiere necessarie alla posa in opera dello strato.

In particolare, come già anticipato precedentemente, sono stati realizzati due processi differenti per lo strato di fondazione contente RAP e quello classico composto da soli aggregati.

L'analisi condotta in tale lavoro di tesi infatti si prefigge l'obiettivo di condurre un confronto tra i due scenari per evidenziare gli output ambientali derivanti rispettivamente dal processo di trattamento degli aggregati riciclati e trattamento degli aggregati vergini.

Nelle rappresentazioni seguenti, è possibile già osservare una differenza tra le due fondazioni in termini di emissione di CO_2 equivalente.

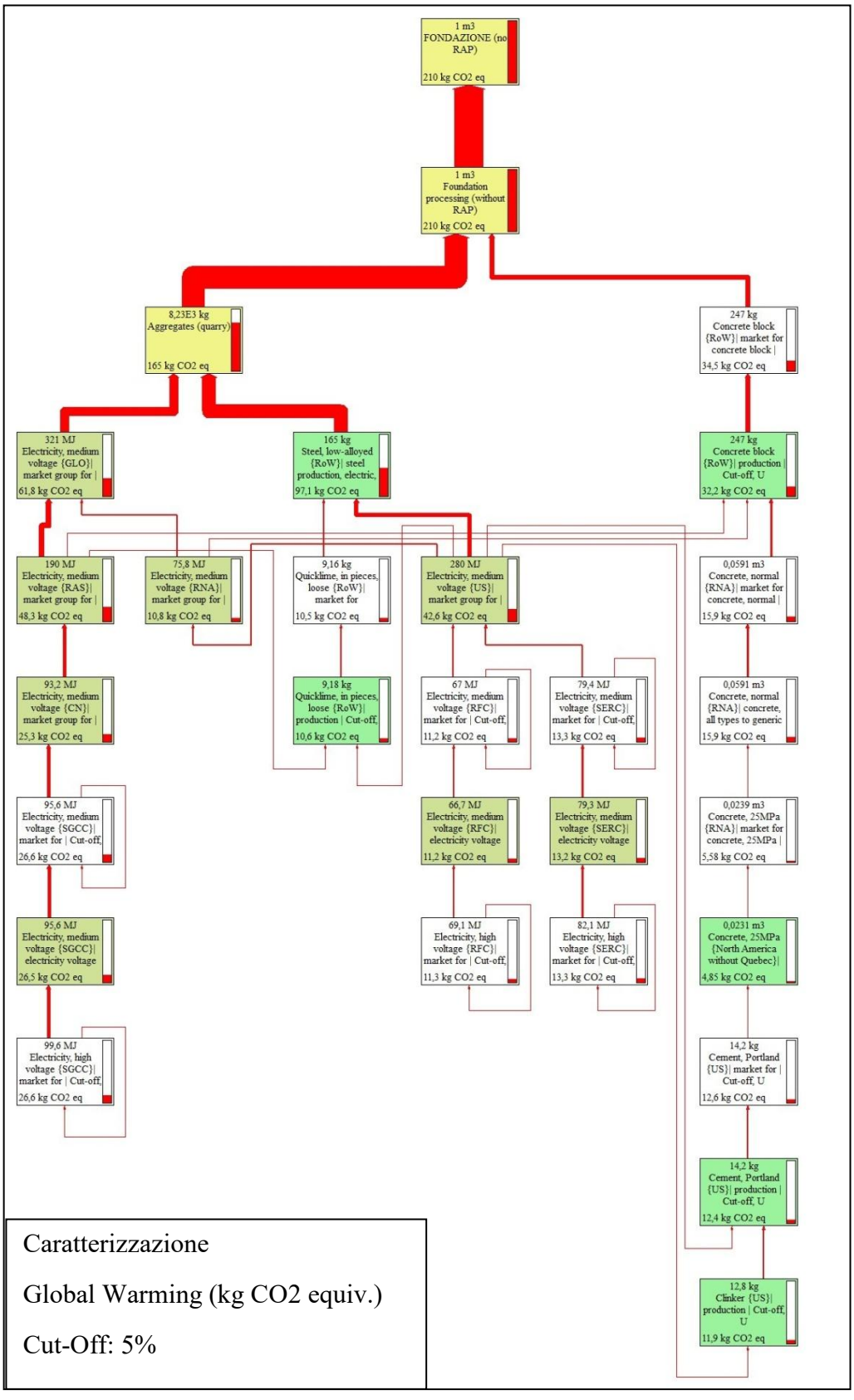


Figura 80 - Rete processo "Fondazione (no rap)"

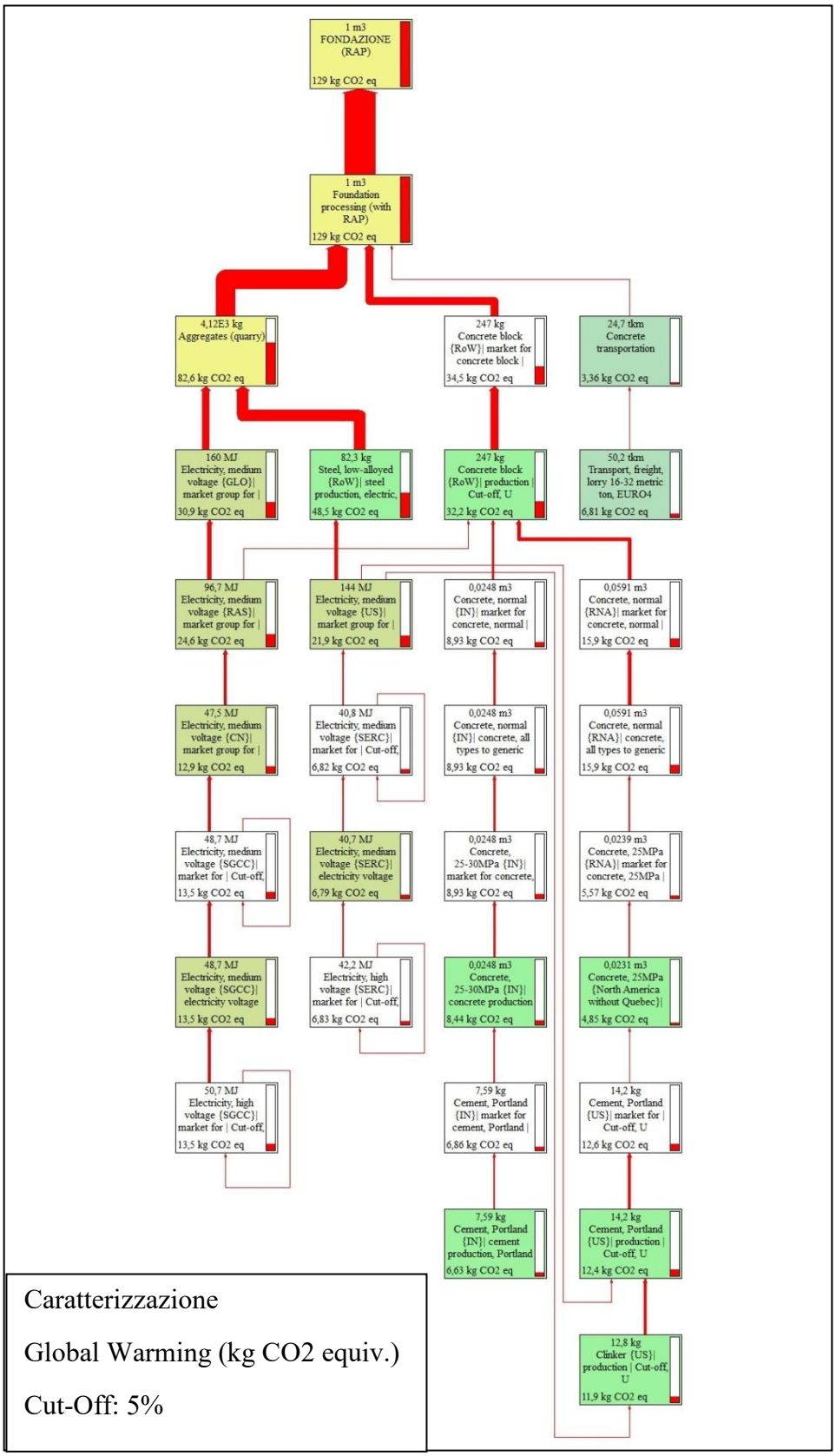


Figura 81 - Rete processo "Fondazione (rap)"

Sottofondazione.

