

POLITECNICO DI TORINO



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**“Bio-leganti ad uso stradale: Stato dell’arte e sviluppo di
casi studio per la valutazione del ciclo di vita”**

Relatori:

Prof. SANTAGATA Ezio

Prof. DALMAZZO Davide

Prof.ssa TSANTILIS Lucia

Candidato:

GIANVITO Marco

Anno Accademico 2019 - 2020

*Cadendo, la goccia scava la pietra,
non per la sua forza, ma
per la sua costanza.*

(Lucrezio)

SOMMARIO

La crescente domanda di risorse esauribili, come il petrolio e suoi derivati (bitume), ha creato uno dei più grandi problemi dell'era moderna, da cui deriva la necessità di ricercare fonti alternative e rinnovabili che garantiscano la salvaguardia e la rigenerazione di tali risorse, nel tempo. Per risolvere questo problema, si sta cercando di puntare, sempre più, ad una "bio-economia", la quale si preoccupa di generare energia, non più da combustibili fossili, ma da materia organica rinnovabile, essendo questa efficiente, economica e rispettosa dell'ambiente. Nel settore delle infrastrutture di trasporto, la ricerca scientifica si sta sempre più orientando verso l'idea di sostituire parzialmente o totalmente il legante bituminoso con materiali provenienti da risorse rinnovabili che siano anche più sostenibili da un punto di vista dei costi ambientali. A questo fine, negli ultimi decenni, vari ricercatori hanno lavorato alla formulazione di leganti alternativi, conosciuti come bio-leganti, concepiti come potenziali sostituti del bitume, poiché estratti da biomassa o da rifiuti organici, risorse onnipresenti e rinnovabili. I primi bio-leganti sviluppati per la sostituzione completa, sono stati quelli a base di oli vegetali e coprodotti del legno mentre, l'ultimo decennio ha visto un crescente interesse verso l'estrazione di lipidi dalle microalghe. Per quanto riguarda, invece, la sostituzione parziale, sono state studiate varie alternative: lignina, bio-oli derivanti dagli scarti di olio da cucina oppure bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino. Per l'utilizzo dei bio-leganti occorre, comunque, valutarne le caratteristiche fisiche e di invecchiamento, oltre alle proprietà reologiche, necessariamente da confrontate con quelle del legante convenzionale. A questo scopo, è stata eseguita un'approfondita ricerca in letteratura per comprendere quali fossero le lavorazioni necessarie da eseguire sulle biomasse, al fine di ottenere i rispettivi bio-leganti.

Oramai in qualsiasi progetto, la componente sostenibile e/o ambientale riveste uno dei criteri fondamentali di scelta e per questo, è stato effettuato, anche, un Life Cycle Assessment (LCA), valutando l'intero ciclo di vita di una pavimentazione, considerando le fasi di: estrazione e produzione dei materiali, distribuzione, uso, manutenzione, riciclaggio e dismissione finale.

Il LCA sta assumendo sempre più importanza in tutti quei campi, ingegneria civile inclusa, dove è richiesta una valutazione di sostenibilità del progetto, permettendo di valutare, così, i potenziali impatti già in fase di concezione e progettazione. A questo fine, sono stati analizzati due casi studio, considerando i bio-leganti, in modo da poter valutare eventuali vantaggi o svantaggi, tramite il tool PaLATE, in termini di impatti ambientali. Di questi, si è posta particolare attenzione all'emissione di anidride carbonica e all'energia dell'intero sistema, tramite un'analisi cradle-to-grave. I due casi studio presi a riferimento sono stati: il viadotto "Torre del Colle", sull'autostrada A32, e quello di una strada extraurbana italiana. I principali obiettivi di questo lavoro sono stati individuati nello studio degli effetti delle diverse tipologie di bio-legante, unitamente all'influenza degli stessi, al variare delle percentuali di sostituzione. Inoltre, durante l'analisi LCA, si è indagato come la frequenza nelle attività di manutenzione possa influire sugli impatti ambientali, tenendo conto, anche, della tipologia di allocazione.

Parole chiave: bioleganti, microalghe, lignina, letame suino, scarto olio da cucina, analisi del ciclo di vita, LCA, PaLATE.

ABSTRACT

The growing demand for exhaustible resources, such as oil and its derivatives (bitumen), has created one of the biggest problems of the modern age, hence the need to seek alternative and renewable sources that will ensure the preservation and regeneration of these resources over time. To solve this problem, it would be necessary to aim for a "bio-economy" that generates energy, not from fossil fuels, but from renewable organic matter, since it is efficient, cheap and environmentally friendly. In the field of transport infrastructure, scientific research is increasingly moving towards the idea of partially or whole replacing of bituminous binder with materials from renewable resources that are also more sustainable from an environmental cost point of view. In recent decades, several researchers have worked on the formulation of alternative binders, known as bio-binders, created as potential substitutes for bitumen, since they are extracted from biomass or organic waste that are omnipresent and renewable resources. The first bio-binders developed for whole substitution were those based on vegetable oils and wood co-products while the last decade has seen a growing interest in the extraction of lipids from microalgae. For partial substitution various alternatives have been studied: lignin, bio-oil from waste cooking oil (WCO) or bio-oil from swine manure processing. For the bio-binders, however, it is necessary to evaluate their physical, ageing and rheological properties, necessarily to be compared with the conventional binder ones. To do this, a literature research has been carried out to understand the necessary processes that must be performed on biomass, in order to obtain the respective bio-binders. Nowadays, in most projects, the sustainable and environmental component is one of the fundamental criteria of choice and for this reason, a Life Cycle Assessment (LCA) has been carried out, evaluating the entire life cycle of a road pavement, considering the following phases: extraction and production of materials, distribution, use, maintenance, recycling and final disposal.

The LCA is becoming important in those fields, including civil engineering, where a sustainability assessment of the project is required because it is possible to assess potential impacts already at the design and planning stages. In order to carry out an LCA analysis in terms of environmental impacts, two case studies were analysed considering bio-binders in order to evaluate possible advantages or drawbacks through the PaLATE tool. Concerning all environmental impacts, a special focus was placed on carbon dioxide emissions and on the energy of the entire system, through a cradle-to-grave analysis. The two case studies taken as reference were the "Torre del Colle" viaduct, on the A32 motorway, and an Italian suburban road. The main aims of this work have been identified in the study of the effects of the different types of bio-binder, together with their influence on substitution rates. In addition, during the LCA analysis, it was investigated how the frequency of maintenance activities can affect environmental impacts, also considering the type of allocation.

Keywords: biobinders, microalgae, lignin, swine manure, waste cooking oil, WCO, Life Cycle Assessment, LCA, PaLATE.

INDICE

SOMMARIO	I
ABSTRACT	III
1. INTRODUZIONE	1
1.1 Struttura della tesi.....	3
2. BIO-LEGANTI: DEFINIZIONE E TERMINOLOGIA	5
3. BIO-LEGANTI: STATO DELL'ARTE	7
3.1 SOSTITUZIONE TOTALE: leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno	8
3.1.1 Proprietà fisiche e reologiche	11
Sintesi e considerazioni generali	16
3.2 SOSTITUZIONE TOTALE: leganti derivanti da micro-alghe.....	18
3.2.1 Estrazione e risultati.....	20
Sintesi e considerazioni generali	30
3.3 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti lignina	32
3.3.1 Natura e processi di estrazione della lignina.....	34
3.3.2 Casi studio presenti in letteratura.....	38
Sintesi e considerazioni generali	49
3.4 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti bio-oli derivanti da olio di scarto da cucina	51
3.4.1 Lavorazione dei WCO	52
3.4.2 Influenza della qualità del WCO sulle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante	63

3.4.3 Caratterizzazione fisica e reologica dei bio-leganti a base di WCO in condizioni aged e unaged.....	72
Sintesi e considerazioni generali	91
3.5 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino.....	94
3.5.1 Caratterizzazione chimica e reologica.....	96
Sintesi e considerazioni generali	103
4. LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)	105
4.1 LCA: filosofia e struttura generale.....	105
4.1.1 Cenni storici	106
4.1.2 Normativa LCA: ISO 14040 – ISO 14044.....	107
4.1.3 Life Cycle Assessment di una pavimentazione.....	110
4.2 PaLATE: Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects.....	113
4.3 PaLATE: Valutazione degli effetti dovuti alla presenza del bio-legante.....	119
4.3.1 Determinazione della densità dei bio-leganti di riferimento	121
4.4 Life Cycle Inventory (LCI)	123
4.4.1 Life Cycle Inventory: bitume	123
4.4.2 Life Cycle Inventory: bio-olio derivante da letame suino.....	127
4.4.3 Life Cycle Inventory: lignina	129
5. CASI STUDIO.....	135
5.1 Primo caso studio: Viadotto “Torre del Colle” – A32 (Sitalfa S.p.A.).....	136
5.1.1 FASE 1: Design.....	137
5.1.2 FASE 2: Costruzione Iniziale	139
5.1.3 FASE 3: Manutenzione	147

5.1.4 Emissioni di Trasporto.....	151
5.2 Secondo caso studio: Strada extra-urbana italiana (Farina et al., 2014).....	153
5.2.1 FASE 1: Design.....	153
5.2.2 FASE 2: Costruzione Iniziale	156
5.2.3 FASE 3: Manutenzione	163
5.2.4 Emissioni di Trasporto.....	167
5.3 Analisi Scenari Alternativi	169
6. ANALISI DEI RISULTATI	171
6.1 Effetto della tipologia del bio-legante	174
6.1.1 CASO STUDIO: “Viadotto Torre del Colle”	174
6.1.2 CASO STUDIO: “strada extraurbana italiana”	188
6.2 Effetto del tipo di allocazione.....	196
6.2.1 CASO STUDIO: “Viadotto Torre del Colle”	197
6.2.2 CASO STUDIO: “strada extraurbana italiana”	198
6.3 PaLATE: Diagrammi di Output	200
7. CONCLUSIONI.....	203
APPENDICI	207
APPENDICE I: L’estrattore Soxhlet.....	207
APPENDICE II: La liquefazione idrotermale (HTL)	209
APPENDICE III: Risultati caso studio eseguito da Gosselink et al. (2019)	211
APPENDICE IV: La transesterificazione	213
APPENDICE V: Caso Studio: Viadotto “Torre del Colle” (Tisberger Ibañez, 2020)	214
APPENDICE VI: Caso Studio: Strada extra-urbana italiana (Tisberger Ibañez, 2020).	228
BIBLIOGRAFIA	236
SITOGRAFIA	245

INDICE FIGURE.....	246
INDICE TABELLE.....	257
RINGRAZIAMENTI.....	259

1. INTRODUZIONE

Nel corso di questi ultimi decenni, il termine “sostenibilità” sta ricoprendo un ruolo sempre più importante in ambito ingegneristico, ma non solo e la sua definizione può essere sintetizzata come: *“l'utilizzo delle risorse della Terra in modo tale da soddisfare la domanda della generazione attuale senza ostacolare i bisogni delle generazioni future”* (Kuhlman et al., 2010).

Infatti, la crescente domanda di risorse esauribili della Terra, come il petrolio, ha creato uno dei più grandi problemi, dell'età moderna, che l'uomo si trova a dover fronteggiare. Da questo deriva la necessità di ricercare fonti alternative o rinnovabili, che ne garantiscano la salvaguardia e la rigenerazione nel tempo (Md Maniruzzaman et al., 2015). In merito a questo, Smalley (2003), vincitore del premio Nobel nel 1996, aveva elencato i primi dieci problemi che l'umanità avrebbe dovuto prendere seriamente in esame nei 50 anni successivi, dove, "Energia" ed "Ambiente" sarebbero state tra le questioni più urgenti ed importanti da affrontare.

Per il raggiungimento di questi obiettivi, si sta puntando sempre più ad una “bio-economia” (Demirbas et al., 2006), la quale si preoccupa di generare energia, non più da combustibili fossili, bensì da materia organica rinnovabile, essendo questa, efficiente, economica e rispettosa dell'ambiente (Md Maniruzzaman et al., 2015), in modo da limitare l'esaurimento delle fonti energetiche naturali.

Lo sfruttamento massiccio delle risorse naturali non rinnovabili, come il petrolio, avvenuto durante l'ultimo decennio, ha portato a notevoli problematiche ambientali a livello globale (Dalmazzo et al., 2020). In effetti, uno dei sottoprodotti derivanti dalla raffinazione del greggio di petrolio è il bitume, materiale fondamentale nell'ingegneria delle pavimentazioni stradali flessibili. Come noto, questa risorsa naturale è limitata, quindi gli studiosi (Chailleux et al., 2015) hanno compreso che la vera domanda da porsi non è "se" ma "quando" terminerà la sua disponibilità, oltre a: “Esistono alternative al bitume da petrolio?” e “Cosa si conosce delle loro prestazioni?”.

La sostenibilità, quindi, non è l'unico aspetto da prendere in considerazione, ma occorre prestare attenzione anche a quello economico, ambientale e funzionale.

Per quanto riguarda quello economico, si osserva che la riduzione della naturale disponibilità di petrolio porta ad un graduale aumento del prezzo, che unitamente al miglioramento della tecnologia di estrazione, degradante per la qualità del legante estratto, pertanto meno performante, influisce sulla lievitazione del costo finale della pavimentazione, riducendone così, secondo alcuni esperti, la sua vita utile (Santagata et al., 2016; Shih-Hsien et al., 2016).

Dal punto di vista ambientale, invece, va considerato che i combustibili fossili sono la principale fonte di gas serra, responsabili del riscaldamento globale (Shih-Hsien et al., 2016). Va tenuto in considerazione, inoltre, che il bitume può causare gravi danni alla salute dei lavoratori, se riscaldato a 165-200 °C, divenendo tossico ed infiammabile.

Infatti, all'aumentare della temperatura di posa, se da un lato si raggiunge una migliore lavorabilità, dall'altro, si provoca, invece, la generazione di vapori che contengono componenti volatili e gas serra, chimicamente diversi dal materiale di origine, che mescolandosi con l'aria, vengono inalati dai lavoratori (Md Maniruzzaman et al., 2015).

Di conseguenza, vi è la necessità di sviluppare un materiale più sostenibile, proveniente da risorse rinnovabili o alternative, da poter essere utilizzato per la sostituzione, completa o parziale, dell'attuale legante bituminoso, nell'industria autostradale.

Per quanto concerne, infine, la funzionalità, i bio-leganti potrebbero essere utilizzati come componenti principali delle pavimentazioni colorate (Piérard et al., 2015) come "clear binders". Questi, infatti, andrebbero a migliorare, da una parte, la percezione del tracciato stradale da parte dell'utenza, in seguito alla loro pigmentazione in corrispondenza di intersezioni ed incroci, mentre, dall'altra, porterebbero, ad esempio, ad un risparmio energetico all'interno delle gallerie, come studiato da Bocci et al. (2012), riducendo così i costi per l'illuminazione e migliorando la percezione dell'illuminazione stradale.

Oramai in qualsiasi progetto, la componente ambientale e/o di sostenibilità riveste uno dei criteri fondamentali di scelta, indagabile, per esempio, attraverso un'analisi della Valutazione del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA), processo oggettivo, che valuta le interazioni presenti tra un prodotto e l'ambiente, considerando il suo intero ciclo di vita (Biondani 2014). Il LCA sta assumendo sempre più importanza in tutti quei campi, ingegneria civile inclusa, dove è richiesta una valutazione di sostenibilità del progetto, permettendo di valutare, così, i potenziali impatti già in fase di concezione e progettazione.

Questo lavoro di tesi, si pone come obiettivo principale quello di indagare gli effetti derivanti dall'aggiunta di diversi bio-leganti alla miscela, in differenti percentuali di sostituzione, in modo da poterne valutare eventuali vantaggi o svantaggi, in termini di impatti ambientali, tramite il tool PaLATE. Tra questi, si è posta particolare attenzione all'emissione di anidride carbonica e all'energia dell'intero sistema, eseguendo un'analisi di tipo *cradle-to-grave*. Infine, eseguendo un'analisi LCA, si è cercato di comprendere come la tipologia di allocazione, unitamente alla frequenza nelle attività di manutenzione, possano influire sugli impatti ambientali.

1.1 Struttura della tesi

La tesi è strutturata in sette capitoli.

Nel **Capitolo 2**, relativo alle definizioni generali utilizzate nel campo dei bio-leganti, verrà fornita una definizione di bio-legante e saranno presentate alcune terminologie, ricorrenti all'interno dell'intero lavoro di tesi, utili per la comprensione dell'argomento trattato.

Nel **Capitolo 3**, verrà effettuata la presentazione dei principali bio-leganti studiati e presenti in letteratura, quali:

- leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno (Paragrafo 3.1);
- leganti derivanti da microalghe (Paragrafo 3.2);
- leganti contenenti lignina (Paragrafo 3.3);
- leganti contenenti bio-oli derivanti da olio di scarto di cucina (Paragrafo 3.4);
- leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino (Paragrafo 3.5).

Per ciascuno di questi, sono state effettuate ricerche concernenti le procedure di lavorazione e pretrattamento, oltre allo studio delle caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e reologiche.

Nel **Capitolo 4**, verrà riportata un'introduzione generale riguardante la procedura di Life Cycle Assessment, ponendo attenzione alla sua filosofia e struttura generale, fornendo alcuni cenni storici e indicazioni sulla normativa vigente (Paragrafo 4.1). In seguito, si è presentato il tool excel, utilizzato in questo lavoro di tesi, PaLATE (Paragrafo 4.2), indicando, poi, le modalità di inserimento dei bio-leganti nello stesso oltre al loro Life Cycle Inventory (Paragrafi 4.3 e 4.4).

Nel **Capitolo 5**, vengono riportati i due casi studio analizzati (Paragrafi 5.1 e 5.2), nei quali si riportano i calcoli, riferiti ad un particolare scenario studiato, eseguendo step by step le fasi richieste, per inserire, poi, i dati all'interno del tool, con relativi screen illustrativi.

Nel **Capitolo 6**, verrà eseguita l'analisi dei risultati ottenuti, considerando i differenti scenari studiati, tramite il tool PaLATE, focalizzandosi, in particolare, sull'effetto che la tipologia del bio-legante e di allocazione, abbia sui risultati finali.

Il **Capitolo 7**, infine, sarà dedicato alle considerazioni conclusive relative ai risultati ottenuti, sia dalle analisi che dall'eventuale raggiungimento degli obiettivi prefissati, lasciando, comunque, spazio a possibili sviluppi futuri.

2. BIO-LEGANTI: DEFINIZIONE E TERMINOLOGIA

Attualmente, per la costruzione delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali è utilizzato circa il 90 % di bitume, la maggior parte del quale è derivato principalmente da combustibile fossile (Shih-Hsien et al., 2016).

Negli ultimi due decenni, vari gruppi di ricercatori hanno lavorato alla formulazione di leganti non a base di petrolio, noti anche come bio-leganti, o bio-bitumi (in inglese detti bio-binders), concepiti come potenziali alternative al bitume propriamente detto, in quanto estratti da biomassa, o prodotti di rifiuti organici, risorse onnipresenti e bio-rinnovabili (Mohab et al., 2019).

Una definizione generale che si trova in letteratura è la seguente (Riverra Armenta et al., 2018):

“Bio-binder is an eco-friendly and alternative asphalt binder obtained from non-petroleum-based renewable resources, which should not rival with any food material”

Dal punto di vista storico, però, occorre puntualizzare che, nonostante i bio-leganti siano stati brevettati per la prima volta da Pinomaa (1991) nel 1991, un momento storico, forse, poco attento alle problematiche ambientali, soltanto con l'attuale sensibilità nei confronti di queste e, con la comparsa dei leganti colorati, si potrebbe pensare, quindi, ad un loro sviluppo nel prossimo futuro. In generale, secondo Aierey et al. (2008), esistono tre modalità di utilizzo, in cui il legante alternativo potrebbe ridurre l'uso del bitume:

- modificatore di bitume (se la sostituzione del bitume è inferiore al 10 %);
- estensore di bitume (se la sostituzione del bitume è compresa tra il 10 ed il 75 %);
- legante alternativo (se la sostituzione del bitume è pari al 100 %);

Come evidenziato da Chailleux et al. (2015), la maggior parte dei bio-leganti sviluppati nel corso del tempo, per la sostituzione completa, è costituita dalla combinazione di una componente ad alto peso molecolare come una resina, naturale o modificata, un olio viscoso, naturale o vegetale, ed eventualmente un polimero sintetico, al fine di regolarne le proprietà reologiche.