Per ultimo, anche lo strato di sottofondazione sarà composto da due sotto processi, chiamati “Subgrade soil” ed “Equipment (subgrade)”.

SOTTOFONDAZIONE
Subgrade soil
Equipment (subgrade)

Figura 82 - Componenti del processo “Sottofondazione”

Pavimentazione.

Avendo ora a disposizione i tre processi principali (Pacchetto stradale, Fondazione, Sottofondazione), i due processi finali risultanti sono i seguenti.

Prodotti

Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti	Quantità fisica	Unità di m	Quantità fisica	% Allocazione	Categoria
PAVIMENTAZIONE INNOVATIVA	4140	m3	Volume	100 %	Altri
(Inserisci linea qui)					

Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Co
Aggregates (quarry)	4,115	ton	Non definitc				
Natural Aggregate transportation	4,115*6 = 24,7	tkm					
(Inserisci linea qui)							

Input

Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								

Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica	Unità di m	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max
PACCHETTO STRADALE	1140	m3	Non definito			
FONDAZIONE (RAP)	1800	m3	Non definito			
SOTTOFONDAZIONE	1200	m3	Non definito			
(Inserisci linea qui)						

Figura 83 - Processo "Pavimentazione sostenibile"

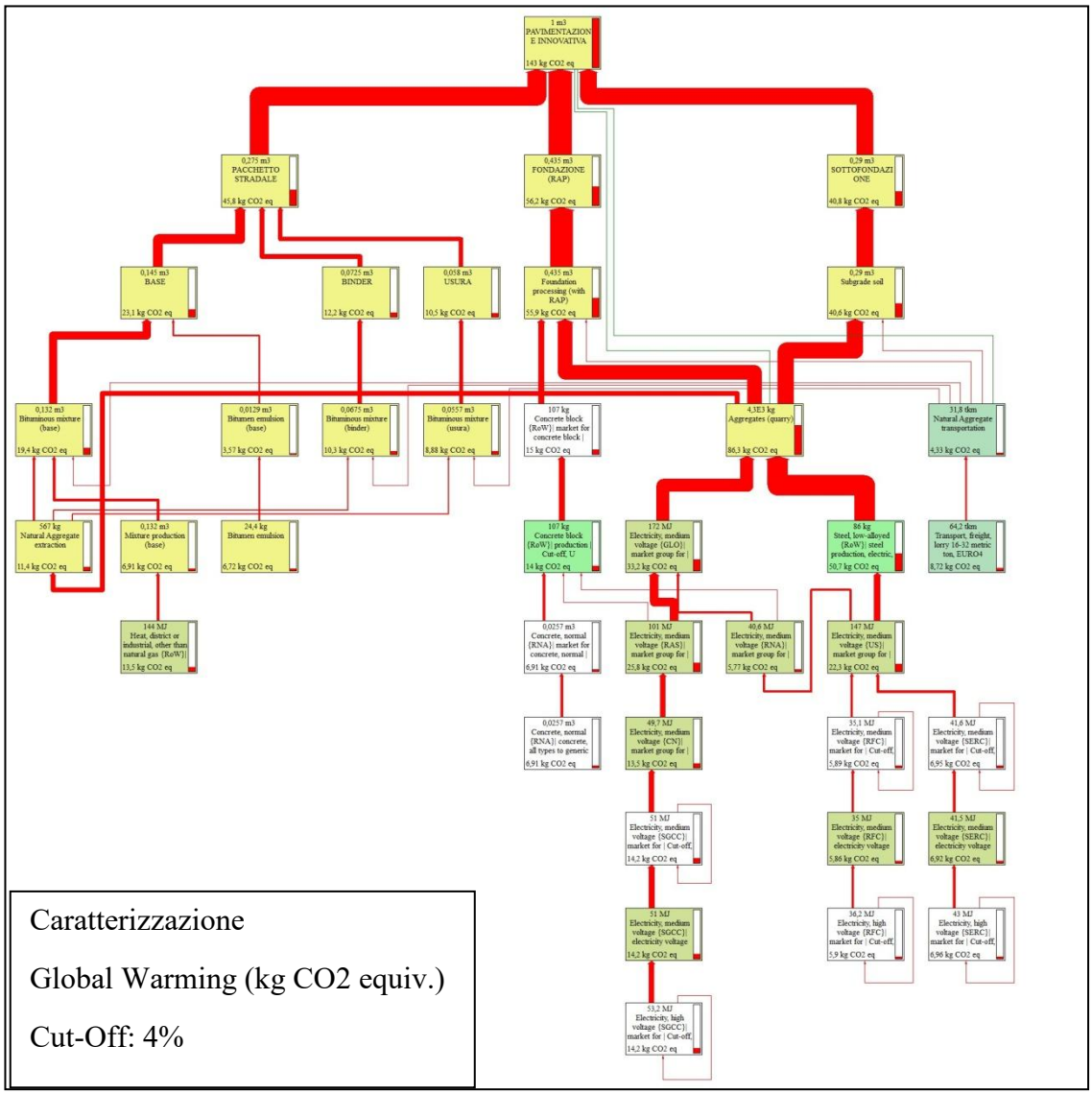


Figura 84 - Rete "Pavimentazione sostenibile"

Prodotti

Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti	Quantità fisica	Unità di m	Quantità fisica	% Allocazione	Categoria
PAVIMENTAZIONE CLASSICA	4140	m3	Volume	100 %	Altri
(Inserisci linea qui)					

Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Co
(Inserisci linea qui)							

Input

Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mis	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								

Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica	Unità di m	Distribuzione	SD^2 o 2*SD	Min	Max
PACCHETTO STRADALE	1140	m3	Non definito			
FONDAZIONE (no RAP)	1800	m3	Non definito			
SOTTOFONDAZIONE	1200	m3	Non definito			
(Inserisci linea qui)						

Figura 85 - Processo "Pavimentazione standard"

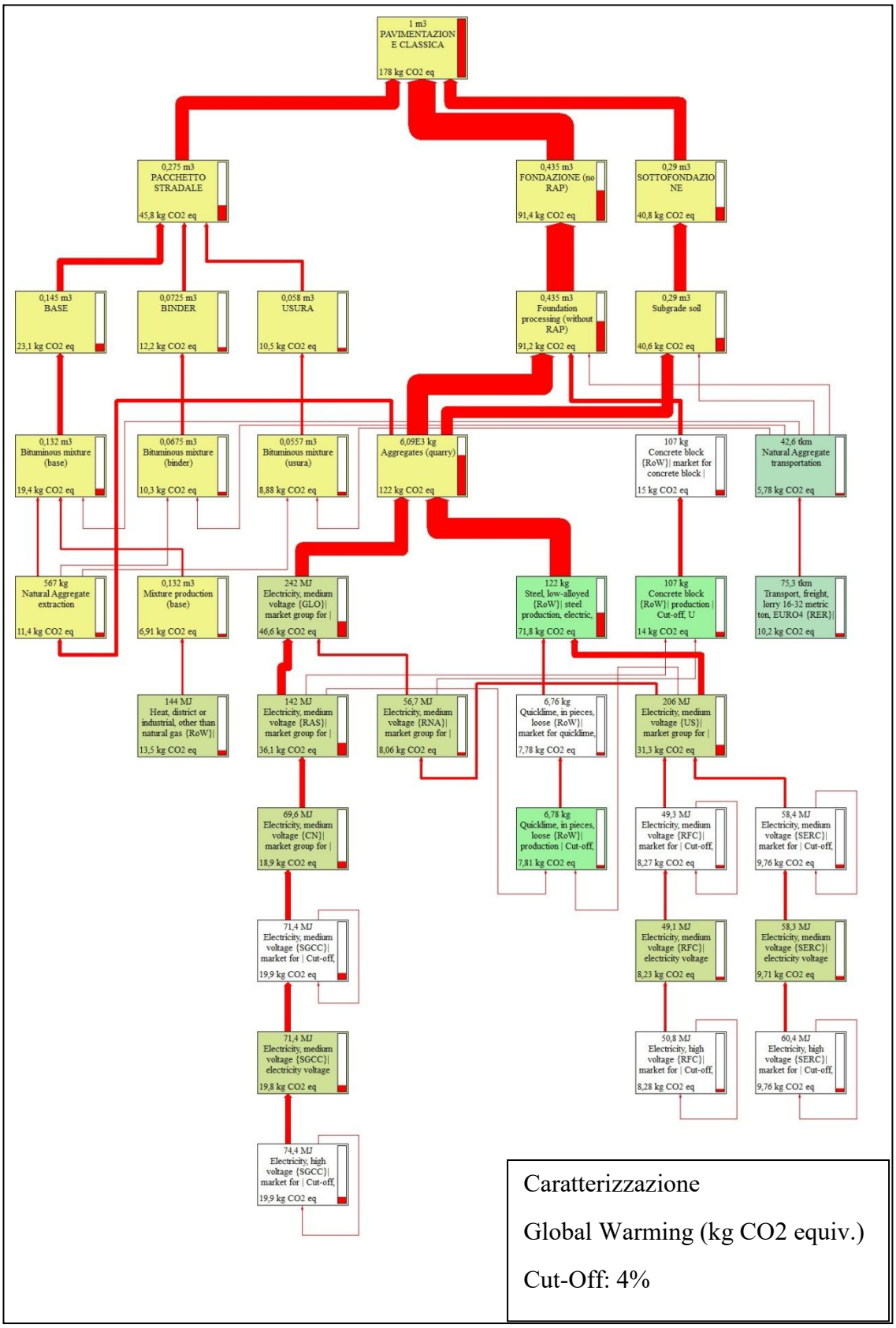


Figura 86 - Rete "Pavimentazione standard"

5. ANALISI DEI RISULTATI

Questo capitolo vuole proporre un'analisi dei risultati ottenuti. L'analisi è stata condotta utilizzando i due metodi di valutazione di cui si è parlato al capitolo 2, vale a dire IPCC 2013 e TRACI.

I risultati ottenuti dalle reti implementate su SimaPrò 9.1.1.7 PhD sono sintetizzati nelle seguenti immagini, dalle quali si possono ricavare differenti aspetti ambientali derivanti dai due scenari. Come risulterà, l'impatto dovuto alla presenza di RAP sarà ben visibile.

Si procederà dapprima con un confronto generale tra i due scenari, includendo ciascuna delle categorie di impatto dei metodi di valutazione scelti ed, infine, si analizzeranno, nello specifico, i risultati ottenuti in termini di emissioni di CO2 equivalente.

Il metodo TRACI verrà utilizzato nella prima fase di analisi, per avere un quadro completo dei vantaggi legati alla presenza di RAP su ciascuna categoria d'impatto.

In seguito, si utilizzerà il metodo IPCC per un confronto tra le due pavimentazioni in termini di sole emissioni di CO2 equivalente, essendo questo un metodo cosiddetto "Single issue": quantifica solamente il Global Warming Potential.

Confronto generale.

Partendo da un confronto generale su tutte le categorie d'impatto analizzate col metodo TRACI, si nota come la presenza di RAP all'interno dello strato di fondazione per la pavimentazione ad impatto minore riduce sensibilmente le percentuali di tutti gli indicatori.

Infatti, preferendo il riciclo di fresato alla produzione di nuovi aggregati vergini, sebbene siano comunque necessarie lavorazioni al fine di renderlo adatto in cantiere, si evitano lavorazioni che impattano considerevolmente sull'ambiente.

Osservando i risultati ottenuti col metodo TRACI, in figura 87 e in tabella 28, si osserva come gli effetti positivi sono evidenti in ogni categoria e in percentuali anche importanti.

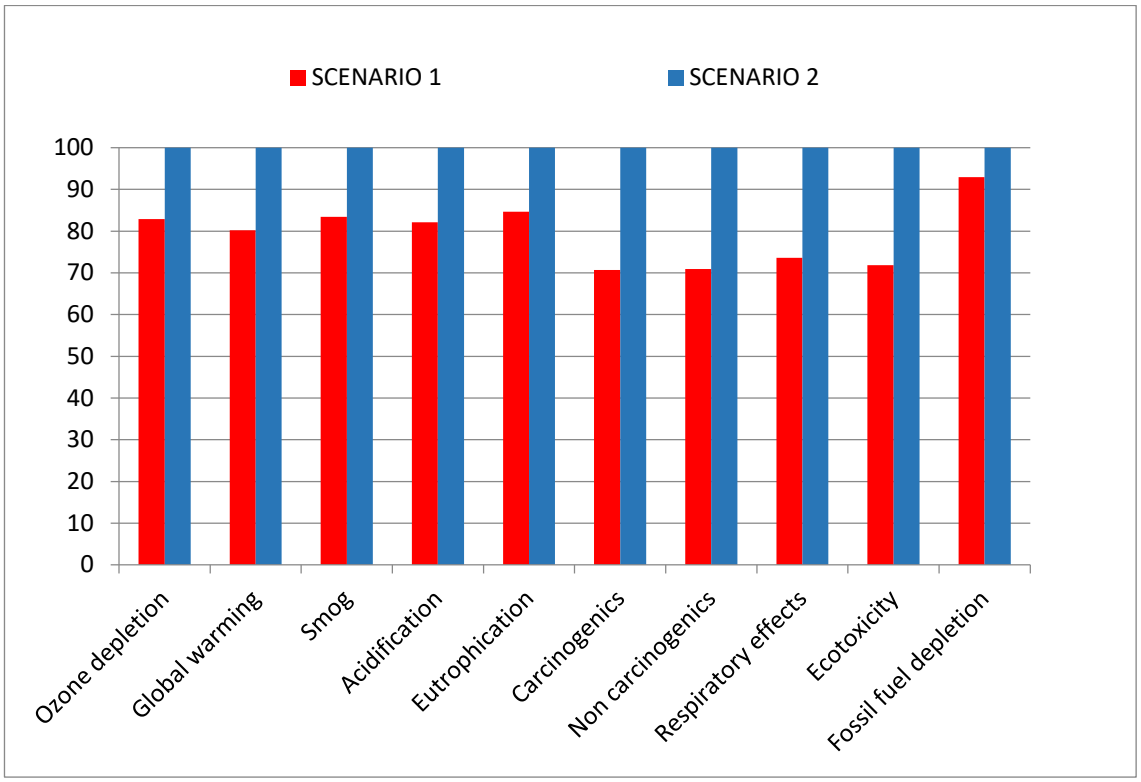


Figura 87 – Confronto TRACI

	Differenze percentuali
Ozone depletion	17%
Global warming	20%
Smog	17%
Acidification	18%
Eutrophication	15%
Carcinogenics	29%
Non carcinogenics	29%
Respiratory effects	26%
Ecotoxicity	28%
Fossil fuel depletion	7%

Tabella 27 - Confronto metodo TRACI

Le riduzioni di emissioni infatti variano per un minimo del 7% per la categoria Fossil Fuel Depletion (Esaurimento dei combustibili fossili), e raggiungono il 29% nel caso di Carcinogenics e Non carcinogenics (Emissioni carcinogene e non per la salute umana).