Tuttavia, la presenza di olio commestibile nella composizione di questi leganti alternativi, rappresenta un grosso limite dal punto di vista dell'accettabilità sociale e sarebbe, pertanto, idoneo studiarne altri, basati su colture non alimentari (Audo et al., 2014).

Infatti, in risposta a questo, l'ultimo decennio ha visto sempre più un crescente interesse scientifico verso l'estrazione di lipidi da microalghe per la produzione di bio-leganti, non essendo questi in competizione con l'alimentazione umana, in quanto coltivabili su terreni non erbosi (Chailleux et al., 2015).

Per quanto riguarda, invece, la sostituzione parziale del bitume si sono studiate varie alternative, come: la lignina, i bio-oli derivanti dagli scarti di olio da cucina oppure il bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino.

Inoltre, per l'utilizzo dei bio-leganti in sostituzione del bitume, occorre, comunque valutarne le caratteristiche fisiche e di invecchiamento, oltre alle proprietà reologiche che devono essere, necessariamente, confrontate con quelle di un legante convenzionale (Shih-Hsien et al., 2016).

In particolare, questi nuovi leganti devono possedere delle proprietà affini a quelle del bitume, ovvero: diventare liquidi sopra i 100 °C, possedere la capacità di rivestire gli aggregati, essere visco-elastici tra i - 20 °C e i + 60 °C, assicurare la coesione della struttura granulare ed infine, sostenere carichi meccanici (Audo et al. 2014).

Anche se i bio-bitumi sembrano essere dei materiali promettenti, sono comunque necessarie ulteriori sperimentazioni e approfondimenti, al fine di renderli idonei alla sostituzione del bitume, su scala industriale, ed essere così, una fonte sostenibile per la costruzione delle pavimentazioni stradali del futuro (Md Maniruzzaman et al., 2015).

3. BIO-LEGANTI: STATO DELL'ARTE

Negli ultimi decenni, diversi ricercatori hanno lavorato alla formulazione di leganti non a base di petrolio, concepiti come potenziali alternative al bitume, in quanto estratti da biomassa o da prodotti di rifiuti organici, risorse onnipresenti e bio-rinnovabili (Mohab et al., 2019).

Sebbene l'applicazione più interessante dei bio-leganti sia la sostituzione completa del bitume, vari studi hanno affrontato strategie di utilizzo alternative, introducendo il concetto di sostituzione parziale, mirando, così, alla riduzione della domanda di bitume, andando verso leganti sempre meno dipendenti da questo (Dalmazzo et al., 2020).

Nella prima parte di questo lavoro verranno presi in considerazione alcuni esempi di sostituzione completa e parziale, cercando di riportare di seguito una panoramica, quanto più esaustiva, degli studi fino ad ora pubblicati e presenti in letteratura.

SOSTITUZIONE TOTALE

- Leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno (resina naturale o modificata);
- Leganti derivanti da micro-alghe.

SOSTITUZIONE PARZIALE

- Leganti contenenti lignina;
- Leganti contenenti bio-oli derivanti da olio di scarto da cucina;
- Leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino.

Per ogni bio-legante verranno elencati pregi e difetti, in merito alla reperibilità delle materie prime, alla lavorazione e alla reale fattibilità di uno sviluppo futuro. Questa prima dello stato dell'arte riveste un ruolo fondamentale al fine di comprenderne il comportamento chimico-fisico-meccanico e reologico dei "nuovi" materiali.

3.1 SOSTITUZIONE TOTALE: leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno

La prima categoria di bio-leganti che si analizzerà, in questo lavoro di tesi, è quella costituita dai leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno, essendo stata la prima ad essere studiata, agli inizi degli anni '90. Le esperienze sul campo, eseguite soprattutto in Francia, dimostrano come sia possibile sostituire, totalmente, il bitume convenzionale, con un materiale composto da un olio vegetale e da un coprodotto dell'industria del legno. Infatti, un gruppo di ricercatori francesi, nel lavoro *“Advances in the development of alternative binders from biomass for the production of biosourced road binders”* (Chailleux et al., 2015), hanno eseguito una panoramica sui vari bio-leganti presenti in letteratura, testando molti di questi, prestando particolare attenzione a quelli a base di oli vegetali e derivanti dalla lavorazione di micro-alghe.

Il primo brevetto in cui si parla di oli vegetali, è stato pubblicato nel 1991 (Pinomaa, 1991) dove, un sottoprodotto dell'industria cartaria è stato miscelato con un olio vegetale, un polimero ed un pigmento inorganico. È interessante notare, però, come questo, non fosse volto alla ricerca di un legante rispettoso dell'ambiente, bensì al solo fine di essere pigmentabile, essendo di base trasparente. Circa dieci anni dopo, alcune compagnie francesi, hanno, poi, studiato, brevettato e messo sul mercato i loro bio-leganti, rifacendosi, sempre, al primo brevetto di Pinomaa (1991).

In generale, tutti i brevetti, si basano sullo stesso principio esposto nel primo del 1991, andando a definire un “bio-leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno”, come: un legante costituito da una combinazione di una componente ad alto peso molecolare come una resina naturale o modificata, un olio viscoso naturale o vegetale ed eventualmente un polimero sintetico, al fine di regolarne le proprietà reologiche (Chailleux et al., 2015). È importante sottolineare che, durante la lavorazione di questi bio-leganti, non si dà luogo ad alcuna reazione chimica, ottenendo solamente un'interazione fisica tra le varie fasi, miscelando a temperature superiori al punto di fusione, ottenendo, così, a temperatura ambiente, una sospensione di particelle (resine) in una matrice viscosa (oli).

Per una migliore comprensione, di seguito, si mostrano una sequenza di immagini che indicano come si possa passare da una resina e un olio vegetale ad un bio-legante.

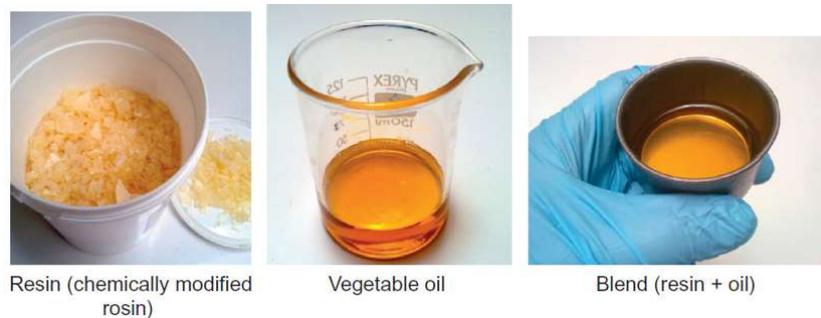


Figura 1 Produzione di un bio-legante con miscelazione ad alta temperatura di resina e olio (Chailleux et al., 2015).

Come prima accennato, dopo il brevetto del 1991 (Pinomaa, 1991), alcune compagnie francesi, dal 2004 al 2010, hanno iniziato a realizzare le prime pavimentazioni a base di bio-bitumi e di seguito, se ne riporta una breve descrizione:

Commercial name	Company	Resin	Oil	Polymer	Additives	Reference
–	–	Tall oil resin, from wood or terebenthine	Mineral vegetable oil, or tall oil 15–20%	PP ^a , PE ^b , PA ^c , SB ^d 2–15%	Inorganic pigments (TiO ₂ , Cr ₂ O ₃)	Pinomaa (1991)
Vegecol [®]	Colas	Natural or modified rosins ^e (modification by esterification or maleinization) 40–70%	Linseed, ricin, or wood oil. Nonmodified or from distillation or chemically modified 40–70%	–	Co, Zr, and Mn salt	Colas (2004a)
Biophalt [®]	Eiffage	Natural or modified rosins, terpenes—(solid or modified) 1–10%	Tall oil pitch	1–20%	Wax 1–40% Fibers—additives 2–10% Flux 2–25% Sicatif Co, Va, Ca, or Mn salt 2–30%	Eiffage (2007)
Floraphalte [®]	Shell	Rosin ester 20–90%	Colza, palm oil, or tall oil 10–80%	Functionalized EVA ^f by silanes 1–10%	–	Shell (2010)
Séquoia [®]	Eurovia	Natural or modified rosins, terpenes 40–60%	Polyester carried or by polycondensation of rapeseed, sunflower, soybean, palm oil, or tall oil with polyacids and polyols 40–60%	SB, EVA 5–10%	UV-protecting agent Structuring and reinforcing agents Rheology modifier agent Ti, Zn, or Fe salts	Eurovia (2010)

^aPolypropylene.

^bPolyethylene.

^cPolyamide.

^dStyrene-butadiene.

^eResidue from the distillation of turpentine, coming from coniferous trees.

^fEthylene-vinyl acetate.

Figura 2 Composizione di alcuni bio-leganti industriali (le percentuali sono indicate per il peso totale di legante) (Chailleux et al., 2015).

Come si evince dalla tabella appena mostrata, fanno parte della famiglia delle “resine”: la resina di tall oil¹ (*tall oil resin*) estratta, per esempio dalle trementine², la colofonia³ (*rosin*) naturale o modificata, esteri di colofonia (*rosin ester*) e terpeni⁴ (*terpenes*) mentre appartengono a quella degli “oli”: l’olio di lino (*linseed oil*), la pece di tall oil (*tall oil pitch*), olio di colza (*rapeseed oil*), olio di palma (*palm oil*).

Infine, nella medesima tabella, sono presenti altre due colonne, nelle quali vengono elencati eventuali materiali, polimeri e additivi, addizionabili alla miscela base “resina + olio”, in modo da migliorare determinate caratteristiche di comportamento del materiale finale. I principali polimeri, utilizzati in questi bio-leganti, sono: polipropilene (PP), polietilene (PE), poliammide (PA), stirene-butadiene (SB) e l’etilene-vinil acetato (EVA), mentre alcuni degli additivi possono essere: pigmenti inorganici, cere (*waxes*), fibre (*fibers*), agenti rinforzanti, modificatori della reologia o protettori nei confronti delle radiazioni UV (Chailleux et al., 2015).

Volendo ricercare, in questi bio-leganti quello che rispetta, in tutto, la filosofia del “bio”, ovvero la totale non dipendenza dal petrolio, la scelta dovrebbe ricadere su Vegecol, bio-legante sviluppato da Colas, non presentando alcuna percentuale di polimeri che, come ben noto, possono essere, sempre, riconducibili a lavorazioni petrolio-dipendenti, potendo essere considerato, quindi, “bio” al 100 %.

Detto questo, però, uno dei vantaggi comuni a tutti questi bio-leganti, risiede nel loro processo di fabbricazione, inteso come processo di messa in opera, che risulta essere simile a quello dei leganti bituminosi standard, ma con un notevole abbassamento della temperatura di posa (anche fino a 40-50 °C), senza alcuna riduzione della lavorabilità, portando, così, un guadagno sia dal punto di vista energetico che da quello ambientale.

¹ Il tall oil è un liquido viscoso, di colore variabile dal giallo al bruno-nero, ottenuto come sottoprodotto del processo Kraft per la lavorazione della polpa di legno delle conifere. Il tall oil contiene acidi resinici e acidi grassi.

² La trementina (o terebentina), è una resina vegetale oleosa, fluida, chiara e volatile, che si ricava dall’incisione della corteccia di alcune piante.

³ La colofonia è una resina gialla, solida, trasparente ed è il residuo derivante della distillazione della trementina.

⁴ I terpeni sono prodotti da molte piante e sono i componenti principali delle resine e degli oli essenziali delle stesse.

Se queste caratteristiche possono essere considerate un loro principale vantaggio, il prezzo, invece, ad oggi, non risulta essere tale (Chailleux et al., 2015). Infatti, il costo dei leganti vegetali è superiore, in alcuni casi anche di quattro volte, rispetto ad uno convenzionale. Però, se il costo del petrolio dovesse aumentare sempre più, i bio-leganti potrebbero diventare economicamente più competitivi, anche se questi, avrebbero, purtroppo, lo svantaggio di risultare in competizione con le colture adibite alla produzione di cibo umano. Da un punto di vista sociale, infatti, non si ritiene accettabile l'utilizzo di terreni per estrarre oli di origine vegetale, da destinare all'industria dei bio-leganti, considerando che, essendo, la popolazione mondiale in continua crescita, i terreni coltivabili potrebbero, addirittura, non essere sufficienti per soddisfare il solo fabbisogno umano. Per questi motivi, gli esperimenti eseguiti in vera grandezza, sono stati svolti su piccole porzioni di terreno come: piste ciclabili, aree pedonali, aree ricreative ed impianti sportivi, prima di poterli estendere a tronchi stradali.

3.1.1 Proprietà fisiche e reologiche

La consistenza/struttura di questi bio-leganti è regolata, principalmente, attraverso il rapporto resina/olio e, se questo non dovesse bastare, si possono utilizzare dei polimeri. Nella seguente tabella, viene confrontato un bitume standard (50/70) con tre miscele di bio-leganti: due eseguite con Vegecol (una con un rapporto resina/olio (%) pari a 75/25 ed una 82/18) ed una con Floraphalte, al fine di confrontare alcune caratteristiche, come: la temperatura di transizione vetrosa, la temperatura di Palla & Anello ($T_{P\&A}$) e la penetrazione.

Material	Resin/ oil (%)	Glass transition temperature (°C)	Ring-and-ball temperature (°C)	Penetrability
Binder 1 (Vegecol [®])	75/25	-3	46.9	58
Binder 2 (Vegecol [®])	82/18	-2	47.8	56
Binder 3 (Floraphalte [®])	-	-	89	45
Bitumen 50-70	-	6	50.7	52

Figura 3 Proprietà di un bitume 50/70 e di tre bio-leganti in commercio (Trigallez et al., 2009; Lecomte et al., 2009).

Le prime due miscele Vegecol (75/25 e 82/18), mostrano risultati simili al bitume 50/70 per quanto riguarda i valori della $T_{P\&A}$ e la penetrazione, mentre la miscela a base di Floraphalte risulta essere più simile ad un bitume 70/100 che ad uno 50/70.



Figura 4 Confronto visivo tra un campione di bitume ed un bio-legante Vegecol⁵.



Figura 5 Confronto visivo tra un campione di bitume ed un bio-legante Floraphalte (Lecomte et al.,2009).

Come già detto, se da un lato si ottiene il vantaggio della diminuzione della temperatura di posa, dall'altro, i bio-leganti di origine vegetale, sono molto suscettibili alla polimerizzazione, processo chimico che porta all'indurimento del materiale all'aumentare della temperatura. Infatti, il contenuto di ossigeno all'interno del legante, estratto da biomassa, risulta elevato, se confrontato con un bitume convenzionale, avendo così, una più facile ossidazione, che porta ad una perdita di proprietà viscosi, ottenendo, quindi, un materiale più fragile.

⁵ <http://www.bitumequebec.ca/wp-content/uploads/2015/06/vegecol-.pdf>

Al fine di evitare questo inconveniente, bisognerebbe cercare di diminuire la percentuale di ossigeno presente nella biomassa, oppure utilizzare degli additivi, in grado di inibire i meccanismi di ossidazione e di polimerizzazione.

Lo studio (Chailleux et al., 2015) riporta, come esempio, una sperimentazione eseguita sul legante Floraphalte (Lecomte et al., 2009), dove è stato testato il materiale e le sue caratteristiche di penetrazione e temperatura di rammollimento, in seguito ad un invecchiamento a breve termine, tramite il *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT).

Temperature (°C)	Exposure time (h)	Penetrability (1/10 mm)	Softening temperature (°C)
130	0	88	46.2
	2	52	49.6
	4	43	51.4
170	0	95	45.4
	2	23	53.8
	4	9	58
Initial binder (before mixing)		79	48.2

Figura 6 Floraphalte: evoluzione della penetrazione e della temperatura di rammollimento, in funzione del tempo di esposizione in forno (Lecomte et al., 2009).

Il tempo di esposizione è stato fissato a quattro ore, durante il quale sono stati valutati, però, anche valori corrispondenti a step intermedi, mentre, le temperature analizzate sono rientrate in un range, tra i 130 ed i 160 °C, entro il quale il materiale ha mantenuto una buona resistenza nei confronti dell'ossidazione. A 170 °C, invece, il bio-legante si è indurito rapidamente, a causa di probabili processi di ossidazione e polimerizzazione.

Se si osservano i valori di penetrazione, al termine dell'analisi, si nota che questi diminuiscono drasticamente, passando da 95 a 9 dmm, valore pari a circa al 10 % di quello iniziale. Si può, quindi, dedurre che fino ai 130 °C, le caratteristiche non sono direttamente dipendenti dal tempo e quindi dall'invecchiamento e per questo, gli autori sono giunti alla conclusione che, durante la fase di stesa in opera, il legante non dovrà mai superare i 160 °C.

L'indurimento del legante, a temperatura ambiente, comporta anche una forte influenza sull'evoluzione della norma del modulo complesso, rischiando il verificarsi di un aumento eccessivo della rigidità nel tempo, rispetto ai valori di quello standard.

	Vegecol® type (Trigallez et al., 2009)	Biophalt® type 1 (Pouget and Loup, 2013)	Biophalt® type 2 (Pouget and Loup, 2013)
$ E^* $ (15 °C, 10 Hz)	1 month: 5100 MPa 9 months: 5600 MPa	0 months: 4300 MPa 6 months: 10,100 MPa 12 months: 12,900 MPa	0 months: 1800 MPa 6 months: 6400 MPa 12 months: 10,700 MPa
Stress at break at -10 °C (in tension)	–	0 months: 5.00 MPa 6 months: 4.00 MPa 12 months: 3.73 MPa	0 months: 2.84 MPa 6 months: 3.78 MPa 12 months: 4.40 MPa
Temperature at break (in Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST))	–	0 months: -29.5 °C 6 months: -27.9 °C 12 months: -23.6 °C	0 months: -29.0 °C 6 months: -25.4 °C 12 months: -25.7 °C
Fatigue performance (ϵ_6)	1 month: 129 μ strain 9 months: 161 μ strain		

Figura 7 Evoluzione nel tempo di proprietà meccaniche e reologiche di tre bio-leganti (Chailleux et al., 2015).

Nella tabella soprariportata, sono state analizzate: una miscela Vegecol e due Biophalt, valutandone l'evoluzione della norma del modulo complesso assiale, $|E^*|$, dopo sei, nove o dodici mesi, osservando un sensibile aumento di $|E^*|$, dovuto, forse, a fenomeni di polimerizzazione, come spiegato precedentemente. Per quanto riguarda, le temperature a rottura, si osservano valori confrontabili con i bitumi convenzionali.

Quanto appena detto, si riferisce a sperimentazioni condotte in laboratorio, anche se ne sono state realizzate altre in campi prova in vera grandezza, a partire dagli anni 2000, durante i quali sono stati raccolti molti dati.

In alcuni casi, però, si sono verificati significativi problemi di invecchiamento, dopo solo 4-7 anni di vita utile, con conseguente formazione di fessure longitudinali e trasversali (*alligator cracking*).

Per comprendere le eventuali cause, sono stati eseguiti, in seguito, dei carotaggi, sottoposti a prove di trazione indiretta, durante le quali sono stati riscontrati valori di moduli elevati, fino a 14000 MPa, simili, invece, a miscele di conglomerato bituminoso ad alte prestazioni, con un comportamento reologico, fortemente diverso.

Quanto sopra, si traduce in una perdita di capacità di rilassamento, ottenendo, così, un materiale fragile alle temperature di esercizio, inaccettabile, per noi, sia da un punto di vista progettuale che di servizio.

Sono state raccolte, infine, le schede tecniche di ciascuno dei bio-leganti sviluppati in Francia, tra il 2004 ed il 2010, e sono state riportate nella tabella seguente, alcune informazioni utili, ai fini di comprendere e confrontare le proprietà dei diversi leganti vegetali a base di oli e coprodotti del legno, come:

- la penetrazione a 25 °C (PEN);
- la temperatura di Palla & Anello ($T_{P\&A}$), la densità a 25 °C;
- la temperatura di pompaggio (T_{pomp});
- la temperatura di infiammabilità (T_{infiam});
- il valore della norma del modulo complesso $|G^*|$, valutato a 20 °C e 7.8 Hz.

Tabella 1 Caratteristiche di alcuni bio-leganti commerciali.