Nel dettaglio, si analizzano i risultati per ciascuna categoria.

- Ozone depletion: rappresenta il contributo della sovrastruttura all'impoverimento dello strato di ozono stratosferico. L'ozono

stratosferico svolge un'importante azione per l'uomo e l'ecosistema terrestre, in quanto assorbe la maggior parte delle radiazioni ultraviolette solari, dannose per la salute umana. Queste infatti interagendo con molecole biologiche come il DNA, causano problemi quali aumento di incidenza dei tumori alla pelle, delle deficienze immunitarie e possono provocare danni all'ecosistema acquatico e terrestre. Tra le principali cause dell'impoverimento dello strato di ozono vi è l'utilizzo dei clorofluorocarburi CFC, un gruppo di composti utilizzati come refrigeranti per impianti frigoriferi e condizionatori d'aria per impieghi industriali.

La riduzione del 17% della produzione di kg di CF-11 equivalente nello scenario 1, per le premesse di cui sopra, è dovuta alla minore quantità di aggregati naturali e, di conseguenza, al minor impiego di impianti che utilizzano composti come i CFC.

- Global warming: rappresenta il contributo della sovrastruttura al riscaldamento globale. Come nel caso precedente, anche l'effetto serra è causato da una serie di gas che godono di un'elevata capacità assorbente, bloccando il passaggio delle radiazioni infrarosse. L'effetto conseguente causa problematiche climatiche al globo terrestre. I gas serra più importanti sono CH4, CO2, N2O e altri composti organici alogenati, derivanti dalle attività umane che richiedono la combustione di combustibili fossili.

  I risultati ottenuti dimostrano una riduzione del 20% di kg di CO2 equivalenti prodotti dal ciclo di vita delle due sovrastrutture analizzate. La causa di tale riduzione anche in questo caso è da attribuire alle minori reazioni di combustione che richiede la produzione dello strato di fondazione contenente materiale da riciclo.
- Smog: è l'equivalente inglese di fotossidazione, inquinamento tipico delle aree urbane e suburbane. Lo smog fotochimico è un mix di inquinanti, (ossidi di azoto, ossido di carbonio, aldeidi, idrocarburi e ozono) che si genera negli strati più bassi dell'atmosfera per azione della luce solare sulle emissioni derivanti dalle attività umane. Gli effetti che tale inquinamento provoca sono problemi di irritazione e respiratori per l'uomo, ma anche problemi alla vegetazione e alle coltivazioni.

  Realizzando la pavimentazione meno impattante, si abbattono le produzioni di O3 equivalente del 17%. Ancora una volta, favorendo il recupero e riciclo di materiale fresato, si riduce questo indicatore di categoria, salvaguardando non solo l'ecosistema terrestre, ma anche la salute umana.
- Acidification: o acidificazione, quantifica l'abbassamento di ph nell'atmosfera o in acqua, causato principalmente da attività umane che richiedono processi di combustione finalizzati alla produzione di energia elettrica, calore e trasporto. Si quantifica in kg di SO2 equivalente, in

quanto il contributo di un generico processo all'acidificazione aumenta all'aumentare del contenuto di zolfo nei combustibili. Questa categoria stima un impatto ambientale a livello regionale.
Lo scenario 1 si dimostra meno impattante dell'altro per circa il 18%, conseguenza del minor utilizzo dell'impianto di produzione per il trattamento degli aggregati vergini.

- Eutrophication: in italiano eutrofizzazione, si osserva quando nell'ambiente vengono introdotte sostanze che contengono azoto o fosforo in forma biologicamente disponibile. L'effetto maggiore si ha in ambiente marino, dove, una crescita abnorme di nutrienti, come alghe, causa un impoverimento di ossigeno nell'acqua. Le principali cause di emissioni di sostanze nutrienti sono legate all'uso di fertilizzanti agricoli e, in generale, alle reazioni combustibili che generano ossidi di azoto. L'effetto di tale categoria d'impatto sarà evidente su scala regionale o locale.
  Nel caso studio presentato si osserva una riduzione del 15% della produzione di kg di N equivalente, legata alla minore richiesta di reazioni di combustione nello scenario 1.
- Carginocenics, Non carcinogenics e Ecotoxiticy: queste tre categorie possono essere raggruppate in quanto rappresentano il contributo dei processi alla produzione di sostanze carcinogene, non e tossiche per la salute umana. Queste sostanze vengono rilasciate continuamente da attività antropiche, mostrando ripercussioni importanti sulla salute umana.
  Nel modello presentato sono le categorie per le quali si osserva la maggiore riduzione d'impatto dello scenario 1, valori del 28%-29%. È evidente quindi come, il recupero di materiale di scarto abbia conseguenze favorevoli anche per la salute umana.
- Respiratory effects: anche questa categoria rappresenta effetti di attività sulla salute dell'uomo, in particolare per l'apparato respiratorio. Gli effetti respiratori sono causati dal rilascio di particolato dannoso per l'uomo. Come per il caso precedente, lo scenario 1 porta ad una riduzione del 26% di tale sostanze.
- Fossil fuel depletion: questa categoria è legata al consumo ed esaurimento di risorse non biologiche, quale il combustibile fossile, utilizzato per il funzionamento di macchine e attrezzature da cantiere.
  Per questa categoria, i risultati mostrano un lieve effetto benefico dello scenario 1. Ciò è dovuto al fatto che per rendere adatto il RAP alle esigenze del cantiere analizzato, è necessario comunque disporre di un impianto mobile, la macchina Centauro CAM, alimentata a diesel. Quindi seppur in maniera ridotta, anche l'utilizzo di RAP ha delle ripercussioni sull'esaurimento di combustibili fossili.

Si ribadisce ancora che la base di confronto scelta per questa analisi è rappresentata dalle sole lavorazioni che interessano gli aggregati vergini e il RAP, non

avendo opportunamente preso in considerazione possibili scenari di smaltimento degli stessi.

In tabella 28, sono state riassunte le emissioni riferite al solo strato di fondazione, dalle quali si evince ancora quanto constatato.

	SCENARIO 1	SCENARIO 2		
Categoria d'impatto	**Contributo**	**Contributo**	**Differenza**	
Ozone depletion	5,64E-06	8,69E-06	3,05E-06	kg CF-11 eq.
Global warming	91,4	56,20	-3,52E+01	kg CO2 eq.
Smog	3,89	6,06	2,17E+00	kg O3 eq.
Acidification	0,225	0,379	1,54E-01	kg SO2 eq.
Eutrophication	0,0344	0,0605	2,61E-02	kg N eq.
Carcinogenics	2,42E-05	4,84E-05	2,42E-05	CTUh
Non carcinogenics	0,000089	0,000177	8,80E-05	CTUh
Respiratory effects	0,0703	0,132	6,17E-02	kg PM2.5 eq.
Ecotoxicity	295	575	2,80E+02	CTUe
Fossil fuel depletion	64	104	4,00E+01	MJ surplus

Tabella 28 - Emissioni strato di fondazione

I risultati ottenuti, quindi, confermano che il recupero di fresato e le sue lavorazioni riescano a ridurre significativamente l'impatto ambientale legato alla realizzazione di nuove pavimentazioni stradali.

Confronto sul GWP.

Soffermandosi sul solo indicatore del GWP, ancora una volta è evidente una riduzione significativa dell'impatto ambientale dello scenario 1 rispetto al 2 di una percentuale pari al 20%, come emerge dall'immagine n 88.

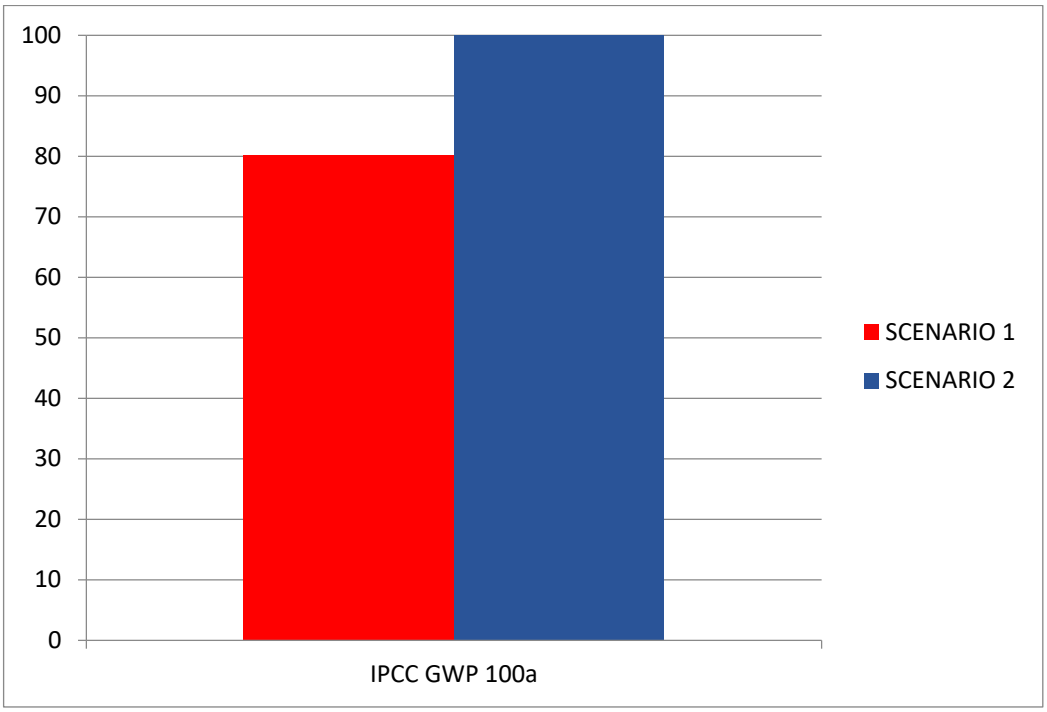


Figura 88 - Confronto IPCC

Nelle figura 89 e 91, è possibile osservare il contributo di ciascun strato alla produzione totale di CO2 equivalente, applicando sia il metodo TRACI sia il metodo IPCC. È evidente come, nello scenario 1, la presenza di RAP nello strato di fondazione contribuisca in maniera importante alla riduzione di Global Warming.

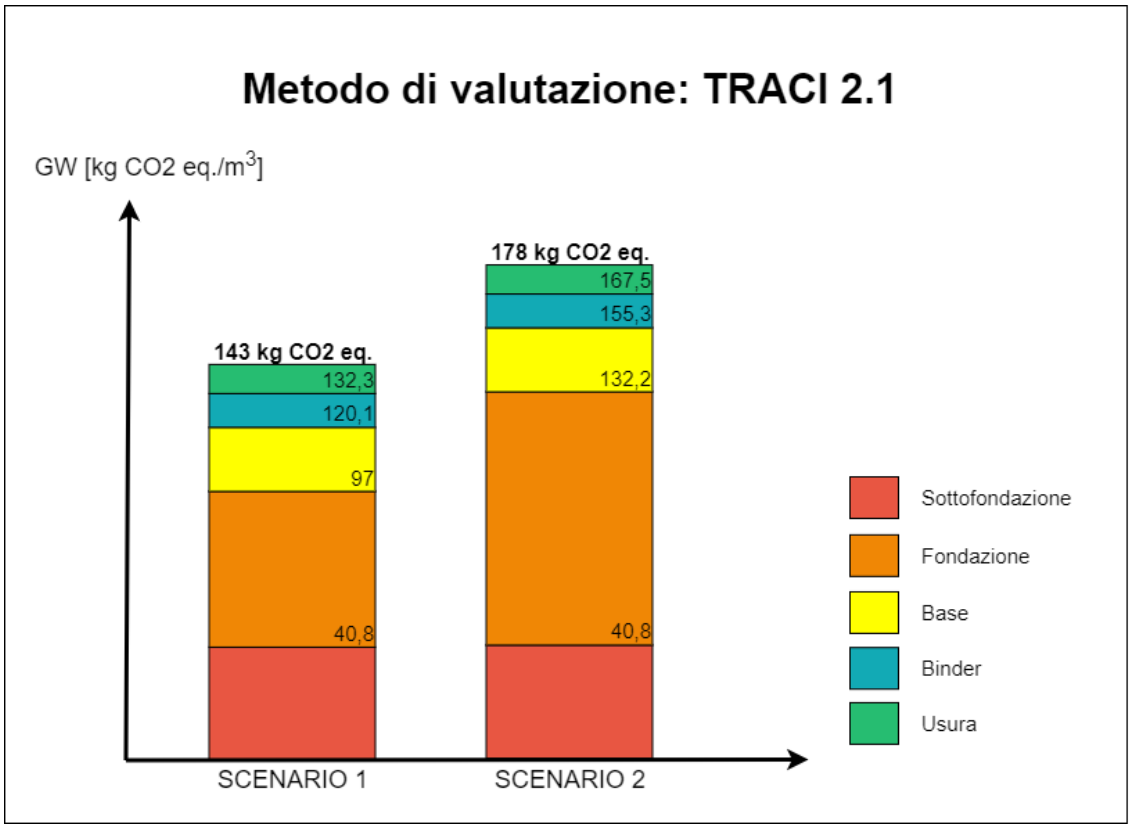


Figura 89 - Contributo degli strati della pavimentazione al GW (TRACI)

SCENARIO 1		
	kg CO2 eq.	%
USURA	10,5	7%
BINDER	12,2	9%
BASE	23,1	16%
FONDAZIONE	56,2	39%
SOTTOFONDAZIONE	40,8	29%
TOTALE	143	100%

SCENARIO 2		
	kg CO2 eq.	%
USURA	10,5	6%
BINDER	12,2	7%
BASE	23,1	13%
FONDAZIONE	91,4	51%
SOTTOFONDAZIONE	40,8	23%
TOTALE	178	100%

Figura 90 - Contributo percentuale strati al GW (TRACI)