Bio-legante	PEN (25°C) [dmm]	$T_{P\&A}$ [°C]	Densità (25°C) [g/cm ³]	T_{pomp} . [°C]	T_{infiam} . [°C]	$ G^* $ (20°C; 7.8 Hz) [MPa]
<i>Vegecol</i> ⁶	160/220	N.F.	0.98 – 1.08	> 90	> 210	> 1.0
<i>Floraphalte</i> ⁷	100/150	> 39	0.99	N.F.	> 250	N.F.
<i>Séquoia</i> ⁸	110/140	> 40	0.94 – 1.0	> 110	> 210	> 2.0

“N.F.”: valore non fornito sulle schede tecniche della casa produttrice.

⁶ https://www.colas.com/sites/default/files/produits/noticetechniquevegecol_bd_0.pdf

⁷ <https://www.yumpu.com/en/document/view/39228642/shell-bitumen-shell-floraphalte-data-sheet>

⁸ https://www.eurovia.com/media/165277/sequoia_liantvegetal_rv_gb_bd.pdf

Sintesi e considerazioni generali

In questo primo paragrafo si sono riportati alcuni studi relativi ai cosiddetti “bio-leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno”, combinazione di una resina, un olio viscoso e, eventualmente, un polimero sintetico.

Uno dei vantaggi comuni a questi bio-leganti, è il loro processo di fabbricazione, simile a quello dei leganti bituminosi, ma con un notevole abbassamento della temperatura di posa, senza alcuna riduzione della lavorabilità, portando ad un guadagno sia energetico che ambientale.

In particolare, Lecomte et al. (2009) e Trigallez et al. (2009) hanno confrontato alcune proprietà dei bio-leganti, Vegecol e Floraphalte, con quelle di un legante di riferimento (50/70), regolando il rapporto resina/olio. Per quanto riguarda la penetrazione e la temperatura di rammollimento si osservano valori simili rispetto a quello di riferimento, per il legante Vegecol, mentre per il Floraphalte, gli stessi risultano essere più vicini a quelli di un 70/100.

I bio-leganti di origine vegetale, sono però, più suscettibili alla polimerizzazione, ottenendo, così, un materiale più fragile. Lecomte et al. (2009), in merito a questo, hanno eseguito una sperimentazione sul legante Floraphalte, testandone le caratteristiche di penetrazione, tramite invecchiamento a breve termine (RTFOT). Tra i 130 ed i 160 °C, si è notato che il materiale ha mantenuto una buona resistenza nei confronti dell'ossidazione mentre a 170 °C, questo induriva rapidamente portando ad un peggioramento delle proprietà. Questo è stato confermato anche da Chailleux et al. (2015) che hanno osservato incrementi nei valori di $|E^*|$, nei campioni sottoposti ad invecchiamento. Si è passati, per esempio, da 5100 MPa, dopo un mese, a 5600 MPa, dopo nove mesi, per Vegecol, mentre per Biophalt si è osservato un incremento, in solo un anno, di circa 9000 MPa.

Il medesimo comportamento “irrigidente” si è notato anche con l’aumento della temperatura di fessurazione (thermal craking) di 4-5 gradi centigradi. Tutto questo è stato osservato in alcuni campi prova, nei quali si sono verificati problemi di invecchiamento, dopo soli 4-7 anni di vita utile, durata molto inferiore rispetto ad una pavimentazione eseguita con legante convenzionale, portando alla formazione di fessure longitudinali e trasversali.

In generale, questi bio-leganti se da un lato presentano vantaggi ambientali, dall’altro, invece, occorre, sempre, considerarne le prestazioni. Come si è evinto dalle varie sperimentazioni, infatti, questi bio-leganti presentano alcuni problemi di invecchiamento “precoce” (polimerizzazione), portando ad un eccessivo aumento del modulo di rigidezza e alla scarsa resistenza nei confronti della fatica, osservando la comparsa di fessure nella pavimentazione, anche dopo poco tempo dalla messa in opera.

Come già detto, questo porta ad una vita utile della stessa, minore rispetto a quelle convenzionali e questo si traduce, in maniera pratica, in un aumento delle opere di manutenzione, con conseguenti aumenti di costi e dei relativi impatti ambientali. Si dovranno, per esempio, prevedere un numero maggiore di interventi di manutenzione e, quindi, trattamenti superficiali come: rappezzatura (patching), sigillatura delle fessure (crack sealing) o anche fresatura totale dello strato (Full Depth Reclamation - FDR).

3.2 SOSTITUZIONE TOTALE: leganti derivanti da micro-alghe

Storicamente, i leganti a base di oli vegetali (semi di lino, colza) e coprodotti del legno sono stati quelli maggiormente studiati, anche da aziende come Colas e Shell, considerate pioniere nello sviluppo di questi bio-prodotti. Tuttavia, sarebbe vantaggioso trovare un nuovo legante, basato su colture non alimentari, in modo tale da non competere con l'alimentazione dell'uomo. In merito a questo, nell'ultimo decennio, alcuni gruppi di ricercatori hanno concentrato il loro lavoro sull'estrazione di lipidi da micro-alghe, per la creazione di un bio-legante ad uso stradale, in grado di sostituire quelli a base di bitume. Di seguito, per avere una panoramica dettagliata dell'argomento, si farà riferimento ad alcuni articoli presenti in letteratura (Audo et al., 2013; Audo et al., 2014; Chailleux et al., 2012; Chailleux et al., 2015). In questo momento, le microalghe sono una delle alternative più promettenti, possedendo i principali vantaggi rispetto alle piante terrestri, come: elevata produzione di biomassa, alto tasso di crescita, elevata resa fotosintetica, alto contenuto di lipidi (fino all'80 % in peso, in determinate condizioni di stress e per alcune specie particolari) e nessuna competizione con l'alimentazione umana, utilizzando differenti metodi di coltivazione e non terreno-dipendenti.

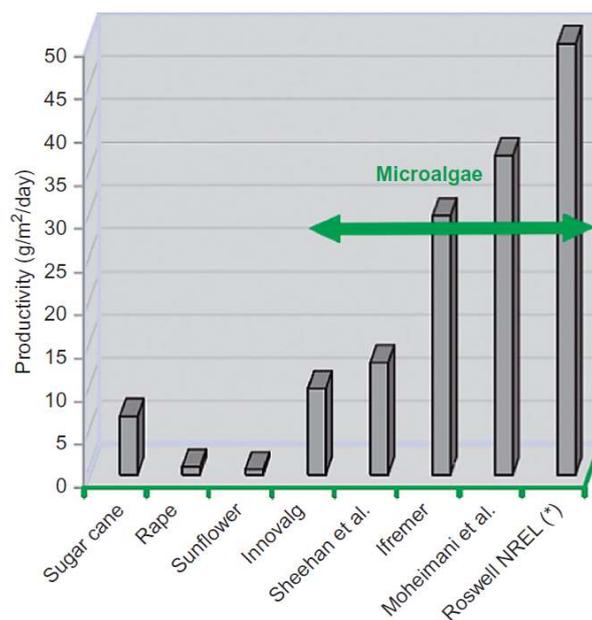


Figura 8 Produttività di olio da diverse biomasse (Chailleux et al., 2015).

Essendo il bitume un coprodotto dell'industria petrolifera, sarebbe interessante poter utilizzare i sottoprodotti dell'industria algale, in modo da produrre, così, un legante alternativo, per non compromettere gli usi più nobili della biomassa stessa.

Al fine di raggiungere, quindi, l'obiettivo di "algo raffineria", devono essere valorizzati tutti i sottoprodotti derivanti dalla coltivazione delle micro-alghe, sia per ragioni ecologiche che economiche, come messo in atto oggi per il petrolio, essendo questo, alla base del progetto "Algoroute", sviluppato in Francia.

Il progetto "Algoroute" è incluso nel programma di ricerca IFSTTAR (*French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks*) "Post Oil Pavement", dedicato alla ricerca di leganti alternativi per pavimentazioni stradali, cofinanziato dalla regione "Pays de la Loire", oltre ad essere una partnership tra laboratori accademici, come l'Università di Nantes (CEISAM, GEPEA) e aziende, quali l'Algosource Technologies e l'Alpha Biotech.

Una delle priorità di questo progetto, consiste nello studiare la composizione chimica di questi sottoprodotti, per comprenderne, poi, le proprietà reologiche, al fine di poterle confrontare con quelle di un bitume convenzionale. In laboratorio, i coprodotti algali, sono stati testati ottenendo risultati promettenti, ma adesso, il passo successivo sarà quello di testarli in campi prova in vera grandezza. Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda anche lo studio delle fasi di estrazione e trasformazione dei sottoprodotti algali, mediante Estrattore Soxhlet (vedere *Appendice I*) oppure attraverso Liquefazione Idrotermale (HTL) (vedere *Appendice II*), dovendo studiare processi a basso consumo energetico, rispettosi dell'ambiente.

3.2.1 Estrazione e risultati

Inizialmente, l'estrazione dei lipidi da micro-alghe, avveniva utilizzando l'Estrattore Soxhlet, attraverso una specifica procedura di laboratorio, mentre, ultimamente, sta destando sempre più curiosità, l'utilizzo della Liquefazione Idrotermale (HTL) che, invece, prima, veniva utilizzata per lo più per la produzione di bio-carburanti.

Di seguito verranno presentate due sperimentazioni (Audo et al., 2014; Chailleux et al., 2012), in cui si evidenziano le modalità di esecuzione ed i risultati ottenuti, attraverso l'utilizzo di entrambe le tecniche. In ambedue gli studi, i residui di micro-alghe presi in considerazione, derivano dalla micro-alga *Scenedesmus sp.*, anche se l'obiettivo finale della sperimentazione punta all'analisi di diverse tipologie di queste, al fine di giungere, poi, ad una trattazione più generale possibile.

SPERIMENTAZIONE CON ESTRATTORE SOXHLET

La maggior parte delle proteine solubili in acqua, presenti nelle micro-alghe, sono state rimosse per centrifugazione ed i residui, contenenti circa l'80 % di acqua, sono stati congelati ed in seguito liofilizzati per una settimana a - 90 °C. In seguito, si è proceduto all'estrazione dei lipidi dalla biomassa algale utilizzando un estrattore Soxhlet, per una durata complessiva di 24 ore. Dopodiché, i residui delle micro-alghe liofilizzate (4-10 g) sono stati posti all'interno del ditale di estrazione, procedendo, poi, all'inserimento del solvente (90 ml), costituito da una miscela di cloroformio (CHCl₃) e metanolo (CH₃OH) (2:1, v/v).

Una volta terminato il processo di estrazione ed ottenuto così un residuo, si è proceduto alla sonicazione⁹ dello stesso in tetracloruro di carbonio (CCl₄), ottenendo la separazione di una frazione solida insolubile in CCl₄, isolata, poi, per filtrazione.

⁹ La sonicazione permette di velocizzare la dissoluzione dei soluti in determinati solventi attraverso onde acustiche.

In particolare, la frazione lipidica isolata di *Scenedesmus sp.* è costituita da un polimero di acidi grassi (algaenans¹⁰), sospeso in un olio di acidi grassi liberi¹¹ (principalmente costituiti da acido palmitico, stearico, oleico, linoleico e linolenico). In seguito all'evaporazione dei solventi, è stata ottenuta una pasta nera, altamente viscosa, con un rendimento del 24 ± 2 % in peso, sulla base della biomassa secca.

Dopodiché, siccome parte della pasta risultante non si è risolubilizzata in cloroformio, la frazione insolubile è stata isolata per filtrazione e, in seguito, essiccata, rappresentando circa il 23 % in peso del bio-olio estratto (cioè il 5.5 % in peso della biomassa iniziale), il che significa un contenuto di lipidi pari al 18.5 % in peso, rispetto alla biomassa iniziale secca.



Figura 9 Estratto di Soxhlet da microalghe (Chailleux et al., 2012).

Successivamente, al fine di comprendere meglio l'influenza di ogni componente, sulle proprietà fisiche delle miscele (ad esempio, gli acidi grassi liberi e l'algaenans), si è eseguita un'analisi reologica, variando la percentuale di alghe (0 %, 20 % e 35 %).

Un sistema semplice per visualizzare le differenze tra tutti i campioni è quello di riportare le curve ottenute sul Piano di Black, in cui si rappresenta sull'asse delle ordinate l'angolo di fase, mentre su quello delle ascisse viene riportato il valore della norma del modulo complesso:

¹⁰ L'algaenan è il biopolimero resistente nelle pareti cellulari, dei gruppi non collegati, delle alghe verdi.

¹¹ Vengono definiti acidi grassi liberi (FFA – Free Fatty Acids), gli acidi grassi, quando si trovano nella loro forma libera, cioè non legati ad altre specie chimiche.

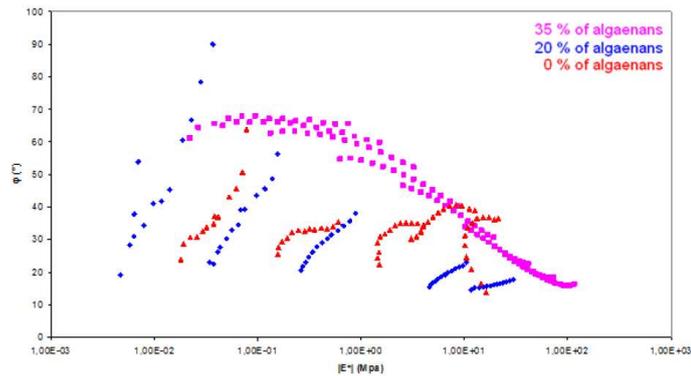


Figura 10 Piano di Black: evoluzione in funzione del contenuto di alghe (Chailleux et al., 2012).

Il campione, composto unicamente da acidi grassi liberi (0 % algaenans), mostra una discontinuità tra tutte le isoterme, indicando una riorganizzazione molecolare, ovvero una fusione degli acidi grassi liberi. Un aumento dallo 0 % al 20 % di alghe mostra una migliore disposizione delle isoterme, anche se, ancora discontinue. Infine, si evidenzia un comportamento totalmente differente, prendendo, invece, in considerazione il 35 %, potendo, così, osservare una continuità tra le isoterme, mostrando, una stabilità termo-reologica del materiale, come per il bitume. I risultati suggeriscono, quindi, come sia possibile regolare le proprietà reologiche del bio-legante, modificando il rapporto algaenans/acidi grassi liberi. In merito a questo, si è valutata la norma del modulo complesso, misurato ad 1 Hz, confrontandolo con due bitumi convenzionali, un 50/70 ed un 70/100. Come si può osservare dal grafico sotto riportato, nell'intervallo di temperatura testato (0-80 °C), le micro-alghe mostrano una termo-sensibilità simile a quella dei bitumi.

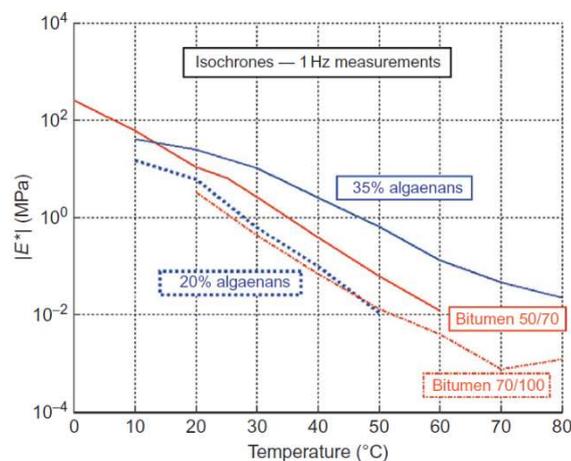


Figura 11 Confronto tra estratti di microalghe e bitume (Chailleux et al., 2012).

SPERIMENTAZIONE TRAMITE LIQUEFAZIONE IDROTERMALE (HTL)

Come già menzionato, la liquefazione idrotermale permette di trasformare la biomassa umida, evitando la fase di essiccazione, in una pasta idrofobica oleosa. La reologia della fase isolata dipende dalle condizioni operative di liquefazione idrotermale (temperatura e pressione principalmente) e, in alcuni casi, paragonabile a quella di un bitume convenzionale.



Figura 12 Procedimento di HTL con residui di micro-alghe (Audo et al., 2014).

In questa sperimentazione è stata utilizzata la tecnica HTL per ottenere la fase idrofobica, utilizzando due diverse apparecchiature: un reattore batch da 50 mL ed uno da 1 L.

Il reattore da 50 mL (temperatura massima di esercizio di 350 °C, pressione massima di 20 MPa ed una velocità di riscaldamento di 5 °C/min) è stato riempito con 41.5 g di residui di microalghe liofilizzate, sospesi in acqua deionizzata (4 mL/g), con le seguenti condizioni sperimentali: temperatura di reazione (250-300 °C), tempo di mantenimento alla temperatura di riferimento (0-60 min), pressione iniziale di azoto (0.8-50 bar). Al termine della reazione, il sistema è stato portato a raffreddamento, i prodotti gassosi sono stati spurgati ed il contenuto rimanente è stato versato in un imbuto Büchner, per procedere, poi, con la filtrazione dei residui. Questi sono stati, quindi, lavati, con cloruro di metilene (CH₂Cl₂), fino a quando la soluzione di lavaggio non è risultata incolore ed in seguito, sono stati effettuati lavaggi simili, con acqua, il cui residuo solido rimanente è stato, poi, asciugato in forno ad 80 °C.

Il reattore da 1 L (temperatura massima di esercizio di 400 °C, pressione massima di 19 MPa ed una velocità di riscaldamento di 15 °C/min) è stato riempito con 130 g di residui di microalghe liofilizzate, sospesi in acqua deionizzata (4 mL/g), selezionando alcune temperature di reazione di interesse (260, 280 e 300 °C).

Al termine della reazione:

- la fase gassosa è stata raccolta a 40 °C per poter, in seguito, eseguire un'analisi GC-TDC (*Gas Chromatography - Flame Ionization Detector*), tecnica utilizzata per analizzare i gas inorganici;
- la fase acquosa è stata pompata esternamente, a temperatura ambiente;
- la frazione insolubile in acqua, è stata rimossa dal reattore con una spatola, ed i residui rimanenti sono stati raccolti, risciacquando, poi, l'autoclave, con toluene (C₇H₈).

Di seguito, verranno riportati i risultati ottenuti, relativi all'HTL dei residui di *Scenedesmus sp.* per il reattore da 1 L, andando a commentare gli stessi.

entry	amount of biomass loaded	130 g of microalgae suspended in 520 mL of water		
		IF260	IF280	IF300
1	sample name	IF260	IF280	IF300
2	reaction temperature (°C)	260	280	300
3	time to reach temperature setpoint (min)	12	12	16
4	internal pressure (bar) at temperature setpoint	55	68	98
5	internal pressure (bar) at room temperature at the end of the HTL reaction	18.8	18.7	18.2
6	main components in the gas fraction	CO ₂ (90.3%) CO (1.5%)	CO ₂ (91.7%) CO (2.0%)	CO ₂ (89.2%) CO (1.5%)
7	yield for the gas fraction (%)	8.2	8.2	8.0
8	yield for the water-soluble fraction (%)	21	19	17
9	yield for the water-insoluble fraction (dichloromethane soluble fraction + insoluble solid residues) (%)	50	53	61
10	% of solid residues insoluble in dichloromethane, in the water-insoluble fraction	22	12.3	5.4
11	% of solid residues insoluble in both dichloromethane and HCl, in the water-insoluble fraction	7.3	2.1	1.1
12	elemental analysis of the dichloromethane soluble fraction (wt %)	C (68.4), H (8.2), N (4.5)	C (67.5), H (8.3), N (4.3)	C (72.6), H (9.3), N (4.6)

Figura 13 Dati sperimentali relativi all'HTL dei residui di *Scenedesmus sp.* nell'autoclave da 1 L (Audo et al, 2014).

Nella tabella soprastante, sono stati inseriti i risultati relativi a ciascuna delle tre temperature d'interesse (260, 280 e 300 °C). Alla voce 6 si riportano i componenti principali della frazione gassosa, ottenuti alla fine del processo HTL, dopo aver eseguito l'analisi GC-TCD, si evidenzia la presenza di anidride carbonica (CO₂) come composto principale (circa il 90 %), e piccole quantità di monossido di carbonio (CO) (1.5-2 %).