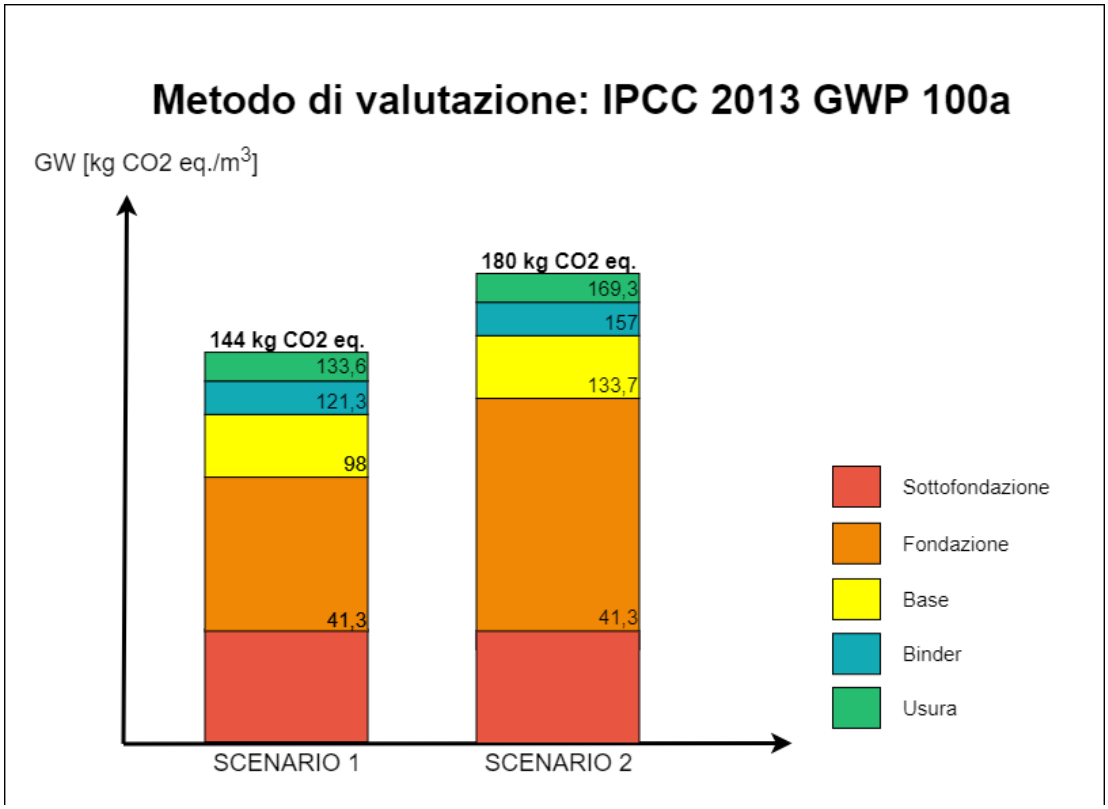


Figura 91 - Contributo degli strati della pavimentazione al GW (IPCC)

SCENARIO 1		
	kg CO2 eq.	%
USURA	10,6	7%
BINDER	12,3	9%
BASE	23,3	16%
FONDAZIONE	56,7	39%
SOTTOFONDAZIONE	41,3	29%
TOTALE	144	100%

SCENARIO 2		
	kg CO2 eq.	%
USURA	10,6	6%
BINDER	12,3	7%
BASE	23,3	13%
FONDAZIONE	92,4	51%
SOTTOFONDAZIONE	41,3	23%
TOTALE	180	100%

Figura 92 - Contributo percentuale strati al GW (IPCC)

Come infatti riassunto nelle figure 90 e 92, lo strato di fondazione della pavimentazione classica produce circa 92 kg di CO2 equivalente. Se invece, si sostituisce il 50% degli aggregati vergini con aggregati riciclati, si produce una quantità minore di CO2 equivalente pari a circa 57 kg di CO2 equivalente.

Infatti, il processo di produzione degli aggregati vergini si compone di 4 fasi principali (estrazione, carico e lavorazione, e trasporti dalla cava all'impianto di miscelazione), che necessitano di macchinari imponenti, con consumi di circa 30l/h di carburante.

Preferendo l'utilizzo di RAP, tuttavia, tutti questi processi vengono inglobati in un'unica macchina che sebbene consumi mediamente quanto le precedenti, non richiede alcun altro ausilio.

Occorre ancora sottolineare come la presente analisi sia del tipo “cradle to gate”, e, in quanto tale non include le fasi di recupero e conferimento in discarica dei materiali. Sicuramente, in un’analisi del tipo “cradle to grave”, tenendo in conto anche delle fasi finora escluse, l’impatto ambientale risulterebbe maggiore, basti pensare alle quantità di rifiuto stradale che verrebbero conferite in discarica.

Pertanto, utilizzando il fresato riciclato, si osserva come si può preservare l’ecosistema naturale da ingenti emissioni, dannose per l’uomo e l’ambiente, ottenendo sovrastrutture comunque ad alte prestazioni.

6. CONCLUSIONI

La realizzazione di nuove opere richiede ingenti quantità di risorse materiali ed economiche. In un contesto mondiale come quello attuale, la metodologia LCA è divenuta un mezzo di indagine e valutazione efficace ed apprezzabile in ambito industriale. In particolare, è lo strumento attraverso cui quantificare il concetto ideale di sostenibilità ambientale ed economica di processi e prodotti.

Anche l'ingegneria stradale ha, nel tempo, adottato tecniche costruttive meno impattanti. Le politiche ambientali, infatti, hanno indirizzato la ricerca verso tecniche sostenibili per l'ambiente. Il recupero e utilizzo di fresato riciclato è stato uno dei tanti metodi studiati e applicati.

Tra le materie prime, quella maggiormente utilizzata nei cantieri stradali è, infatti, il fresato bituminoso. Le sovrastrutture stradali, durante il loro ciclo di vita, sono, infatti, soggette a ripetuti carichi ciclici, derivanti dal traffico veicolare, e ad agenti aggressivi, come fattori climatici. Ciò è la causa dei numerosi interventi di ripristino e manutenzione stradale che interessano le pavimentazioni stradali. Il recupero quindi di materiale derivante da tali interventi comporta importanti vantaggi tecnici, economici e ambientali.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato proprio quello di quantificare l'effetto benefico dell'utilizzo di RAP quale materiale da riempimento per lo strato di fondazione di una sovrastruttura stradale. I cicli di vita dei due scenari analizzati sono stati implementati sul software commerciale SimaPro.

L'esperienza è maturata innanzitutto attraverso la riproduzione e revisione di casi presenti in letteratura, per poi concludersi con la sperimentazione di un caso nuovo, mai trattato su SimaPrò.

Nella prima fase di analisi, è stato ripercorso il ciclo di vita di una pavimentazione tipica colombiana, analizzando l'impatto ambientale generato per la realizzazione del solo strato binder. Da questa prima analisi, si è potuto quantificare il contributo dello strato di pavimentazione in esame alla produzione di CO2 equivalente (Global Warming), confrontandolo con i risultati rinvenuti per lo stesso caso in letteratura.

La fase successiva, di vera sperimentazione, ha visto la realizzazione di un'analisi comparativa di cicli di vita di pavimentazioni stradali, differenti per lo strato di fondazione. L'analisi del tipo "cradle to gate" condotta ha dimostrato e confermato la teoria secondo cui anche l'ingegneria stradale può divenire un settore a minor impatto ambientale.

I due scenari analizzati infatti rappresentano due sezioni di pavimentazioni stradali composte da un pacchetto stradale in conglomerato bituminoso standard e differenti per la composizione dello strato di fondazione in misto granulare stabilizzata

a cemento. Lo scenario 1 è rappresentativo di una pavimentazione sostenibile, a minor impatto, per la presenza di aggregati riciclati (RAP) nello strato di fondazione; lo scenario 2, invece è il tipico caso di pavimentazione classica, avente uno strato di fondazione composto per il 100% da aggregati vergini.

L'analisi è stata condotta applicando due differenti metodologie di valutazione dell'impatto:

- Il metodo TRACI 2.1, un metodo di valutazione a punto medio, attraverso il quale sono state analizzate le seguenti categorie d'impatto: Ozone Depletion, Global Warming, Smog, Acidification, Eutrophication, Carcinogenics, Non carcinogenics, Respiratory effects, Ecotoxicity, Fossil Fuel depletion.
- Il metodo IPCC 2013, metodo a singolo indicatore, attraverso cui è stato valutato soltanto il Global Warming Potential.