Alla voce 7, invece, si riportano i valori dei rendimenti delle frazioni gassose che risultano essere circa costanti, per tutte e tre le temperature analizzate (circa l'8 %). Un'altra voce che indica, invece, valori promettenti è la 9, la quale riporta la resa della frazione insolubile in acqua, variabile tra il 50 ed il 60 %. Infine, è interessante notare, come la quantità relativa di alghe nei residui solidi, sia diminuita significativamente, aumentando la temperatura dell'HTL, come si evince alla voce 11. La frazione insolubile in acqua, poi, è stata trattata con diclorometano (CH_2Cl_2), mostrando la presenza di residui solidi insolubili, isolati, infine, per filtrazione. L'analisi a raggi X-EDX dei residui solidi, ha evidenziato come il calcio sia il principale elemento inorganico presente, sottoforma di carbonato di calcio (CaCO_3) ed idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Il carbonato di calcio, infatti, viene utilizzato per controllare il pH del terreno di coltura delle micro-alghe, e parte di esso, viene immagazzinato nelle stesche, durante il processo di isolamento. Questi composti sono stati rimossi, mediante il trattamento dei residui solidi, con sei moli (6 M) di acido cloridrico (HCl), ottenendo una polvere bruna, ricca di carbonio. Si riporta, adesso, lo schema riassuntivo del processo HTL della biomassa algale:

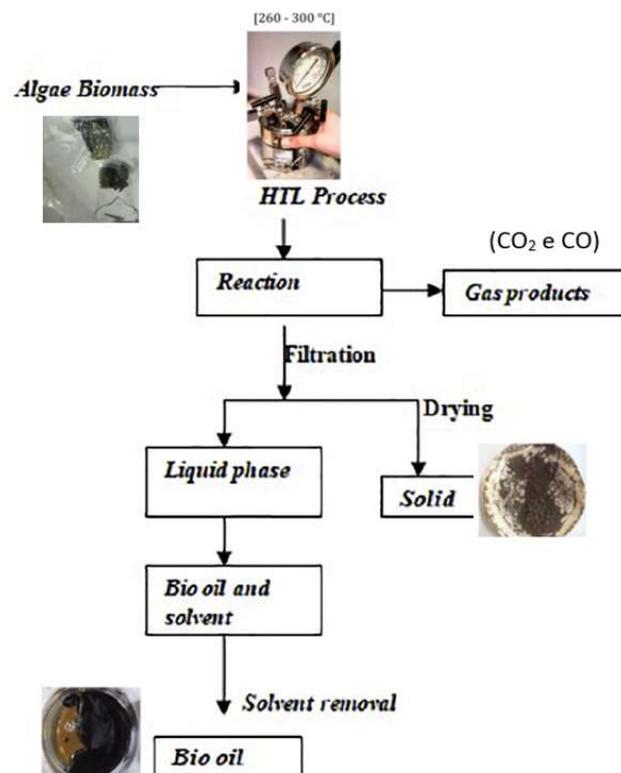


Figura 14 Processo HTL (riadattato) della biomassa algale (Kiran Kumar et al., 2018).

Al fine di valutare il potenziale delle frazioni insolubili in acqua, come sostituto del bitume, sono state studiate le loro proprietà reologiche. Nel caso del bitume, come già noto, queste proprietà variano fortemente in funzione della temperatura e del tempo di carico (rigidezza relativamente elevata a bassa temperatura ed un comportamento newtoniano ad alta temperatura), mostrando, tra 0 e 60 °C, un comportamento di tipo visco-elastico. Le proprietà visco-elastiche delle frazioni HTL insolubili in acqua, preparate nell'autoclave da 1 L (IF260, IF280 e IF300), sono state valutate, misurando la norma del modulo complesso e l'angolo di fase. Per rendere il confronto ancor più realistico, le prove sono state eseguite in intervalli di temperatura e frequenza, in accordo con le reali condizioni di carico dei leganti stradali convenzionali. In primo luogo, è stato valutato, la norma del modulo complesso, misurato ad 1 Hz, al variare della temperatura per le frazioni insolubili IF260, IF280 e IF300, comparandolo con quello di un bitume standard.

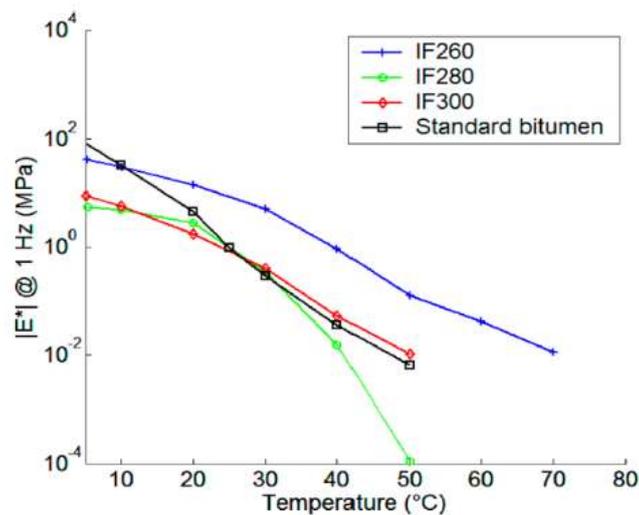


Figura 15 Variazione della norma del modulo complesso in funzione della temperatura tra le frazioni insolubili (IF260, IF280, IF300) ed un bitume standard (Audo et al., 2014).

Per tutti i materiali analizzati, il modulo è diminuito drasticamente, come atteso, con l'aumento della temperatura, mentre le frazioni HTL hanno mostrato un modulo inferiore, rispetto al bitume, nel range di temperature fredde ($T \sim 5$ °C).

Tuttavia, nell'intervallo di temperatura elevata, i campioni IF260 e IF300 mostrano un modulo superiore, o simile, a quello del bitume. In generale, le frazioni insolubili ottenute sembrano essere meno sensibili alla temperatura, rispetto al bitume.

Un altro parametro analizzato è stato, poi, l'angolo di fase, rappresentato in funzione della norma del modulo complesso sul Piano di Black.

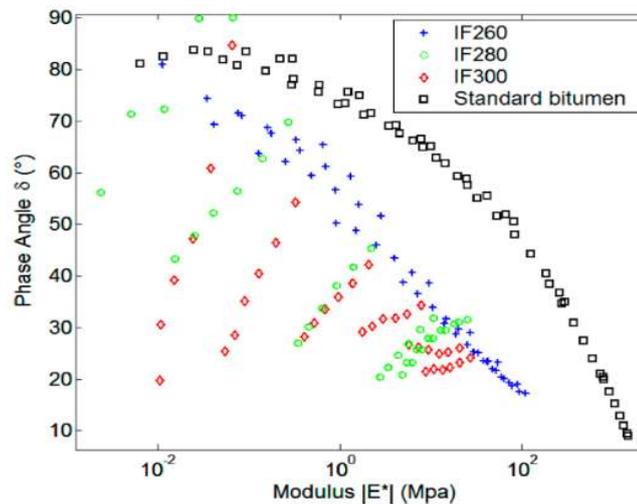


Figura 16 Variazione dell'angolo di fase in funzione della norma del modulo complesso tra le frazioni insolubili (IF260, IF280, IF300) ed un bitume standard (Audo et al., 2014).

Nei casi IF280 e IF300, gli angoli di fase misurati, sempre ad a 1 Hz, sono rimasti al di sotto dei 40°, indipendentemente dalla temperatura. A questa frequenza, i suddetti materiali si comportano più come solidi elastici rispetto a liquidi viscosi, mostrando una scarsa capacità di rilassamento. Al contrario, l'angolo di fase di IF260 assomiglia a quello di un bitume standard, aumentando dai 20° ai 90°, passando cioè, al variare della norma del modulo complesso, da uno stato quasi elastico ad uno totalmente viscoso. Va, però, evidenziato che il comportamento reologico dei campioni IF280 e IF300 differisce notevolmente dall'IF260, caratterizzato dall'essere più vicino ad un semplice stato reologico, come osservato per un bitume standard. Infatti, per l'IF260, le isoterme, nel Piano di Black, si sovrappongono, mostrando una continuità della curva, indicando, così, la presenza di una sorta di equivalenza frequenza-temperatura.

Di conseguenza, la struttura molecolare del campione IF260 sembra essere stabile, con la temperatura, al pari di un bitume. Al contrario, i campioni IF280 e IF300, mostrano isoterme che non si sovrappongono, dando evidenza di riarrangiamenti molecolari in funzione della temperatura. Come accennato in precedenza, l'aumento della temperatura di liquefazione, comporta una significativa diminuzione del contenuto di

alghe nelle frazioni insolubili (voce 11, da circa il 7 all' 1 % in peso), individuando un probabile frazionamento dell'algaenans, con una diminuzione, così, del peso molecolare medio di questi bio-polimeri, con conseguente variazione reologica.

Un'altra importante caratteristica da indagare risiede nel comportamento del bio-legante nei confronti dell'invecchiamento. Per tenere conto di questo, si sono presi in considerazione due campioni di *Stone Mastic Asphalt* (SMA), particolare tipologia di *Hot Mix Asphalt* (HMA), preparati, uno con bitume convenzionale ed uno con la fase idrofobica isolata, proveniente da HTL a base di micro-alghe. Le due miscele di SMA sono state esposte ai raggi ultravioletti (60 W/m^2) e ad un flusso d'aria a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, per una durata complessiva di 600 h, al fine di simulare un invecchiamento in laboratorio.

Dopodiché, è stata analizzata la variazione della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase, al variare dell'*Aging Time*, valutati ad una temperatura di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 Hz.

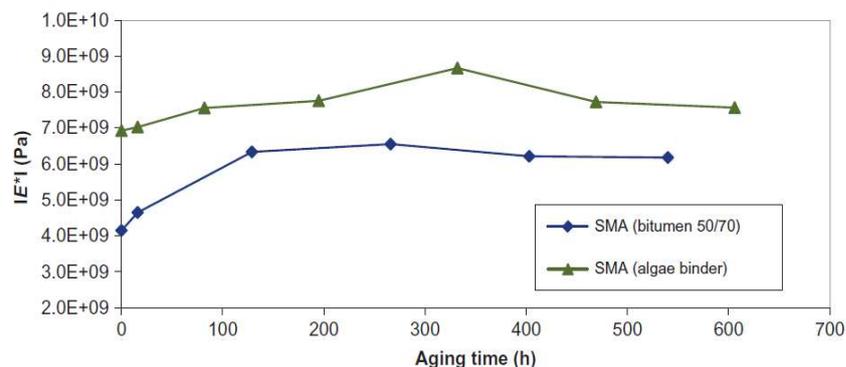


Figura 17 Norma del modulo complesso, a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 Hz, misurato su miscele SMA composta da un bitume convenzionale e da un legante di alghe (Chaillux et al., 2015).

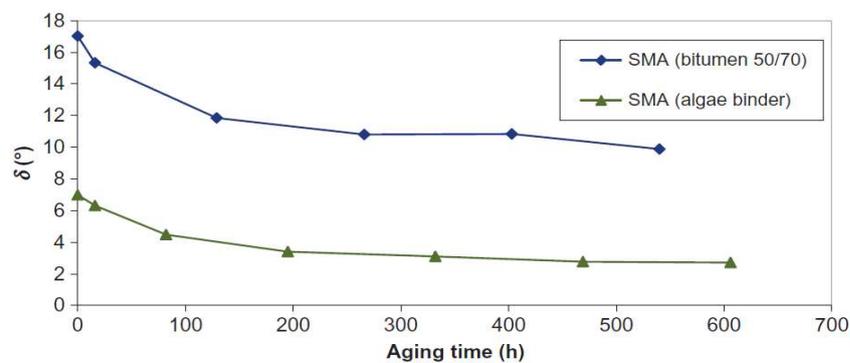


Figura 18 Angolo di fase a, $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 Hz, misurato su miscele SMA composta da un bitume convenzionale e da un legante di alghe (Chaillux et al., 2015).

La norma del modulo complesso della miscela con legante algale risulta essere relativamente stabile e maggiore, rispetto a quello convenzionale, mentre, per quanto riguarda l'evoluzione dell'angolo di fase, misurato sulla miscela del bio-legante, sembra essere più pronunciata, rispetto a quella della norma del modulo complesso, rimanendo, comunque, al di sotto dell'angolo di fase della miscela di bitume, di riferimento.

Come riportato nei due grafici soprastanti, il bio-legante, mostra un comportamento interessante per quanto riguarda la norma del modulo complesso, che sembra essere stabile nel tempo e poco discostato da quello di un bitume. Con riferimento, invece, all'angolo di fase, il bio-legante potrebbe manifestare un comportamento fragile a basse temperature, da noi, però, non ricercato, osservando, in effetti, valori molto differenti e bassi, rispetto a quelli della miscela, realizzata con un bitume 50/70.

In merito a questo, i team di studiosi stanno lavorando e continuando ad eseguire prove di laboratorio e ricerca, al fine di comprendere il comportamento del legante a base di micro-alghe, con l'intento di capire se questo, possa divenire in futuro un'alternativa "reale" all'utilizzo del bitume.

Sintesi e considerazioni generali

In questo secondo paragrafo, si sono investigate le proprietà fisiche-reologiche del bio-olio, ottenuto attraverso l'estrazione dei lipidi da micro-alghe ed utilizzato in sostituzione totale del bitume. Si sono presi in riferimento gli studi di Audo et al. (2014) e Chailleux et al. (2012) che hanno studiato il problema, attraverso due approcci: estrazione del bio-olio tramite Estrattore Soxhlet o tramite Liquefazione Idrotermale (HTL).

Tramite l'utilizzo dell'Estrattore Soxhlet, si è compreso come sia possibile regolare le proprietà reologiche del bio-legante, modificando il rapporto acidi grassi/acidi grassi liberi (35 % di acidi grassi è la soluzione ottimale risultante dalla sperimentazione). Valutando la norma del modulo complesso del bio-legante e confrontandolo con quello di due bitumi convenzionali (50/70 ed un 70/100) si è osservato che, nell'intervallo di temperatura testato, le micro-alghe mostrano una termo-sensibilità simile a quella dei bitumi ed un valore di modulo maggiore rispetto a quello dei campioni di riferimento, risultato promettente per un'eventuale sostituzione totale, valutata sempre con il 35 % di residui algali.

Per quanto riguarda la Liquefazione Idrotermale, la reologia della fase idrofobica isolata dipende dalle condizioni operative di liquefazione (temperatura e pressione). In seguito, sono state testate le proprietà visco-elastiche (norma del modulo complesso e angolo di fase) delle frazioni HTL insolubili in acqua, a differenti temperature: 260, 280 e 300 °C. Per tutti i bio-leganti analizzati, il modulo è diminuito drasticamente con l'aumento della temperatura, mentre le frazioni HTL hanno mostrato un modulo inferiore, nel range di temperature basse ($T \sim 5$ °C). Tuttavia, nell'intervallo di temperatura elevata, i campioni IF260 e IF300 mostrano un modulo superiore, o simile, a quello del bitume e, in generale, le frazioni insolubili ottenute sembrano essere meno sensibili alla temperatura, rispetto al bitume.

La variazione dell'angolo di fase dell'IF260 assomiglia a quello di un bitume standard, passando da uno stato quasi elastico ad uno totalmente viscoso.

Un'altra importante caratteristica indagata da Chailleux et al. (2015) è quella del comportamento del bio-legante nei confronti dell'invecchiamento. La norma del modulo complesso della miscela, con legante algale, risulta essere relativamente stabile e maggiore, rispetto a quello convenzionale. Per quanto riguarda l'evoluzione dell'angolo di fase, questo sembra essere più pronunciato, rispetto a quella della norma del modulo complesso, rimanendo al di sotto dell'angolo di fase della miscela di riferimento. Il bio-legante, mostra un comportamento interessante per quanto riguarda la norma del modulo complesso, che sembra essere stabile nel tempo e poco discostato da quello di un bitume mentre, con riferimento all'angolo di fase, questo potrebbe manifestare un comportamento fragile a basse temperature, da noi non ricercato.

In generale si è osservato, in tutti gli studi consultati, un aumento della norma del modulo complesso per i bio-leganti contenenti residui algali, rispetto a quelli di riferimento, rendendo questo risultato molto promettente per una futura sostituzione completa del bitume. Uno dei problemi riscontrati, però, è il comportamento nei confronti dell'invecchiamento, eccessivamente fragile alle basse temperature. Questo sembrerebbe essere un problema dal punto di vista funzionale e strutturale della pavimentazione e anche se gli studi sono ancora in corso, si potrebbe pensare di intervenire in maniera un po' più frequente rispetto ad un conglomerato standard, in termini di manutenzione con: rappezzatura (patching) o sigillatura delle fessure (crack sealing).

3.3 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti lignina

In questi ultimi decenni, si sono studiate, sempre con maggior interesse, lavorazioni che mirano a rendere ambiti, come quello energetico e quello dell'ingegneria stradale, sempre meno dipendenti dal petrolio, andando alla ricerca di fonti rinnovabili. Queste, infatti, permettono, come già detto, la riduzione dell'emissione di CO₂ durante le varie fasi lavorative, contribuendo, così, alla diminuzione della concentrazione di gas serra nell'atmosfera, uno dei problemi più sentiti dalla Comunità Scientifica Internazionale, in questo periodo storico. Nel capitolo precedente, si è visto come, per esempio, partendo dai sottoprodotti dell'industria algale, si sia arrivati ad una pasta idrofobica oleosa, con un comportamento simile a quello di un bitume. Sarebbe, quindi, interessante ricercare altri sottoprodotti, che possano sostituire, parzialmente, il residuo petrolifero mantenendo, però, proprietà meccaniche simili a quest'ultimo.

Un esempio di sostituzione parziale, che negli ultimi anni è stato studiato e testato da più gruppi di ricerca, riguarda la lignina, sostanza naturale che può essere isolata dalla biomassa lignocellulosica ed attualmente reperibile commercialmente come sottoprodotto dei processi di produzione cartaria. Si potrebbe pensare che la lignina possa derivare dalla famiglia dei bio-leganti ottenuti dai coprodotti del legno ed oli vegetali, già analizzati nei paragrafi precedenti, mentre, invece, la stessa, risulta essere uno "scarto" di diversa natura. Infatti, la lignina si trova sotto forma di polvere, mentre per "coprodotti del legno" si intendono tutte quelle resine derivanti dall'incisione della corteccia degli alberi e quindi aventi differenti proprietà ed aspetto. In generale questi potrebbero ricadere sotto la famiglia dei "bio-leganti derivanti dagli scarti del legno", anche se in letteratura non vi è alcuna traccia di questa definizione.

Si stima, infatti, che dalla produzione di 140 milioni di tonnellate di cellulosa e polpa per carta, si ricavano annualmente, circa 50 milioni di tonnellate di lignina. Però, oltre il 95% di questa, viene bruciata o per recuperare gli additivi chimici, utilizzati nei processi di estrazione, oppure smaltita in discarica (Zimbardi et al., 1998).

Una delle nuove frontiere sarebbe, invece, quella di valorizzare la larghissima disponibilità di lignina, essendo un prodotto (Barlassina, 2015):

- rinnovabile;
- assai versatile, come indicato dall'altissimo numero di lavori presenti nella letteratura scientifica;
- disponibile in larghi volumi;
- economicamente vantaggioso, trattandosi di uno scarto dell'industria cartaria;
- possessore di un alto contenuto energetico, a causa della presenza di anelli aromatici;
- facilmente modificabile da un punto di vista chimico, per ottenere prodotti ad alto valore aggiunto come, sostituto parziale, per esempio, del bitume;
- presente in percentuali importanti in molte specie vegetali, come riportato in una presentazione di Gosselink (2019). In questa, infatti, viene evidenziato come la corteccia del legno posseda tra il 20 ed il 30 % di lignina, oppure, la canapa, la paglia o il lino ne possano contenere tra il 15 ed il 25 %, mentre, nel guscio del cocco si possa arrivare fino al 50 % (Gosselink, 2019).

Tutto questo dimostra come un sottoprodotto, se ben riutilizzato, possa avere una "seconda vita" e prolungare, così, il suo ciclo vitale portando, anche, miglioramenti in altri ambiti.