I risultati ottenuti dimostrano come il riutilizzo di RAP porta, da un lato, ad un risparmio economico dovuto al non acquisto di nuova materia prima, e, dall'altro, al vantaggio ambientale legato alla realizzazione di un'opera sostenibile, innovativa e al contempo ugualmente funzionale e prestazionale.

In particolare, si è potuto osservare come gli effetti principali di riduzione dell'impatto ambientale siano legati al minor utilizzo degli impianti di lavorazione dei materiali. Lo scenario 1 infatti riduce sensibilmente gli indicatori Ozone Depletion, Global Warming, Smog, Acidification e Eutrophication, i cui valori sono prettamente connessi alle lavorazioni che richiedono combustioni.

Inoltre, lo scenario 1 si dimostra meno impattante anche per la salute umana. Infatti per le categorie Carcinogenics, Non carcinogenics, Respiratory effects, Ecotoxicity sono stati osservati i valori maggiori di riduzione dell'impatto rispetto allo scenario 2.

In definitiva, per i casi analizzati, anche il metodo IPCC ha confermato la teoria principale, su cui si fonda l'intero lavoro di tesi. Sostituendo solamente il 50% di aggregati vergini nello strato di fondazione con aggregati RAP, è possibile produrre un quantitativo di CO2 equivalente minore di 35 kg.

Tuttavia, lo studio condotto affronta un'analisi del tipo "cradle to gate". La valutazione dell'impatto ha riguardato le sole fasi di recupero ed estrazione dei materiali, produzione della miscela e realizzazione della sovrastruttura stradale. L'impatto sarebbe differente se si consideressero le fasi successive a quella di costruzione del ciclo di vita delle pavimentazioni.

A tal proposito, un proseguio a questo inizio di sperimentazione potrebbe essere uno studio LCA del tipo "cradle to cradle". Sarebbe interessante valutare i benefici, nel corso della vita di esercizio della pavimentazione, legati all'utilizzo di RAP anche nelle fasi di manutenzione e ripristino delle pavimentazioni stradali.

Certamente, un'analisi più approfondita, portebbe a risultati ancora più soffisfacenti.

Quello proposto è soltanto un punto di partenza, per studi e ricerche ancora più attente e scrupolose, per applicazioni più eco sostenibili.

In conclusione, nuovi studi di LCA sulla sostenibilità delle pavimentazioni stradali, potrebbero riguardare analisi "cradle to cradle", al fine di valutare l'impatto del ciclo di vita di sovrastrutture, completo delle fasi di utilizzo, manutenzione e demolizione delle stesse.

Bibliografia

Antunes, V., Freire, A., & Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and Building Materials , 211*, 17.

Araújo, J., Oliveira, J., & Silva, H. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment , 32*, 97 - 110.

ARPA Lombardia. (s.d.). *PM10 e PM2,5*. Tratto il giorno Ottobre 5, 2020 da https://www.arpalombardia.it/Pages/Aria/Inquinanti/PM10-PM2,5.aspx?firstlevel=Inquinanti

Berry, C., & McCarthy, S. (2011). *Guide to sustainable procurement in construction.* Londra: CIRIA.

Blend. (s.d.). *Impianti Mobili*. Tratto il giorno Novembre 1, 2020

Blengini, G., & 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), 1021-1030.

Borghi, G., Pantini, S., & Rigamonti, L. (2018). Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology. *Waste Management , 80*, 423 - 434.

BSI. (2006). Environmental management: Life Cycle assessment: Principles and Framework. *ISO EN BSI 14040. British Standards Institution* .

CAMS. (2021, Maggio 12). *Eu.Camsrecycling.com.* Tratto da I vantaggi del riciclaggio dell'asfaltp: https://eu.camsrecycling.com/riciclo-asfalto/fresato-dasfalto-i-benefici-del-riciclo-e-il-processo-di-recupero/#:~:text=Riassumendo%2C%20il%20riciclo%20del%20fresato,stradale%20grazie%20al%20recupero%20del

Cao, C. (2017). 21 - Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction. In *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction* (p. 529-544). Mizi Fan, Feng Fu.

Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri , M., & Lo Casto, B. (2014). *Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road.* Palermo, Italy.

Census Bureau, U. (s.d.). *North American Industry Classification System*. Tratto il giorno Luglio 2020 da https://www.census.gov/eos/www/naics/

Cicas, G., Matthews, H., & Hendrickson, C. (2006). The 1997 benchmark version of the Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) Model.

Daniela L. Vega A., J. S.-A. (2022). Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. *International Journal of Pavement Engineering* , p. VOL. 3, NO.4, 923-936.

Davis, S., & Diegel, S. (2002). *Transportation Energy Data Book* (22 ed.). (O. R. Laboratory, A cura di) Oak Ridge, Tennessee, United States.

Del Ponte, K., Natarajan, B., Ahlman, A., Baker, A., Elliot, E., & Edil, T. (2017). Life-Cycle Benefits of Recycled Material in Highway Construction. *Transportation Research Board , 2628* (1), 1-11.

DM Industries. (s.d.). *Mobile heavy duty screening station (crawler type)*. Tratto il giorno Novembre 1, 2020 da https://xposure.pl/PRODUCT/Mobile_crusher_station/Mobile_heavy_duty_screening_station__crawler_type_.html

Ecoinvent. (s.d.). *Ecoinvent.org.* Tratto da The Ecoinvent Database: https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/

Ecoinvent.org. (s.d.). *Ecoinvent Database.* Tratto da Ecoinvent.org: https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/

EconomiaCircolare.com. (s.d.). Tratto da Life Cycle Thinking: https://economiacircolare.com/glossario/life-cycle-thinking/

Environmental Protection Agency. (1995). *AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (Fifth ed., Vol. I). New York City, United States: EPA (Environmental Protection Agency).

Environmental Protection Agency. (2004). Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. In *AP42 - Compilation of Air Emissions Factors* (Fifth Edition ed., Vol. I).

Environmental Protection Agency. (s.d.). *Emission Factor Search*. (EPA (Environmental Protection Agency)) Tratto il giorno Settembre 2020 da https://cfpub.epa.gov/webfire/SearchEmissionFactor/searchpage.cfm

Environmental Protection Agency. (s.d.). *Environmental Topics*. Tratto il giorno Agosto 1, 2020 da https://www.epa.gov/environmental-topics

Environmental Protection Agency. (1996). Gasoline and Diesel Industrial Engines. In *AP42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (Vol. Section 3.3, p. 74). Morrisville, North Carolina.

Environmental Protection Agency. (2002). *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust.* Washington, DC.

Environmental Protection Agency. (2004). Hot Mix Aphalt Plants. In *AP42 - Compilation of Air Emissions Factors* (Fifth Edition ed., Vol. Section 11.1).

Environmental Protection Agency. (s.d.). *Source Classification Codes (SCCs).* (E. (. Agency), A cura di) Tratto il giorno Settembre 1, 2020 da https://ofmpub.epa.gov/sccwebservices/sccsearch/

Environmental Protection Agency. (2020, Settembre). *Welcome to WebFire*. (EPA (Environmental Protection Agency)) Tratto da https://cfpub.epa.gov/webfire/

Eurobitume. (s.d.). Tratto da https://www.eurobitume.eu/home/

European Asphalt Pavement Association. (2014). *Asphalt the 100% recyclable construction product.* Brussels, Belgium.

European Bitume Association. (2020). *The Eurobitume Life Cycle Inventory for Bitumen.* Bruessels, Belgium.

European Bitumen Association. (2012). *Eurobitume.* Brussels, Belgium.

Executive Office of the President of the United States. (2017). *North American Industry Classification System.*

Farina, A., Zanetti, M., Santagata, E., & Blengini, G. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling* (117), 204-212.

Farina, A., Zanetti, M., Santagata, E., Blengini, G., & Lanotte, M. (2014). Life Cycle Assessment of Road Pavements containing Crumb Rubber from End-of-Life Tires. *International Sumposium on Pavement Life Cycle Assessment.* Davis, California , USA.

Gabi.Sphera. (s.d.). *Description of the TRACI Method.* Tratto da Gabi.Sphera.com: https://gabi.sphera.com/support/gabi/gabi-6-lcia-documentation/traci-21/

Garbarino, E., Blengini, G., & Piacenza, A. (2009). *Pianificazione e gestione dei rifiuti da C&D nella Provincia di Torino.* Torino.

Gian Andrea Blengini, E. G. (2010, January 28). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* , p. 1021-1030.

Goh, S., You, Z., & Van Dam, T. (2014). Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt. *Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium.* Ames, Iowa.

Google. (s.d.). *Google Earth*. Tratto il giorno Ottobre 22, 2020

Google. (s.d.). *Google Maps*. Tratto il giorno Ottobre 22, 2020

Harvey, J. e. (2016). Pavement life cycle assessment framework. *United States. Federal Highway Administration.* , No. FHWA-HIF-16-014.

Hertwich, E., Mateles, S., Pease, W., & McKone, T. (2001). Human Toxicity Potentials for Life-Cycle Assessment and Toxics Release Inventory Risk Screening. *Enivornmental Toxicology and Chemistry , 20* (4), 928 - 939.

Huang, Y. (2007). Life Cycle assessment of use of recylced materials in pavements. *PhD. Newcastle University* .

Hüseyin , A., Gürer, C., Çetin, S., & Elmacı, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials , 36*, 7.

Institute, I. S. (March 2001). *Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis.* Gothenburg, Sweden: Hakan Stripple.

IPCC. (s.d.). Tratto da IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/figure-1-1.html

Isprambiente.gov.it. (s.d.). Tratto da Convenzione quadro sui cambiamenti climatici e protocollo di Kyoto: ww.isprambiente.gov.it/it/attivita/cambiamenti-climatici/convenzione-quadro-sui-cambiamenti-climatici-e-protocollo-di-kyoto

Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production , 280*.

Lin, Y.-Y. (2012). *Eco-decision Making for Pavement Construcution Projects.* Tesi, University of Washington, Civile and Environmental Engineering, Washington.

lists.peacelink.it. (s.d.). Tratto da https://lists.peacelink.it/economia/2005/09/msg00037.html

Marceau, M., Nisbet, M., & VanGeem, M. (2006). *Life cycle inventory of Portland Cement Manufacture.* Skokie, Illinois: Portland Cement Association.

Martinez-Arguelles, A. e. (2019). Life cycle assessment of natural and recylced concrete aggregate production for road pavements applications in the Nprthen region of Colombia: case study. *Transportation Research Record* , 1-16.

MEDEA Ambiente. (s.d.). *Eco-Profilo*. Tratto il giorno Ottobre 20, 2020 da http://www.medeaambiente.it/s/glossario/eco-profilo/

Moreno, F., Rubio, M., & Martinez-Echevarria, M. (2011). Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes. *Construction and Building Materials , 25* (5), 2465 - 2471.

Morse, A., Nash, P., & Senadheera, S. (2001). *Environmental Characteristics of Traditional Construction and Maintenance Materials : Finale Report.* Lubbock , Texas.

Nathman, R., McNeil, S., & Van Dam, T. (2009). Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management: Adding the Pavement Life-Cycle

Assessment Tool for Environmental and Economic Effects to the Decision-Making Toolbox. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board , 2039* (1), 40-49.

Pasandín, A. a. (2014). Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates. *Construction and Buldings materials* , 52, 284-293.

Phoresta.org. (2021, 03 05). Tratto da Come valutare il ciclo di vita di un prodotto: https://www.phoresta.org/2021/03/05/come-valutare-il-ciclo-di-vita-di-un-prodotto/

PRé. (s.d.). *PRé Sustainability.* Tratto da PRé Sustainability.com/Articles/Recipe: https://pre-sustainability.com/articles/recipe/

Prè. (June 2020). *SimaPro Database Manual - Methods Library.*

R S Means Company. (1995). *Means Building Construction Cost Data* (8th ed.). R S Means Company.

Reteclima.it. (s.d.). Tratto da LCA-Life Cycle Assessment (Analisi del ciclo di vita): www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/?gclid=EAIaIQobChMIrLKCkdy2-AIVmdnVCh0ROwZKEAAYASAAEgKus_D_BwE

Reteclima.it. (2014, 10 30). Tratto da CO2 (anidride carbonica, biossido di carbonio): https://www.reteclima.it/co2/

RMRC. (2020). *Recycled Materials Resource Center*. Tratto da https://rmrc.wisc.edu/palate/

Salvatore Antonio Calcagnile, E. S. (A.A. 2020/2021). Pavimentazioni innovative in galleria: sostenibilità ambientale . *Tesi di laurea magistrale* . Politecnico di Torino.

Santagata E., B. G. (2013). Life cycle assessment of road pavement base and foundation courses containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Proceedings Sardinia 2013, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium.* S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

Santagata, E., Tsantilis, L., Baglieri, O., Chiappinelli, G., & Riviera, P. (2017). Re-use in asphalt pavements of fillers from natural stone sawmilling sludge. In *Transport Infrastructure and Systems* (p. 371-378). Roma, Italia.

Santero, N., Masenet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling* (55), 801-809.

Stiraparo, A., Santagata, E., Dalmazzo, D., Riviera, P., & Urbano, L. (A.A. 2018-2019). *Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali.* Politecnico di Torino, Torino.

Stokes, J., & Horvath, A. (2009). Energy and air emissions effects of water supply. *Enivornmental Science and Technology , 43* (8), 2680 - 2687.

Stripple, H. (2001). *Life Cycle Assessment of Road.* IVL Swedish Environmental Researche Institute, Gothenburg, Sweden.

Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., Han, J., & Henderson, R. (2018). Estimation of U.S. refinery water consumption and allocation to refinery products. *Fuel , 221*, 542 - 557.

Tecnologialanzi. (2019, 10 27). *Tecnologialanzi.* Tratto da COMBUSTIBILI FOSSILI: il petrolio: https://tecnologialanzi.blogspot.com/2019/10/combustibili-fossili-il-petrolio.html

To-be.it. (s.d.). *SimaPro.* Tratto da To-be.it: https://www.to-be.it/strumenti/simapro/

United States government. (s.d.). *The Origins of EPA*. (EPA (United States Environmental Protection Agency)) Tratto il giorno Settembre 1, 2020 da https://www.epa.gov/history/origins-epa

University, C. M. (2020, Maggio). *Economic Input-Output Life Cycle Assessment*. Tratto da http://www.eiolca.net/

University, C. M. (s.d.). *Use the Tool*. Tratto il giorno Giugno 2020 da http://www.eiolca.net/cgi-bin/dft/use.pl

Wikipedia. (s.d.). Tratto da Emulsione bituminosa.

Wikipedia. (s.d.). *Wikipedia*. Tratto da Barranquilla.

Williams, M., Salice, C., & Reddy, G. (2015). Wildlife Toxicity Assessment. In *Wildlife Toxicity Assessment for Chemicals of Military Concern* (p. 421 - 437).

Yue Huang, T. P. Pavement Life Cycle Assessment .