3.3.1 Natura e processi di estrazione della lignina

La biomassa lignocellulosica è costituita, principalmente, da tre componenti interconnessi tra loro: la cellulosa (40-50 %), l’emicellulosa (20-30 %) e la lignina (15-30 %). Una rappresentazione schematica della matrice lignocellulosica è la seguente:

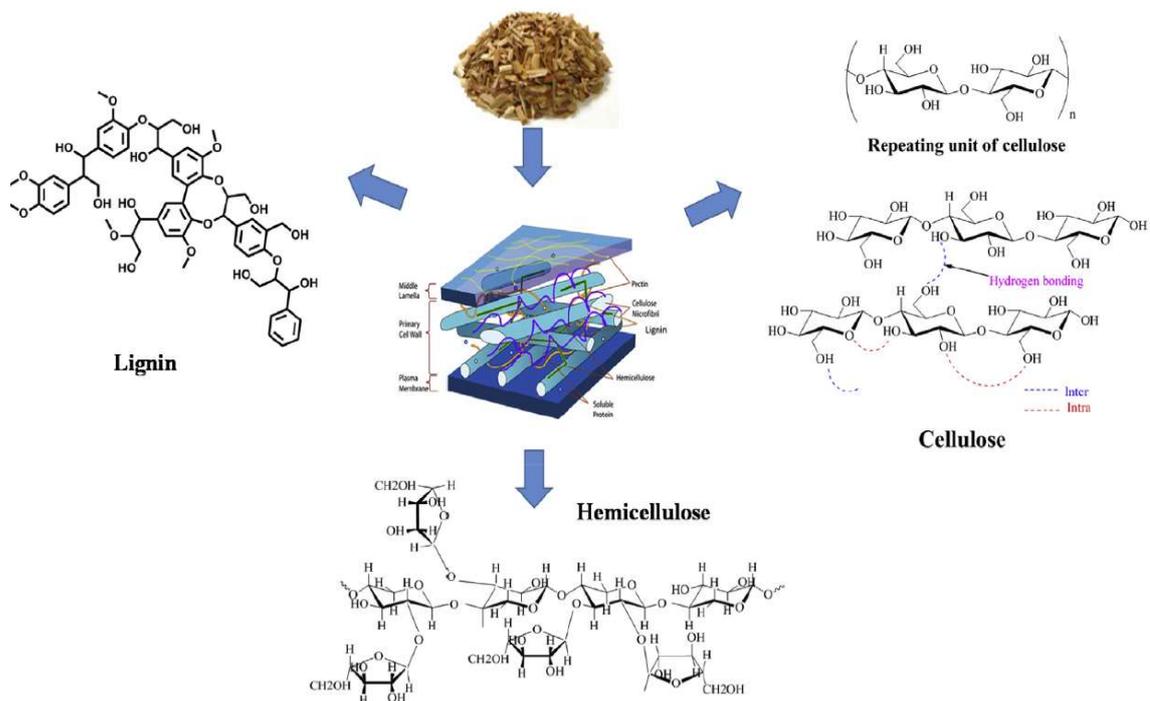


Figura 19 Distribuzione e struttura della cellulosa, emicellulosa e lignina nella biomassa (Kumar et al., 2020).

Ai fini di una migliore comprensione, è possibile eseguire un paragone tra le strutture della parete cellulare e quella del cemento armato. La cellulosa, esattamente come le armature d’acciaio, resiste a trazione, mentre la resistenza a compressione è garantita dall’insieme di emicellulosa e lignina, che dunque, svolgono un ruolo simile a quello del calcestruzzo (Barlassina, 2015). La lignina, come detto, è uno dei costituenti principali dei vegetali ed esplica la funzione di legante, impartendo durezza e rigidità alla pianta. Dal punto di vista chimico la lignina è un bio-polimero, tridimensionale irregolare, di natura idrofobica e dalla struttura relativamente complessa (Zimbardi et al., 1998). Inoltre, se per le micro-alghe si è parlato, in precedenza, di “alga raffineria”, in questo caso, si può parlare di “ligno raffineria” (Barlassina, 2015).

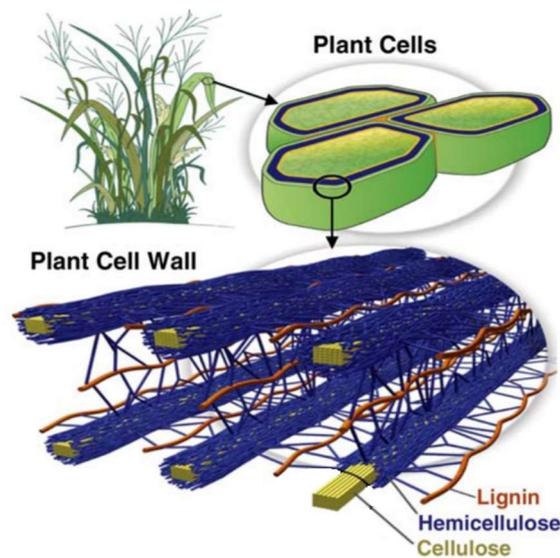


Figura 20 Organizzazione della struttura: cellulosa, emicellulosa e lignina (Poulomi et al., 2010).

Partendo dalla biomassa lignocellulosica, per ottenere la lignina e le altre due componenti, bisogna eseguire una serie di lavorazioni, di seguito elencate (Barlassina, 2015):

- OPERAZIONE DI PRETRATTAMENTO: si trasforma la biomassa, utilizzando la tecnica di *Steam Explosion*¹², in un intermedio idrolizzabile, contenente i suoi tre componenti principali.
- OPERAZIONE DI SEPARAZIONE (*Pulping*): si rompono i legami tra cellulosa, emicellulosa e lignina.
- ESTRAZIONE ACQUOSA: si recupera l'emicellulosa idrosolubile, che viene successivamente idrolizzata, in altri composti minori.
- ESTRAZIONE ORGANICA: consente di recuperare un liquido nero contenente lignina ad alte concentrazioni, successivamente seccato, per ottenere lignina in polvere.
- RECUPERO DELLA CELLULOSA: si tratta, infine, di recuperare un residuo a base di pasta di cellulosa, materia prima, utile nell'industria della carta e delle fibre.

¹² Tecnica in cui la biomassa lignocellulosica viene, inizialmente, compressa con vapore e successivamente riportata rapidamente alla pressione atmosferica, con conseguente frammentazione del materiale, con il vantaggio di aver un basso consumo energetico ed utilizzo di acqua, come unico solvente.

Come precedentemente descritto, la lignina viene estratta dalle pareti cellulari, attraverso un processo, chiamato *pulping*. Esistono, però, varie soluzioni possibili, che differiscono tra loro, per condizioni operative e tipologia di trattamento (fisico o chimico), avendo come conseguenza che la chimica della lignina, dipenda radicalmente dal processo di estrazione impiegato. Tali processi di trattamento sono classificabili in due categorie principali: processi con e senza zolfo (Barlassina, 2015).

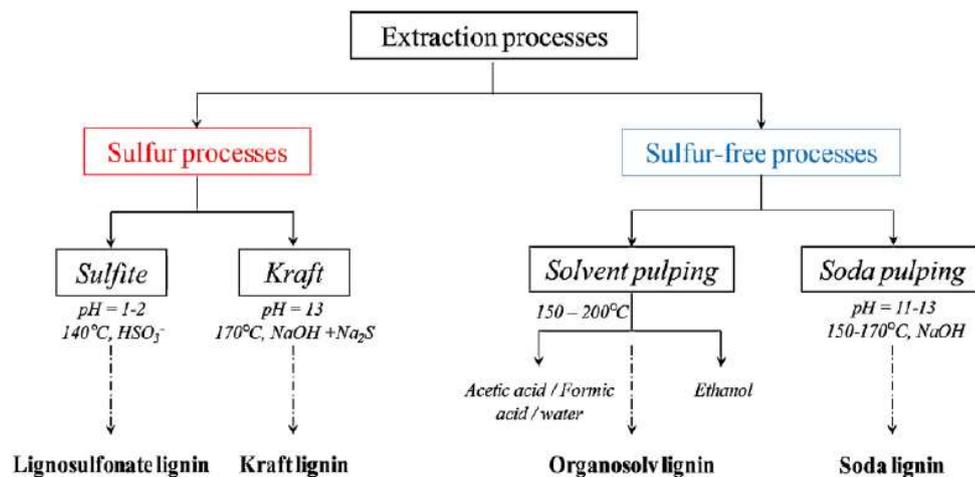


Figura 21 Processi di estrazione della lignina (Barlassina, 2015).

PROCESSI CON ZOLFO

La lignina Kraft, (Barlassina, 2015), derivante dall'omonimo processo, si estrae utilizzando una miscela altamente basica ($\text{pH} = 13$) di idrossido di sodio (NaOH) e solfito di sodio (Na_2SO_3), ad una temperatura di 170°C per una o due ore. Durante questo trattamento, le molecole polimeriche di lignina, si rompono grazie all'azione degli ioni solfuri e si dissolvono nel liquido nero, per essere poi recuperate mediante essiccazione.

Per quanto riguarda, invece, la lignina lignosulfonata, (Barlassina, 2015), la biomassa viene trattata con sali di solfiti o bisolfiti e le temperature sono variabili tra i 130°C ed i 150°C , con il pH compreso tra 1.5 e 5, a seconda del sale utilizzato, con una durata di 3-7 ore. Oltre ad essere idrosolubile, questo tipo di lignina, presenta un peso molecolare medio, superiore a quello della Kraft.

PROCESSI SENZA ZOLFO

Queste lignine posseggono un basso peso molecolare e la loro struttura è molto più vicina alla lignina naturale, rispetto a quelle provenienti dai processi in presenza di zolfo.

La lignina Organosolv, (Barlassina, 2015), si ottiene per solubilizzazione e, come conseguenza, la struttura chimica del polimero risulta meno alterata rispetto agli altri processi. Le proprietà fondamentali di queste lignine sono: la buona solubilità in solventi organici, l'elevato grado di purezza, il basso peso molecolare e la pessima solubilità in acqua.

La lignina soda, (Barlassina, 2015), viene estratta da un processo caratterizzato dalla totale assenza di zolfo, con l'utilizzo, al suo posto, dell'idrossido di sodio (NaOH) per dissolvere la lignina, ottenendo, così, una sostanza con una composizione molto più simile a quella naturale, rispetto alle lignine ottenute dai processi a base di zolfo.

Altre due tipologie di lignina che verranno prese a riferimento in una sperimentazione, riportata di seguito, sono:

- la lignina Klason, insolubile in acqua e derivante dal processo di idrolisi acida concentrata;
- la lignina SHS (*Super Heated Steam*), priva di zolfo, derivante dall'omonimo processo di estrazione, studiato dal gruppo di ricerca *dell'Organizzazione Olandese per la Ricerca Scientifica Applicata* (TNO) di Delft, basato sull'utilizzo di vapore surriscaldato.

3.3.2 Casi studio presenti in letteratura

In letteratura, sono presenti alcuni studi che utilizzano la lignina, come sostituto parziale del bitume. Di seguito vengono riportati ed analizzati due casi studio, tra i tanti, eseguiti da due gruppi di lavoro dei Paesi Bassi, pionieri in questo ambito, dove, il primo è stato eseguito da Vliet et al. (2016), appartenenti all'Organizzazione Olandese per la Ricerca Scientifica Applicata (TNO) di Delft, mentre il secondo è stato eseguito dal professor Gosselink (Gosselink et al., 2019) dell'Università di Wageningen.

In questi primi anni di sperimentazione si è lavorato unicamente, però, alla sostituzione parziale anche se, in futuro, con il progredire degli studi, non si esclude la possibilità di una sostituzione totale del bitume ad uso stradale.



Figura 22 Come ottenere lignina dalla biomassa lignocellulosica? (Gosselink, 2019).

STUDIO CONDOTTO DALL'ORGANIZZAZIONE OLANDESE PER LA RICERCA SCIENTIFICA APPLICATA

In questo caso studio (Vliet et al., 2016), sono state analizzate diverse miscele di lignina e bitume, utilizzando, non solo lignina al naturale, derivante dal processo di estrazione, ma anche lignina modificata chimicamente, in modo da tener sotto controllo i due aspetti fondamentali in una sostituzione parziale, quali: la miscibilità, tra lignina e bitume, e la performance reologica della miscela (andamento della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase, in funzione della frequenza e della temperatura).

Le varietà di lignina testate, sono: la Kraft, l'Organosolv, la Klason e la SHS mentre i bitumi presi in considerazione, sono un 10/20, un 70/100 e, infine, un 160/220, andando a testare un ampio range di consistenze, da quella più "dura" a quella più "morbida". Lo studio si articola in più fasi:

- nella prima, si analizzano le caratteristiche di miscibilità e reologiche, di tutti e tre i bitumi, considerando un'aggiunta pari al 10 % in peso di lignina Organosolv.
- nella seconda, invece, si prende in considerazione, unicamente, il bitume 70/100, ma considerando sia il 10 % sia il 25 % in peso di lignina Organosolv.
- nella terza, si analizza, unicamente, il bitume 70/100, ma considerando solo, il 25% in peso, di tutte e quattro le tipologie di lignina disponibili.
- nella quarta fase, infine, si considera soltanto il bitume 70/100, miscelato prima, con la lignina Organosolv al 25 % al naturale e poi, con quella modificata chimicamente.

Per quanto riguarda l'analisi reologica, si è utilizzato un DSR (*Dynamic Shear Rheometer*), prendendo a riferimento un range di temperatura che varia da -10 a +60 °C ed uno di frequenza che varia da 0.1 a 400 rad/s e, infine, utilizzando il Principio di Sovrapposizione tempo-temperatura, si è ricostruita la Curva Maestra, considerando la norma del modulo complesso e le frequenze, riportando, anche, l'andamento dell'angolo di fase al variare di queste, considerando una temperatura di riferimento pari a 20 °C.

Per quanto riguarda la prima fase, gli esperimenti di miscelazione sono stati effettuati, inizialmente, mescolando a mano, aggiungendo gradualmente la lignina al bitume e allo stesso tempo aumentando la temperatura di miscelazione e poi, utilizzando un miscelatore ad elica, in grado di mantenere una temperatura di miscelazione costante.

Quest'ultima è risultata diversa per i vari tipi di bitume analizzati, infatti: per il bitume 10/20 si è usata una temperatura di miscelazione pari a 185 °C, mentre per quello 70/100 una pari a 155 °C, infine, per quello 160/220 una pari a 145 °C.

Con l'aggiunta manuale, del 10 % in peso della lignina Organosolv, non si sono verificati problemi né di miscelazione né di coagulazione, mentre se ne sono riscontrati, utilizzandone il 25 %.

Per evitare, quindi, la comparsa di coagulazione, l'aggiunta della lignina è stata effettuata previa setacciatura, in modo da creare particelle, molto più fini, permettendo, così, una migliore miscibilità.

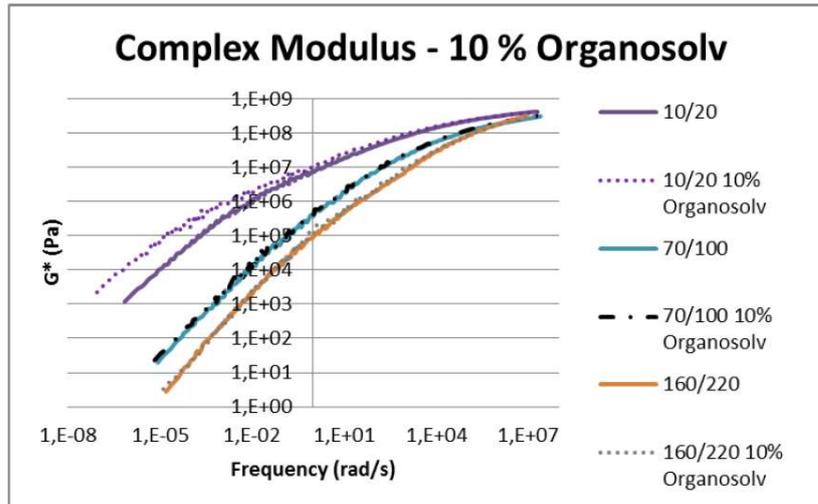


Figura 23 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) dei bitumi 10/20, 70/100 e 160/220 con e senza aggiunta del 10 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).

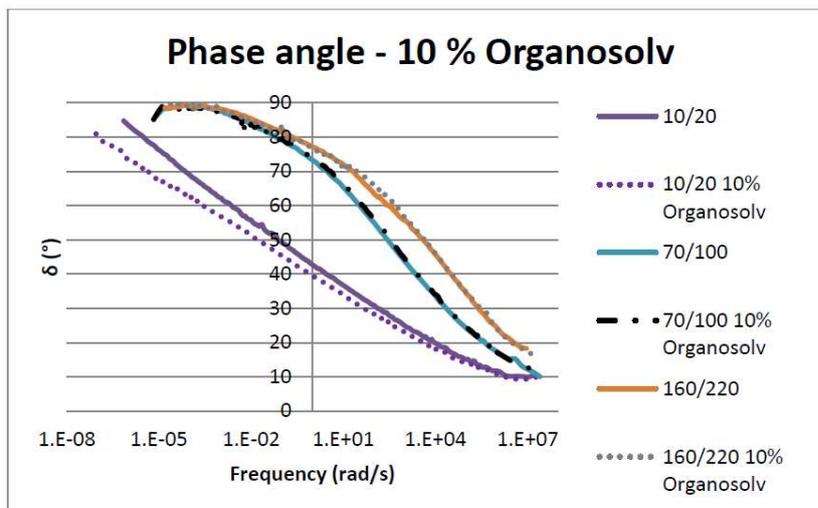


Figura 24 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) dei bitumi 10/20, 70/100 e 160/220 con e senza aggiunta del 10 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).

Come si evince dai due grafici soprastanti, un'aggiunta pari al 10 % in peso di lignina Organosolv, evidenzia per il bitume 10/20, dotato di una consistenza più "dura", un aumento di rigidità ed una riduzione dell'angolo di fase, soprattutto a frequenze più basse, mentre, per le altre due tipologie di bitume, 70/100 e 160/220, l'aggiunta del 10 % di lignina, non produce alcun effetto sul comportamento reologico.

Nella seconda fase, invece, si prende in considerazione, unicamente, il bitume 70/100, ma considerando sia il 10 % che il 25 % in peso della lignina Organosolv.

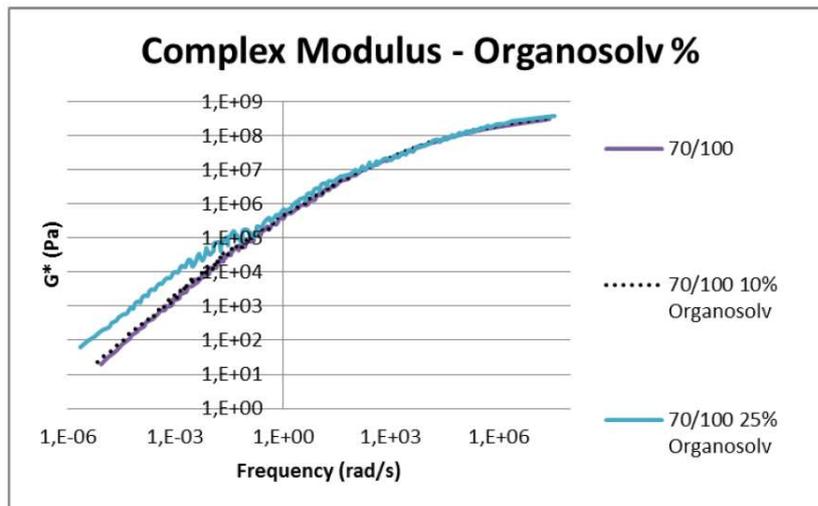


Figura 25 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con e senza aggiunta del 10 % o del 25 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).

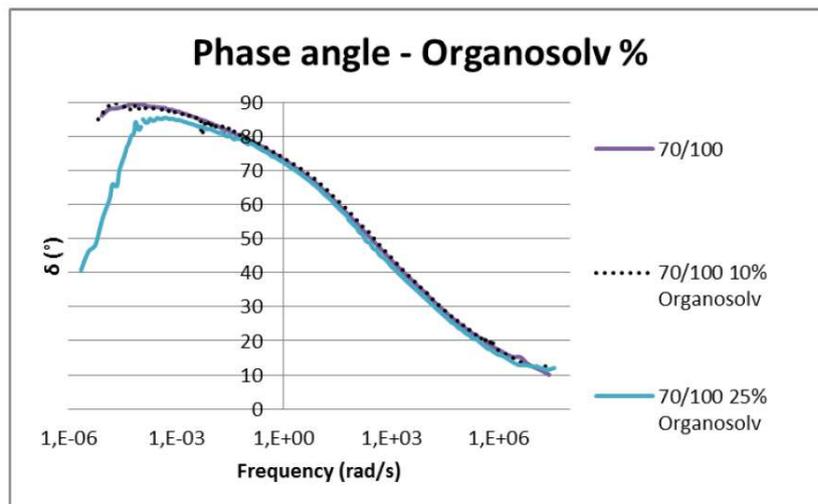


Figura 26 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con e senza aggiunta del 10 % o del 25 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).

Come evidenziato nella prima fase, l'aggiunta del 10 % di lignina, non ha sortito alcun effetto sul comportamento visco-elastico dei bitumi a consistenza "morbida" (70/100, 160/220) mentre, se ne possono osservare, all'aumento della quantità di lignina, al 25%. Infatti, se con il solo 10 % non si evidenzia alcun effetto, con il 25 % si ha un chiaro aumento di rigidità della miscela oltre ad una variazione nell'angolo di fase. Osservazioni simili sono state eseguite anche per il bitume 160/220.

Si può concludere, quindi, che, l'aumento della quantità di lignina, comporta un significativo effetto sul comportamento reologico della miscela, rispetto al solo bitume originale. Inoltre, si può affermare che, per i bitumi a consistenza più "dura" come il 10/20, questa modifica di comportamento si evince già, con concentrazioni di lignina più basse (10 %) mentre, per bitumi a consistenza più "morbida" (70/100, 160/220), questo effetto si nota, solo, con concentrazioni di lignina più elevate (25 %).

Nella terza fase, si analizza, invece, unicamente, il bitume 70/100, considerando solamente, il 25 % in peso di tutte e quattro le tipologie di lignina disponibili: la Kraft, l'Organosolv, la Klason e la SHS, per verificare se ci siano o meno, delle variazioni di comportamento, in base alla tipologia di estrazione della lignina utilizzata.

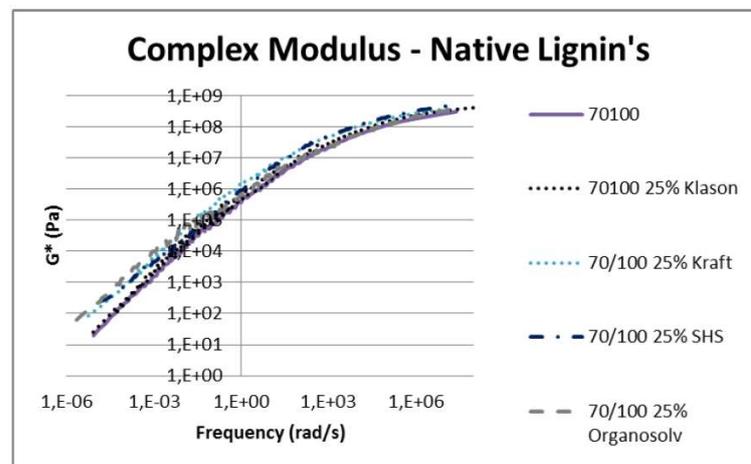


Figura 27 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso delle quattro tipologie di lignine testate (Vliet et al., 2016).

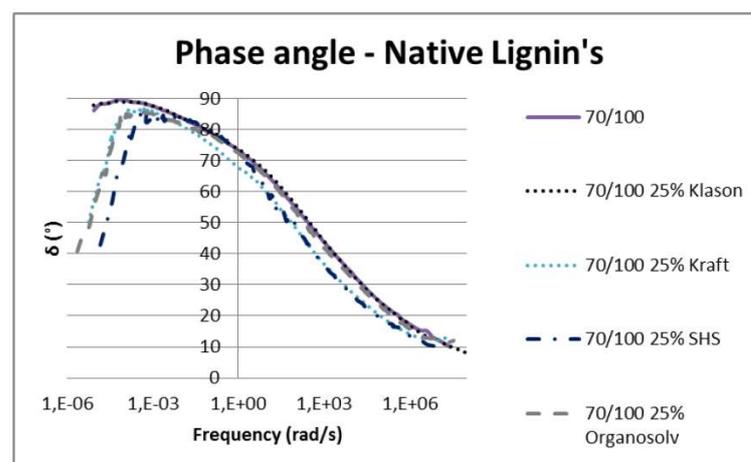


Figura 28 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso delle quattro tipologie di lignine testate (Vliet et al., 2016).

In seguito all'uso delle quattro tipologie di lignina a disposizione, risultate tutte idonee alla miscelazione con il bitume in esame, l'analisi reologica, ha mostrato sia un aumento della rigidità, rispetto al legante di riferimento (70/100), che una variazione dell'angolo di fase, ad eccezione di quella Klason, che ha evidenziato un comportamento visco-elastico paragonabile a quello del bitume di origine. Infine, sulla base di queste osservazioni, si può concludere che, il metodo di estrazione, quindi la tipologia di lignina, ricopre un ruolo fondamentale sul comportamento visco-elastico della miscela.

Gli studiosi hanno consigliato, quindi, la sostituzione del bitume 70/100 con il 25 % di lignina Klason, mentre, utilizzando le altre tipologie di lignina si sono riscontrati dei comportamenti paragonabili a bitumi modificati con polimeri (PMB - *Polymer Modified Bitumen*), essendo così, potenziali alternative all'uso di polimeri, come l'SBS.

Infine, nella quarta fase, si considera il bitume 70/100 miscelato, inizialmente, con la lignina Organosolv al 25 % al naturale e poi, con quella modificata chimicamente. Rispetto al bitume, la lignina possiede un'elevata quantità di gruppi idrossilici (-OH) e, per renderla ancora più idrofobica e quindi, più compatibile con il bitume, questi gruppi OH, sono stati "bloccati" usando sostituti idrofobici, utilizzando varie tecniche, come la EGE (*Ethylhexyl Glycidyl Ether*) o la FGE (*Phenyl Glycidyl Ether*).

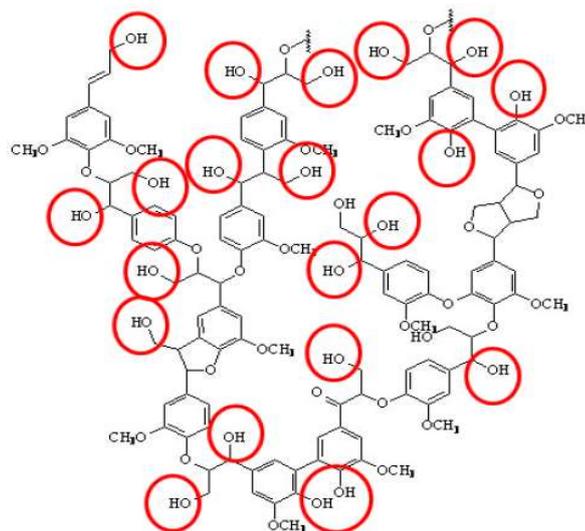


Figura 29 Gruppi idrossilici (-OH) presenti nella lignina (Vliet et al., 2016).

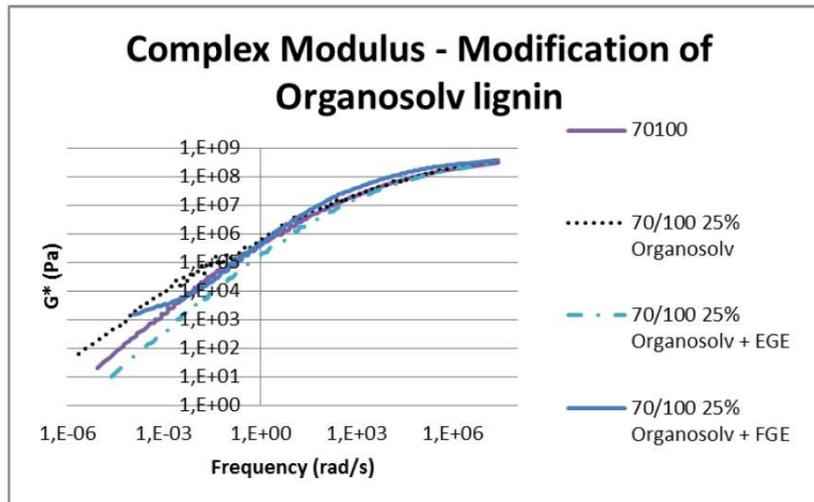


Figura 30 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso di lignina Organosolv al naturale o modificata chimicamente (Vliet et al., 2016).

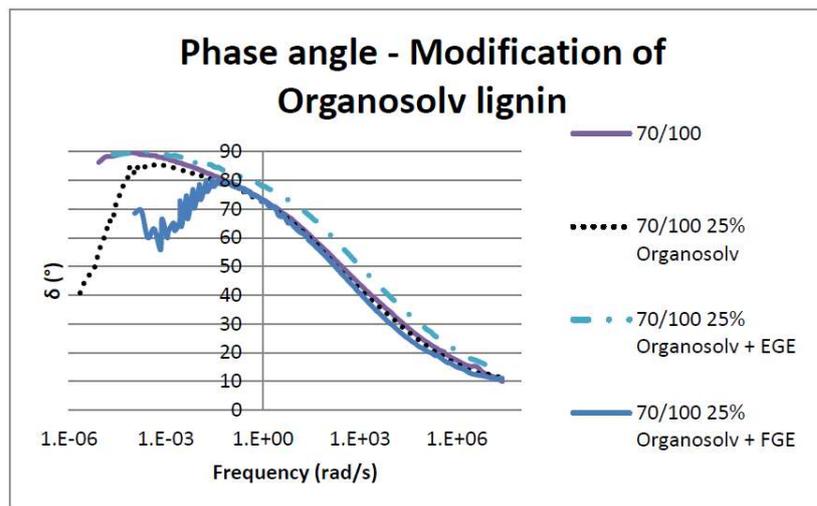


Figura 31 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso di lignina Organosolv al naturale o modificata chimicamente (Vliet et al., 2016).

Il primo risultato osservato, dopo la modifica chimica della lignina, riguarda una migliore miscibilità di questa nel bitume e, in merito, gli studiosi, sostengono che, usando lignina modificata si potrebbe aumentare anche la quantità di materiale utilizzato. Modificando la lignina, è possibile così, regolare, mediante la tecnica EGE, il comportamento visco-elastico della miscela ligninica-bituminosa, rispetto al legante convenzionale, mentre, con la tecnica FGE, si ottiene una variazione di comportamento prossima a quella osservata per i bitumi modificati con polimeri (PMB).

STUDIO CONDOTTO DALL'UNIVERSITA' DI WAGENINGEN

Dal 2015, la *Wageningen University & Research*, di cui fa parte il professor Gosselink, uno dei pionieri in questo ambito, ha avviato una sperimentazione per la sostituzione parziale del bitume, utilizzando la lignina, ottenendo risultati incoraggianti (Spagnolo, 2019). Infatti, come da lui affermato: “*la lignina possiede delle proprietà molto simili a quelle del bitume*” e quindi rappresentano due materiali promettenti, dal punto di vista della miscibilità (Ferraris, 2015). In questi ultimi anni, sono state studiate numerose applicazioni bio-based nel campo delle infrastrutture, facendo nascere numerosi progetti a livello comunitario, come per esempio, il “*Biobased Infra*”, comprendente varie forme di cooperazione per l'applicazione di questi materiali, istituito da *NV Economische Impuls Zeeland* unitamente a *Grontmij* e *Wageningen UR Food & Biobased Research* (Gosselink, 2014). Uno dei paesi più virtuosi in questa ricerca, è senza dubbio quello dei Paesi Bassi, dove le strade realizzate con il bio-composto a base di lignina, sono attualmente otto.

Queste comprendono: un tratto localizzato in un sito industriale, nella provincia olandese di Zelanda, percorso quotidianamente da veicoli e mezzi pesanti, costruito nel 2015 e ancora oggi in perfette condizioni, alcune strade secondarie nei dintorni dello stesso, ed una pista ciclabile lunga un chilometro, situata presso la *Wageningen University & Research*, divisa in 3 sezioni, ciascuna delle quali, progettata e costruita nel 2017, utilizzando, per ognuna, una differente tecnica costruttiva (Spagnolo, 2019). L'utilizzo di diverse tecniche, ha avuto lo scopo di ricercare il maggior numero di informazioni possibili in merito al comportamento finale del conglomerato bituminoso, infatti: un tratto è stato costruito con bitume resistente a basse temperature, un altro con uno modificato con lignina, resistente a basse temperature, ed infine, l'ultimo con uno tradizionale, resistente alle alte temperature (Ferraris, 2015).

Nello studio condotto da Gosselink et al. (2019), sono state testate differenti tipologie di lignina, derivanti da differenti processi estrattivi, come: la Kraft, la soda e quella derivante da Idrolisi. In questo studio, oltre al bitume ed alla lignina, gli studiosi hanno proposto anche l'aggiunta di un olio vegetale, opzionale, al fine di migliorarne la miscibilità finale.

Infatti, per quanto riguarda il bitume si sono prese in considerazioni quattro tipologie differenti, con una diversa concentrazione di saturi, aromatici, resine ed asfalteni. Per quanto riguarda, invece, la lignina, ne è stata usata una con purezza compresa tra il 60 ed il 100 % in peso e con un peso molecolare medio, tra i 1000 ed i 5000 g/mol. Per quanto concerne, invece, l'olio vegetale opzionale, ne è stato utilizzato uno, di origine non fossile, come, per esempio, quello di lino o di semi, con viscosità dinamica, valutata a 20 °C, compresa tra i 0.01 ed i 1600 Pas. Gli studiosi hanno consigliato, anche, la modalità di miscelazione dei tre prodotti. Infatti, è stato indicato di unire al bitume, simultaneamente, lignina ed olio vegetale, per ottenere una miscela finale con migliori caratteristiche (Gosselink et al., 2019).

Al fine di indagare, poi, un maggior numero di casistiche, sono state studiate due tipologie di conglomerato bituminoso: uno *Porous Asphalt* (ZOAB - Zeer Open Asphalt Beton) ed un *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

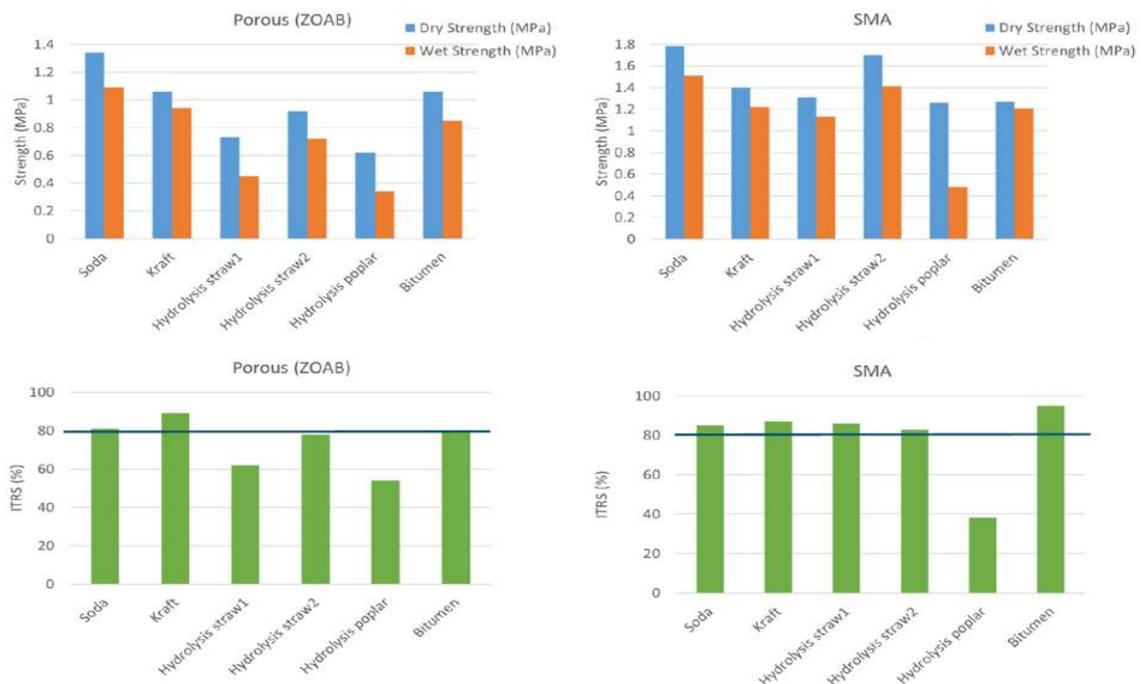


Figura 32 Analisi su conglomerati bituminosi ZOAB e SMA (Gosselink, 2019).

Sono state eseguite, inoltre, delle prove a trazione indiretta, permettendo, così, di ricavare un parametro di resistenza a rottura dei provini, sia di ZOAB che di SMA, in condizioni sia bagnate che secche per poter, poi, valutare il parametro ITRS¹³ (%), *Indirect Tensile Stress Ratio*, in modo da poterlo, poi, confrontare con quello eseguito su un provino di bitume convenzionale (vedere *Appendice III*). In seguito, sono state eseguite prove di rigidità e di resistenza alla fatica, con una prova a flessione su quattro punti, ed i risultati, così ottenuti, sono riportati di seguito:

	Hydrolysis lignin	Kraft lignin	Minimum requirement	Maximum requirement
Stiffness (MPa)	4441	6530	3600	11000
Fatigue resistance (Vermoeding ϵ_6)	107	124	>100	>130
Track formation Fc Max	<0,6	<0,2	0,2	4,0
Durability %	85	85	> 80	

Figura 33 Prove meccaniche eseguite sui provini (Gosselink, 2019).

Come si evince dalla tabella, tutti i valori rientrano tra il range di minimi e massimi consentiti. Prima di poter eseguire una prova in vera grandezza, il gruppo di studiosi ne ha eseguita una “pilota” su 1 m² di pavimentazione, poi, su 10 m², detta “demo test” ed infine, una su campi prova in vera grandezza, detta “demonstration roads”:



Figura 34 Test pilota, prima del campo prova in vera grandezza (Gosselink, 2019).

¹³ Il coefficiente ITRS (%), *Indirect Tensile Stress Ratio*, viene valutato facendo il rapporto tra il “Wet Strength” ed il “Dry Strength” in MPa.

Per quanto riguarda il tronco stradale, inaugurato il 1° luglio 2015 nella provincia di Zelanda, è stata utilizzata, come modificatore del bitume, la lignina soda, eseguendo una sostituzione al 50 % (50 % lignina e 50 % bitume convenzionale). La prima conseguenza notata è stata una minore temperatura di stesa richiesta, che è risultata essere sui 130-140 °C, minore, rispetto a quella di un bitume convenzionale, con conseguente riduzione di CO₂ dispersa nell'atmosfera.



Figura 35 Tronco stradale in Zelanda costituito da bitume modificato con lignina soda (Paesi Bassi) (Gosselink, 2019)

Il tronco stradale analizzato, infine, non mostra, attualmente, criticità particolari, nonostante il passaggio del carico veicolare, anche se sta continuando il suo monitoraggio nel tempo. Questi bio-conglomerati, oltre ad avere buone resistenze meccaniche, producono ulteriori vantaggi come:

- la riduzione del rumore, rilevata pari a 4.2 dB;
- una minore resistenza al rotolamento, valutata pari al 3.4 %;

avendo, come conseguenza positiva, una diminuzione delle emissioni, da parte dei veicoli (Gosselink et al., 2019).

Sintesi e considerazioni generali

In questo terzo paragrafo, si sono analizzate le proprietà della lignina vista come un possibile sostituto parziale del bitume. Sono stati presi in esame due studi, eseguiti da due differenti gruppi di ricerca, dei Paesi Bassi.

Vliet et al. (2016), hanno analizzato varie miscele di lignina (Kraft, Organosolv, Klason e SHS) e bitume (10/20, 70/100 e 160/220), utilizzando, non solo, lignina al naturale, ma anche modificata chimicamente, in modo da tener sotto controllo la miscibilità, tra lignina e bitume, e la performance reologica della miscela.

Il team di studiosi ha analizzato le caratteristiche di miscibilità e reologiche, di tutti e tre i bitumi, considerando un'aggiunta pari al 10 % di lignina Organosolv, poi, considerando unicamente il bitume 70/100 con il 10 % e il 25 % di lignina Organosolv, inoltre il bitume 70/100 con il 25% di tutte e quattro le tipologie di lignina disponibili ed infine il bitume 70/100 con l'aggiunta della lignina Organosolv al 25 % sia al naturale che modificata chimicamente.

Per quanto riguarda la temperatura di miscelazione, tra lignina e bitume, questa è risultata diversa per le varie tipologie di bitume. Passando da bitumi di consistenza "dura" a quella "morbida", è stata ottenuta una diminuzione di temperatura, passando dai 185 °C ai 145 °C.

Si è notato come l'aumento della quantità di lignina comporti un effetto significativo sul comportamento reologico della miscela. Inoltre, si può affermare che, per i bitumi a consistenza più "dura", questa modifica di comportamento si evince già, con concentrazioni basse di lignina (10 %) mentre, per bitumi a consistenza più "morbida", questo effetto si nota a più elevate concentrazioni (25 %).

In seguito all'utilizzo delle quattro tipologie di lignina a disposizione, l'analisi reologica ha mostrato sia un aumento della rigidità, rispetto al legante di riferimento (70/100), che una variazione dell'angolo di fase, ad eccezione di quella Klason, che ha evidenziato un comportamento visco-elastico paragonabile a quello del bitume di riferimento.

Infine, si può concludere che, il metodo di estrazione, quindi la tipologia di lignina, ricopre un ruolo fondamentale sul comportamento visco-elastico della miscela. Considerando, invece, la lignina modificata chimicamente, attraverso i processi EGE (*Ethylhexyl Glycidyl Ether*) o FGE (*Phenyl Glycidyl Ether*), si è osservata una migliore miscibilità di questa, nel bitume e, gli studiosi sostengono che, utilizzando questa tipologia, si potrebbe aumentare anche la percentuale di sostituzione.

Gosselink et al. (2019), invece, hanno testato differenti tipologie di lignina, derivanti da diversi processi estrattivi (Kraft, soda e quella derivante da Idrolisi), investigando la possibilità di una sostituzione al 50 %, rispetto al bitume. Al fine di indagare un maggior numero di casistiche, sono state studiate due tipologie di conglomerato bituminoso: uno Porous Asphalt ed un Stone Mastic Asphalt, sulle quali sono state eseguite prove di trazione indiretta, di rigidità e di resistenza alla fatica, ottenendo risultati entro i limiti prefissati dalle normative delle pavimentazioni stradali, facendo ben sperare.

La prima conseguenza notata, in seguito alla sostituzione, è stata una minore temperatura di stesa richiesta, rispetto ad un bitume convenzionale, con conseguente riduzione di CO₂ dispersa nell'atmosfera. In seguito, l'analisi reologica, ha mostrato sia un aumento della norma del modulo complesso, rispetto al legante di riferimento, che una variazione dell'angolo di fase.

Sui tratti realizzati in vera grandezza, si stanno osservando, ancora i comportamenti di degrado anche se, fino ad oggi, sembra che gli stessi siano paragonabili a quelli di un conglomerato convenzionale, ritenendo, quindi, possibile, intervenire con fasi di manutenzione simili a quelle di una pavimentazione standard, senza aumentare, così, la frequenza di intervento. Ovviamente, essendo la sperimentazione ancora "giovane" e il periodo di osservazione ancora "breve", si pensa che ulteriori approfondimenti debbano essere eseguiti in futuro, oltre allo studio dettagliato dei fenomeni di degrado, per comprendere al meglio la frequenza delle attività di manutenzione.

3.4 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti bio-oli derivanti da olio di scarto da cucina

Un altro esempio di biomassa promettente, da utilizzare come sostituto parziale del bitume, risulta essere l'olio di scarto da cucina (WCO – *Waste Cooking Oil*). Questo, infatti, rappresenta un rifiuto derivante, principalmente, dalle attività di ristorazione, ma non solo, e, eseguendo una valutazione a livello globale, si intuisce come i WCO rappresentino un sottoprodotto di ingente quantità. Provando a fornire dei numeri, per comprendere gli ordini di grandezza in questione, per esempio, l'Agenzia di Protezione per l'Ambiente degli Stati Uniti (USEPA - *United States Environmental Protection Agency*) ha evidenziato che, nel solo anno 2011, sono stati prodotti circa undici miliardi di litri di WCO (Md Mariruzzaman et al., 2015) mentre, nella sola Cina, si parla di circa cinque milioni di tonnellate, centomila delle quali prodotte a Pechino (Wang et al., 2018). A livello di internazionale, gli Stati considerati tra i maggiori produttori di WCO sono, come già detto, Stati Uniti e Cina ma non solo:

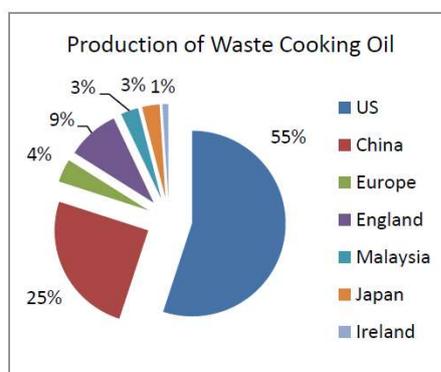


Figura 36 Maggiori produttori di WCO a livello di Stati (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2015).

Dal punto di vista ambientale, invece, uno dei più grandi problemi dei WCO riguarda il loro smaltimento ed il loro riciclo che, in molti casi, non viene eseguito nella maniera corretta. Infatti, una grande quantità di questi viene scaricata illegalmente nelle discariche e nei fiumi, causando, quindi, inquinamento delle risorse idriche e del suolo (Asli et al., 2012).

Un'altra grande sfida, a livello ambientale, intrapresa, soprattutto nell'ultimo decennio, è stata quella di riutilizzare, in maniera più consapevole, questi scarti. Visto che l'industria stradale sta attraversando una crisi dovuta alla scarsità di petrolio e dei suoi derivati, questo potrebbe essere il momento opportuno per poter ricollocare i WCO sul mercato, in modo da trasformarli da prodotto di rifiuto, in uno di maggiore utilità per altri settori produttivi. Un altro sistema per riutilizzare questi scarti è quello di estrarre dagli stessi dei bio-carburanti, attraverso un processo chimico, ottenendo un residuo liquido e viscoso, circa il 10 %, da utilizzare come modificatore del bitume (Wang et al., 2018). In Spagna, inoltre, è stato studiato l'effetto degli oli di motore riciclati (RO) come ringiovanente del bitume ma si è, poi, deciso di proseguire la sperimentazione, utilizzando i WCO, considerati più promettenti. Di seguito si riportano i risultati emersi da alcuni casi studio che hanno preso in esame varie tematiche, tra le quali: l'influenza della qualità dei WCO sulle proprietà fisiche, chimiche e reologiche del legante convenzionale, oltre a quella della tipologia del pretrattamento e delle modalità di sperimentazione degli oli di scarto, al fine di poter confrontare i risultati ottenuti, ricercando similitudini e differenze nel comportamento.

3.4.1 Lavorazione dei WCO

Come già accennato nella parte introduttiva di questo paragrafo, si riportano di seguito i principali risultati, ottenuti da sei differenti casi studio, eseguiti tra il 2012 e il 2018, da sei gruppi di studiosi (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016; Haifang et al., 2013; Wang et al., 2018; Asli et al., 2012; Chen et al., 2014; Sun et al., 2016).

Oltre ad esporre le principali caratteristiche fisiche, chimiche e reologiche che sono state riscontrate in questo materiale (WCO), utilizzato come sostituto parziale del bitume, si pone l'attenzione anche sulle differenti lavorazioni che ha subito lo stesso, prima di essere aggiunto al legante standard, esponendo brevemente, anche, la preparazione alla quale è stato sottoposto il WCO, prima di essere sottoposto alla lavorazione vera e propria.

CASO STUDIO 1 (CS-1): (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016)

Nel primo caso studio analizzato, il legante di controllo preso in considerazione, è un bitume 60/70, mentre il WCO è stato recuperato da un ristorante. Il campione di olio "grezzo" è stato, poi, sottoposto a filtrazione, con durata totale di circa un'ora, in modo da rimuovere scarti di cibo, sporcizia ed impurità. Una volta ottenuto il WCO "puro", si è proceduto, quindi, all'unione di questo con il legante di controllo. Il bitume 60/70 è stato, in precedenza riscaldato in forno, ad una temperatura di 130 °C, al fine di ottenere una consistenza "liquida". In seguito, per giungere al legante modificato con WCO, si sono aggiunte al bitume 60/70 differenti percentuali di scarto di olio da cucina, in particolare: il 3 %, il 4 % ed il 5 % in peso, rispetto al legante di controllo. Infine, questi due materiali sono stati miscelati, mediante l'utilizzo di un miscelatore ad elica, con una velocità di miscelazione costante, pari a 1000 giri/min, per la durata di un'ora, ad una temperatura pari a 160 °C.

La velocità e la temperatura di miscelazione sono state valutate in base alle proprietà di fluidità del WCO, mentre la durata è stata scelta in modo da ottenere una miscelazione, il più omogenea possibile. In questo studio, sono state anche analizzate le caratteristiche della qualità dello scarto di olio, tramite il processo chimico della transesterificazione, analizzato più nel dettaglio nell'*Appendice IV*, oltre a quelle di un bitume invecchiato, con tecnica RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), per simulare un invecchiamento a breve termine, facendo, poi, i dovuti confronti.

CASO STUDIO 2 (CS-2): (Haifang et al., 2013)

In questo caso, il WCO è stato sottoposto ad un processo termochimico ad alta temperatura, detto di polimerizzazione, mentre per quanto riguarda i leganti di controllo, ne sono stati selezionati tre: un PG 58-28, un PG 76-22 ed infine un PG 82-16. In seguito, si è proceduto alla loro miscelazione, mediante un miscelatore ad elica, considerando diverse percentuali di scarto, per ciascuno dei leganti.

È stato aggiunto il 10 % ed il 60 % di WCO in peso, rispetto al legante, per quanto riguarda il PG 58-28, mentre per il PG 76-22 ed il PG 82-16 si sono considerati il 10 % ed il 30 % di WCO in peso.

Per quanto riguarda, invece, la miscelazione, questa è avvenuta a temperature differenti per ciascuno dei tre leganti analizzati, in particolare: 148 °C per il PG 58-28, 165 °C per il PG 76-22 e di 170 °C per il PG 82-16. Il caso studio in questione non riporta alcuna informazione nei confronti, invece, della durata e della velocità di miscelazione.

CASO STUDIO 3 (CS-3): (Wang et al., 2018)

In questo studio, si è preso a riferimento, come legante di controllo, un bitume 60/80 oltre ad uno modificato con il 4 % di SBS (Stirene Butadiene Stirene), con le seguenti proprietà fisiche:

Properties	Standard test methods	Test results
Penetration (0.1 mm) at 25 °C	ASTM D5	75
Softening point (°C)	ASTM D36	49
Ductility (mm) at 5 °C	ASTM D113	35.5
Viscosity (Pa s) at 135 °C	ASTM D4402	0.35

Figura 37 Proprietà fisiche del bitume 60/80 (Wang et al., 2018).

Come già accennato, la produzione di bio-carburanti è uno dei possibili riutilizzi dello scarto di olio da cucina. Infatti, dal processo di raffinazione dei WCO, si ottiene un sottoprodotto con aspetto simile ad un liquido oleoso e nero, da aggiungere, poi, al legante di base. La densità di questo residuo, valutata a 15 °C, è stata pari a 0.90 g/cm³ e la sua viscosità, valutata a 25 °C, è stata pari a 139.5 mPas.



Figura 38 Residuo del processo di raffinazione del WCO (Wang et al., 2018).

Dalle analisi preliminari, eseguite sullo scarto, si è notata la presenza di acqua e componenti volatili, che avrebbero potuto portare alla separazione del bio-olio e quindi, per evitare questo, si è proceduto alla distillazione del residuo, a 110 °C, prima di procedere alla miscelazione.

Sia il bitume 60/80 che quello modificato con SBS, sono stati preriscaldati in forno a 150 °C, per circa un'ora. In seguito, sono state aggiunte differenti percentuali di WCO: il 5 %, il 10 % ed il 15 % in peso, rispetto al legante di base, e si è proceduto alla successiva miscelazione, per circa 30 minuti, ad una temperatura costante di 140 °C, con una velocità pari a 4000 giri/min, con l'uso di un miscelatore ad elica, al fine di ottenere una miscela il più possibile omogenea.

Materials	Binder ID	Percent Weight of Bio-Oil Addition
Control 60/80 Asphalt Binder	70#	/
SBS Modified Asphalt Binder	SBS	/
Bio-Oil Modified Asphalt Binders	70# + 5%Bio	5% Bio-Oil
	70# + 10%Bio	10% Bio-Oil
	70# + 15%Bio	15% Bio-Oil
Bio-Oil Modified SBS Binders	SBS + 5%Bio	5% Bio-Oil
	SBS + 10%Bio	10% Bio-Oil
	SBS + 15%Bio	15% Bio-Oil

Figura 39 Analisi effettuate nel CS-2 (Wang et al., 2018).

CASO STUDIO 4 (CS-4): (Asli et al., 2012)

Nel seguente studio è stato utilizzato, come legante di controllo, un bitume 80/100 con le seguenti proprietà fisiche:

Test	Standard test methods	80/100
Penetration (0.1 mm) at 25 °C	ASTM D5	85
Softening point (°C)	ASTM D36	46
Penetration Index (PI)	-	-0.968
Ductility (mm) at 25 °C	ASTM D113	>100
Viscosity (mPa s) at 135 °C	ASTM D4402	306.5

Figura 40 Proprietà fisiche del bitume 60/80 (Asli et al., 2012).

Lo scarto di olio da cucina è stato recuperato da alcune abitazioni ed in seguito sottoposto ad un processo di filtraggio, in modo tale da separare l'olio dalle particelle in sospensione e dalle impurità.



Figura 41 Campione di WCO non filtrato (a sinistra) e di WCO dopo il processo di filtraggio (a destra) (Asli et al., 2012).

In questo studio si è riportata anche l'analisi chimica dei composti predominanti all'interno del WCO, in particolare: si è osservata la presenza massiccia di acido oleico (43.67 %), palmitico (38.35 %) e linoleico (11.39 %).

Fatty acid	Waste cooking oil (%)
Lauric acid (C12:0)	0.34
Myristic acid (C14:0)	1.03
Palmitic acid (C16:0)	38.35
Stearic acid (C18:0)	4.33
Oleic acid (C18:2n9c)	43.67
Linoleic acid (C18:2n6c)	11.39
γ -Linolenic acid (C18:3n6)	0.37
Linolenic acid (C18:3n3)	0.29
Cis-11-Eicosenoic acid (C20:1)	0.16
Heneicosanoic acid (C21:0)	0.08
TOTAL	100

Figura 42 Proprietà chimiche del WCO utilizzato nel CS-4 (Asli et al., 2012).

In questo caso si è analizzato, invece, l'effetto ringiovanente del WCO su un bitume invecchiato, utilizzando, però, un procedimento di invecchiamento non standard, diverso dall'RTFOT o dal PAV. In particolare, il bitume 80/100 è stato riscaldato in forno a 160 °C per circa due ore, in modo da ottenere una consistenza "liquida".

In seguito, il bitume è stato inserito in diversi cilindri, in modo da poter studiare differenti condizioni di invecchiamento, modificando i settaggi dei parametri di input e procedendo, poi, alla determinazione della classe di penetrazione, in modo da classificare i bitumi invecchiati. I parametri di input oggetto di modifica sono: la quantità di bitume (900-1200 g), la velocità di miscelazione (350-400 giri/min) e la durata (6-7 ore). Le classi di bitumi ottenuti, al termine del processo di invecchiamento sono tre:

- Bitume 50/60: quantità di bitume pari a 1200 g, velocità di miscelazione pari a 350 giri/min ed una durata pari a 6 ore.
- Bitume 40/50: quantità di bitume pari a 900 g, velocità di miscelazione pari a 400 giri/min ed una durata pari a 7 ore.
- Bitume 30/40: quantità di bitume pari a 900 g, velocità di miscelazione pari a 400 giri/min ed una durata pari a 7 ore.

Infine, ogni classe di bitume è stata miscelata con diverse percentuali di WCO, in particolare: l'1 %, il 2 %, il 3 %, il 4 % ed il 5 % in peso, rispetto al legante, utilizzando un miscelatore ad elica, per 30 minuti, ad una temperatura di 130 °C e con una velocità costante pari a 200 giri/min, al fine di ottenere un composto omogeneo.

CASO STUDIO 5 (CS-5): (Chen et al., 2014)

In questo caso, si sono presi a riferimento, come leganti di controllo: un bitume 60/80 (A0), un bitume 40/60 (B0) ed uno modificato con SBS (C0), riportando di seguito le rispettive proprietà fisiche:

Asphalt binder	Asphalt grade	Penetration (25 °C, 0.1 mm)	Softening point (°C)
A0	60-80	76	48.0
B0	40-60	54	50.5
C0	40-60 (SBS)	59	72.5

Ductility (5 °C, cm)	Brookfield viscosity (135 °C, Pa s)	Penetration index
36.6	0.35	-0.68
9.6	0.40	-0.89
59.1	2.10	3.68

Figura 43 Proprietà fisiche dei leganti di controllo A0, B0 e C0 nel CS-5 (Chen et al., 2014).

L'olio esausto (WCO), denominato W, è stato ripetutamente fritto e poi sottoposto ad un processo di filtraggio, andando così ad eliminare tutte quelle impurità che avrebbero potuto influenzare l'effetto ringiovanente del WCO, sui bitumi invecchiati.

Al termine di questo procedimento sono state valutate la densità e la viscosità, entrambe a 25 °C, ottenendo valori di 0.896 g/cm³ e 0.05 Pas. Di seguito, per una migliore comprensione, si riporta il flow chart in cui si evidenziano tutte le fasi eseguite durante la sperimentazione:

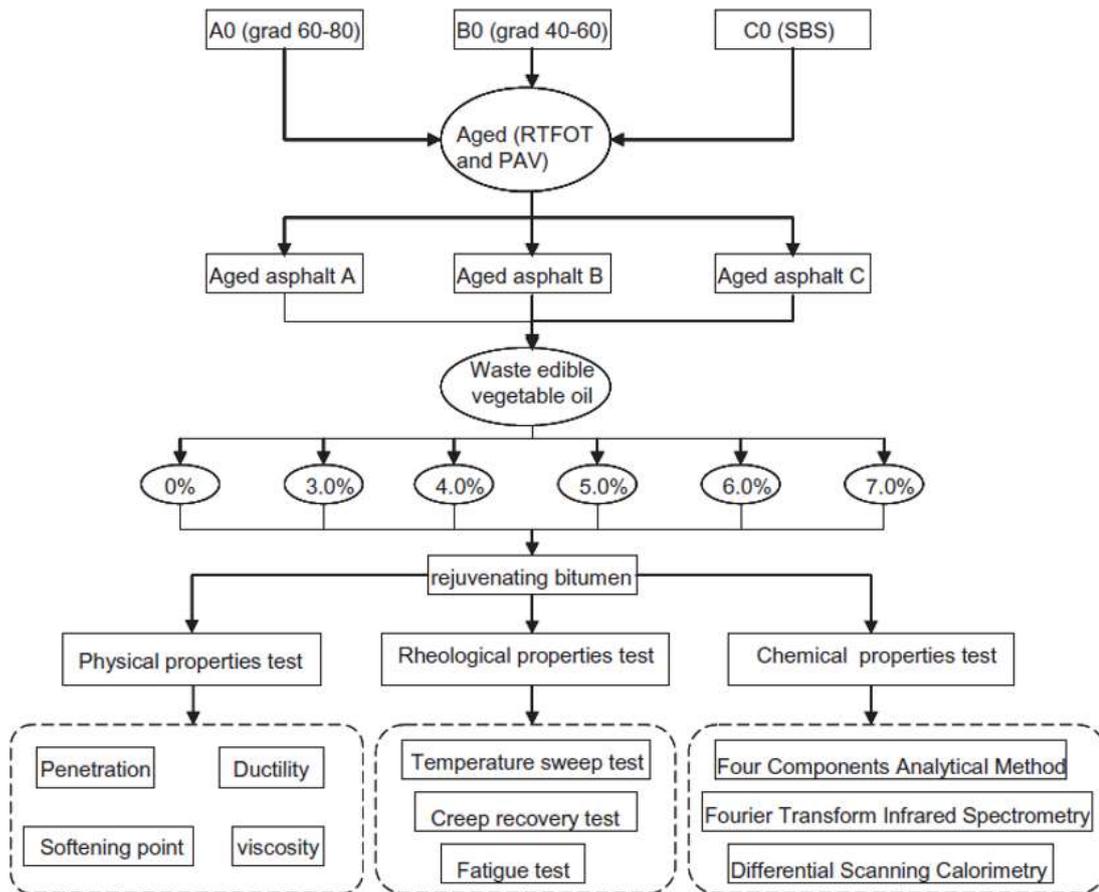


Figura 44 Processo sperimentale seguito nel CS-5 (Chen et al., 2014).

Come si evince dal flow chart riportato in precedenza, i tre bitumi A0, B0 e C0, hanno subito, per primo, un invecchiamento a breve termine, mediante tecnica RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*), e dopo uno a lungo termine, tramite tecnica PAV (*Pressure Aging Vessel*), ottenendo tre bitumi invecchiati denominati, nella sperimentazione, come A, B e C.

In seguito, si è proceduto all'aggiunta di diverse percentuali di WCO, con effetto ringiovanente, in particolare: il 3 %, il 4 %, il 5 %, il 6 % ed il 7 %, procedendo, poi, alla miscelazione mediante un miscelatore ad elica, ad una velocità costante di 1200 giri/min, per una durata di 15 minuti ad una temperatura pari a 130 °C. Una volta ottenuti i diversi campioni di bitume, modificati con WCO, è stato eseguito un test per ottenere informazioni sulle proprietà fisiche, reologiche e chimiche dei composti.

CASO STUDIO 6 (CS-6): (Sun et al., 2016)

In questa sperimentazione è stato utilizzato come legante di controllo un bitume 40/60, esponendone, di seguito, le sue proprietà fisiche:

Properties	Units	Requirements	Test results	Test methods
Penetration @25 °C	0.1 mm	40-60	43.0	T0604
Softening point	°C	≥ 49	52.3	T0606
Ductility @15 °C	cm	≥ 30	150	T0605
Flashing point	°C	≥ 260	310	T0611
Density @15 °C	g/cm ³	—	1.13	T0603
Wax content	%	≤ 2.2	1.7	T0615
After short-term aged (RTFOT)	Mass loss	≤ ±0.8	0.75	T0610
	Retained penetration ratio @25 °C	≥ 63	70.2	
	Retained ductility @15 °C	≥ 10	110	

Figura 45 Proprietà fisiche del bitume 40/60 usato nel CS-6 (Sun et al., 2016).

Come riportato nel CS-3 (Wang et al., 2018), anche in questo, il bio-olio è stato ottenuto come sottoprodotto della raffinazione del WCO, utilizzato per la produzione di bio-carburanti (bio-diesel). In questo caso, però, prima di giungere ai due prodotti finali (bio-carburante e sottoprodotto) sono stati eseguiti due step intermedi: la pre-esterificazione, mediante l'uso di metanolo (CH_3OH) e di acido solforico (H_2SO_4) ed in seguito una transesterificazione, mediante l'uso di metanolo (CH_3OH) e di idrossido di potassio (KOH), processi analizzati nel dettaglio nell'Appendice IV. Il processo di raffinazione dei WCO può essere schematizzato come segue:

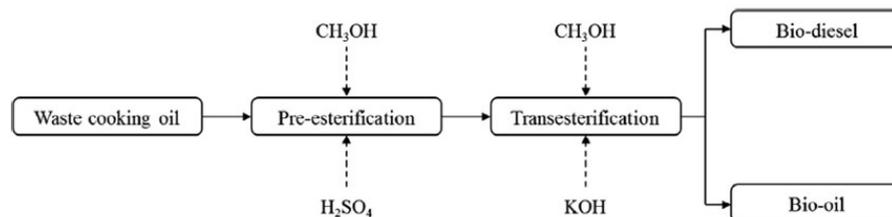


Figura 46 Processo di trasformazione del WCO in bio-olio (Sun et al., 2016).

Al termine della transesterificazione sono state eseguite analisi sul coprodotto ottenuto, evidenziando: un contenuto di umidità pari al 3.1 % in peso, una densità di 0.95 g/cm^3 (a 25 °C), una viscosità pari a 146.3 mPas ed infine un valore di pH pari a 6.1, quasi neutro. Sul bio-olio derivato sono state, poi, eseguite delle analisi chimiche per valutare le percentuali dei quattro componenti base, di un bitume: asfalteni, saturi, resine ed aromatici. In particolare, per il bio-olio si parlerà di bio-componenti.

I risultati di queste prove, sono riportati di seguito:

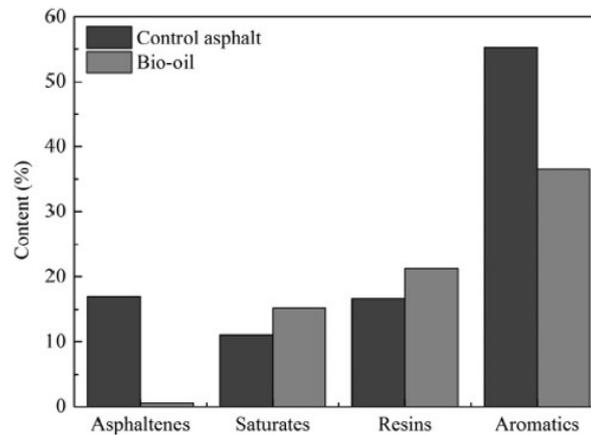


Figura 47 Risultati dell'analisi S.A.R.A (Sun et al., 2016).

Analizzando il grafico soprariportato, risulta evidente che il contenuto dei bio-asfaltini, all'interno del bio-olio sia minore dell'1 %, come anche quello dei bio-aromatici sia inferiore, mentre quello dei bio-saturi e delle bio-resine, risulti essere superiore, rispetto al legante di riferimento.

Si può inoltre notare come la somma delle quattro componenti non arrivi al 100%, poiché non possono essere quantificati i componenti volatili, dispersi durante il processo di separazione.

Infine, è stata eseguita la miscelazione con diverse percentuali di WCO, in particolare: il 2 %, il 4 %, il 6 % e l'8 % in peso, rispetto al legante di base, utilizzando una velocità di miscelazione di 5000 giri/min, una temperatura di 135 °C e una durata di lavorazione pari a 40 minuti, in modo da ottenere una miscela omogenea.

Binder types	IDs
Bio-oil product	BP
Control asphalt	A0
98% Control asphalt mixing with 2% bio-oil by weight	A2
96% Control asphalt mixing with 4% bio-oil by weight	A4
94% Control asphalt mixing with 6% bio-oil by weight	A6
92% Control asphalt mixing with 8% bio-oil by weight	A8
Asphalt modified by bio-oil	AMB

Figura 48 ID dei composti analizzati nel CS-6 (Sun et al., 2016).

Si riporta, come per il CS-5 (Chen et al., 2014), il flow chart in cui vengono evidenziate tutte le fasi eseguite, durante la sperimentazione:

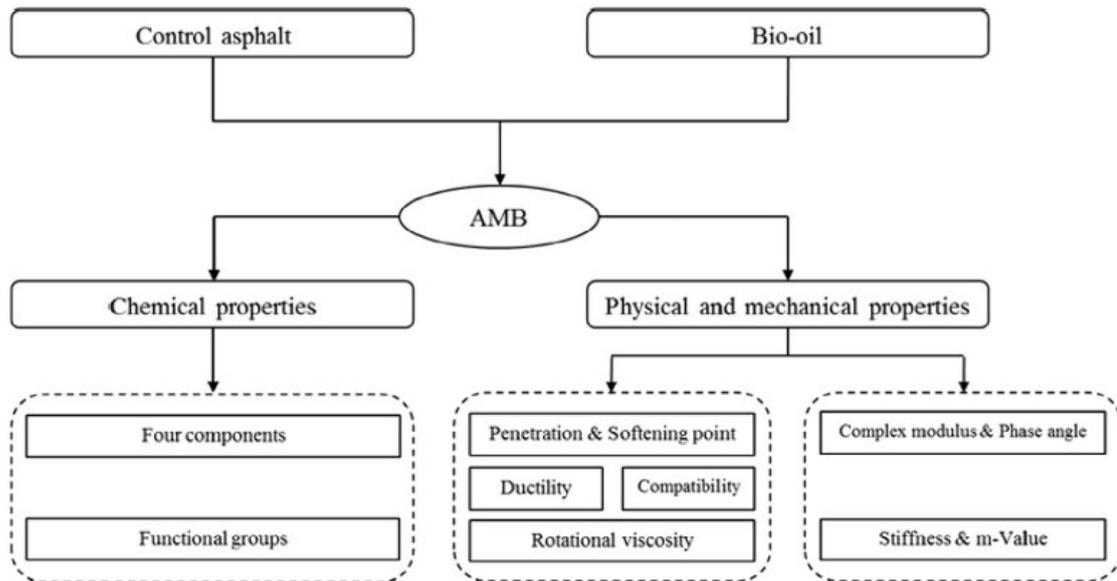


Figura 49 Processo sperimentale seguito nel CS-6 (Sun et al., 2016).

Infine, si riporta una tabella riassuntiva, nella quale si evidenziano:

- la tipologia del legante di base, espressa o in base alla classe di penetrazione o al Performance Grade (PG);
- le varie percentuali di WCO studiate ed analizzate nei vari articoli, presi in esame;
- le lavorazioni messe in atto sugli oli esausti, prima di eseguire il processo di miscelazione;
- le caratteristiche di miscelazione: la durata, espressa in minuti, la temperatura, espressa in gradi centigradi e la velocità di miscelazione, in giri/minuto.

Tabella 2 Riassunto delle principali caratteristiche contenute nei vari casi studio.

ID	Legante base	%WCO studiate	Lavorazione WCO	Miscelazione		
				t [min]	T [°C]	v [giri/min]
CS-1 ¹⁴	60/70	3-4-5 %	Filtraggio	60	160	1000
CS-2 ¹⁵	PG 58-28 PG 76-22 PG 82-16	10-60 % 10-30 % 10-30 %	Polimerizzazione	N.F.	148 165 170	N.F.
CS-3 ¹⁶	60/80 60/80 + SBS	5-10-15 %	Raffinazione	30	140	4000
CS-4 ¹⁷	50/60 40/50 30/40	1-2-3-4-5 %	Filtraggio	30	130	200
CS-5 ¹⁸	60/80 40/60 40/60 + SBS	3-4-5-6-7 %	Frittura ripetuta + Filtraggio	15	130	1200
CS-6 ¹⁹	40/60	2-4-6-8 %	Raffinazione	40	135	5000

“N.F.”: valore non fornito/non riportato nell’articolo.

¹⁴ (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

¹⁵ (Haifang et al., 2013).

¹⁶ (Wang et al., 2018).

¹⁷ (Asli et al., 2012).

¹⁸ (Chen et al., 2014).

¹⁹ (Sun et al., 2016).

3.4.2 Influenza della qualità del WCO sulle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante

Solamente uno dei sei articoli presi in esame, CS-1, (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016), ha analizzato in maniera approfondita l'influenza della qualità dell'olio di scarto da cucina, dimostratasi rilevante nei riguardi delle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante. Grazie a questo studio, infatti, si evince come le prestazioni del legante con WCO siano influenzate dalla qualità dello stesso, a causa del processo di degrado che questo subisce, durante l'attività di frittura. Il parametro principale che fornisce informazioni sulla qualità del WCO, è il valore acido²⁰ (V.A.), ricavabile attraverso l'*Acid Value Test* o, in maniera del tutto analoga, riferendosi al contenuto percentuale degli acidi grassi liberi²¹ (FFA - *Free Fatty Acids*). Un olio esausto può, quindi, essere considerato di buona qualità se possiede un valore acido o una % FFA, il più basso possibile. Nel caso in cui si ottenesse, invece, un WCO con un elevato V.A., lo stesso può essere chimicamente modificato in modo da diminuire il più possibile tale valore, utilizzando il trattamento della transesterificazione (vedere *Appendice IV*). L'olio preso a riferimento in questo studio è stato modificato chimicamente, mediante il processo anzi detto, per andare, così, a diminuire il valore di V.A. e degli FFA.

Designation	Volume of KOH (mL)	Acid Value (mL/g)	Conversion to FFA (%)
Untreated	14.8	1.65	0.83
Treated	4.8	0.54	0.27

Figura 50 Risultati dell'Acid Value Test sul WCO utilizzato nel CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

²⁰ Il valore acido (V.A.) è definito come il numero di milligrammi di idrossido di potassio (KOH) necessari per neutralizzare gli acidi grassi liberi presenti in un grammo di grasso, i quali si formano normalmente durante la decomposizione dei trigliceridi. Il valore acido è, anche, espresso in percentuale degli acidi grassi liberi (% FFA) calcolati come acido oleico, laurico, ricinoleico e palmitico.

Il valore acido, espresso in mg KOH/g, è direttamente proporzionale al volume del reagente consumato, detto titolante, alla normalità del reagente ed al peso molecolare degli acidi grassi mentre, risulta essere inversamente proporzionale al peso del campione.

²¹ Vengono definiti acidi grassi liberi (FFA – *Free Fatty Acids*), gli acidi grassi, quando si trovano nella loro forma libera, cioè non legati ad altre specie chimiche.

Come si evince dalla tabella sopra riportata, a seguito del processo della transesterificazione, sia la quantità del valore acido che la percentuale degli FFA risultano essere molto diminuiti, passando da 1.65 mL/g a 0.54 mL/g per quanto riguarda il V.A. mentre da 0.83 % a 0.27 %, per gli FFA.

Per poter eseguire una sperimentazione più completa, si sono considerati sia campioni di bitume di base 60/70 non invecchiati che invecchiati (RTFOT), per valutare se ci fossero differenze tra il WCO trattato e quello non trattato. Dal punto di vista visivo, la differenza tra i due oli, trattato e non, è notevole: quello trattato risulta essere di un colore giallo acceso, mentre quello non trattato risulta essere di un colore marrone scuro.



Figura 51 WCO non trattato (a sinistra) e WCO trattato (a destra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

Per quantificare eventuali differenze, sono stati eseguiti vari test per indagare sia le caratteristiche fisiche (prova di penetrazione, prova di rammollimento, prova di viscosità) che quelle reologiche (DSR), riferendosi sia a campioni di oli trattati e non, oltre a campioni invecchiati e non, valutando tutte le combinazioni possibili.

CARATTERISTICHE FISICHE: PROVA DI PENETRAZIONE

Questa prova è stata effettuata sia sui campioni non invecchiati (trattati e non) sia su quelli invecchiati (trattati e non), permettendo di esaminarne la consistenza. Di seguito si riporta una tabella con i valori numerici, espressi in dmm, al fine di osservare le differenze e le variazioni percentuali tra l'uso di un WCO trattato ed uno non trattato.

Tabella 3 Risultati della prova di penetrazione di un campione non invecchiato CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

Campione non invecchiato			
% WCO	non trattato	trattato	$\Delta\%$
3 %	99 dmm	71 dmm	28 %
4 %	136 dmm	73 dmm	46 %
5 %	153 dmm	74 dmm	52 %

La penetrazione del legante di base non invecchiato, risulta essere pari a 62 dmm, mentre quella del campione invecchiato pari a circa 30 dmm. All'aumentare della percentuale di WCO impiegato, la penetrazione aumenta sia nel caso di olio non trattato che di quello trattato. Questo aumento comporta che, al crescere della quantità di WCO, il bio-legante mostri una consistenza sempre più morbida.

Se si osserva, invece, il legante con WCO trattato, si nota come all'aumentare della quantità di olio, si ottenga ugualmente una crescita del valore di penetrazione, anche se in maniera non così evidente, come avvenuto, invece, in precedenza. In questo caso i valori delle penetrazioni, risultano essere molto vicine al range di quelli del legante di base 60/70.

Passando dall'utilizzo di un olio non trattato ad uno trattato, si nota come il legante sembri essere un po' più rigido. Questa caratteristica è dovuta, essenzialmente, alla bassa saturazione dell'olio trattato, che sviluppa, delle forti interazioni interne, traducendosi, poi, in una maggior consistenza e quindi, in valori di penetrazione minori. Il legante con WCO trattato, di consistenza più dura, mostra, quindi, un miglior comportamento nei confronti, per esempio, dell'ormaiamento.

Per quanto riguarda i campioni invecchiati, si nota lo stesso trend osservato prima, ma su scala minore. I valori di penetrazione degli oli non trattati, risultano essere maggiori rispetto a quelli trattati, aumentando al crescere della quantità di WCO. Di seguito viene riportato il grafico in cui sono evidenziati tutti i valori ottenuti dalla prova di penetrazione.

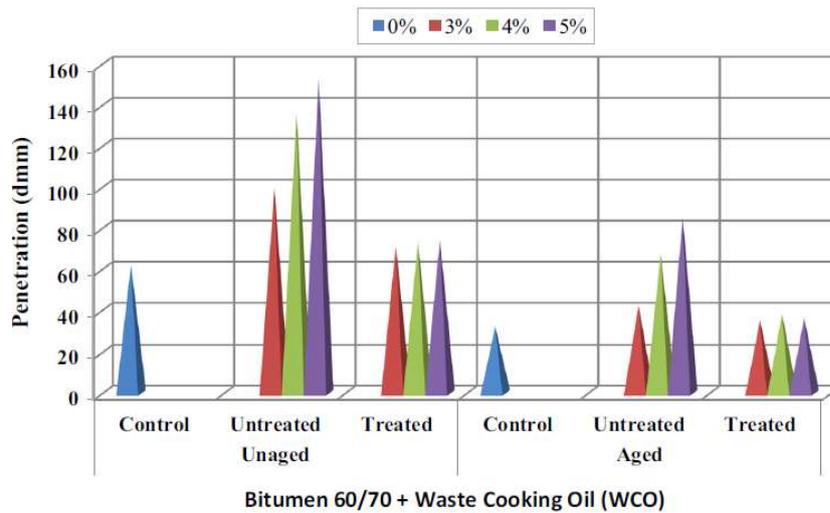


Figura 52 Risultati della prova di penetrazione CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

PROVA DI RAMMOLLIMENTO

Questa prova è stata effettuata sia sui campioni non invecchiati (trattati e non) che su quelli invecchiati (trattati e non), permettendo di comprendere il comportamento, alle alte temperature, del bio-legante. Di seguito, i valori ottenuti dalla prova di rammollimento:

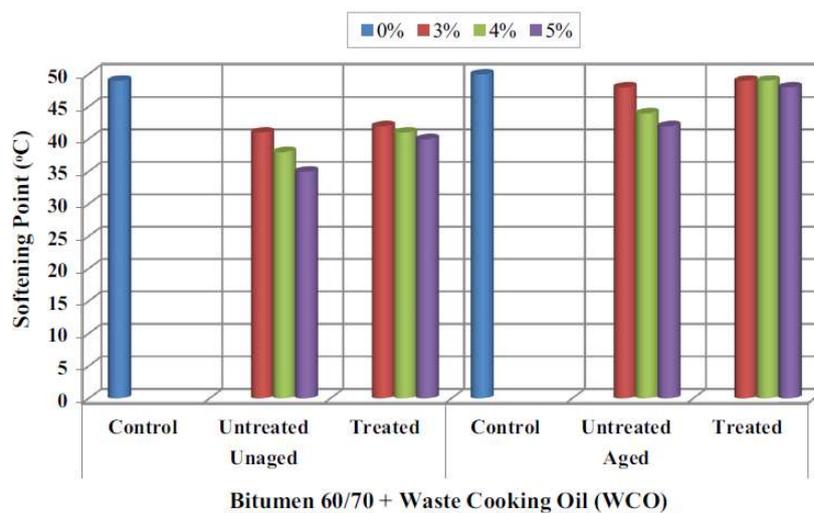


Figura 53 Risultati della prova di rammollimento CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

Tabella 4 Risultati della prova di rammollimento di un campione non invecchiato CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

% WCO	Campione non invecchiato	
	non trattato	trattato
3 %	41 °C	42 °C
4 %	38 °C	41 °C
5 %	35 °C	40 °C

Come si evince dal grafico e dalla tabella sopra riportati, all'aumentare della percentuale di WCO, la temperatura di rammollimento diminuisce, poiché si considerano leganti con consistenze più "morbide" e, quindi, con alti valori di penetrazione. Si nota, inoltre, che i provini con WCO trattati, posseggono una più alta temperatura di rammollimento rispetto a quelli non trattati, comportamento positivo in quanto relativo a materiali di consistenza più rigida. Per quanto concerne i campioni invecchiati, la temperatura di palla e anello è diminuita uniformemente all'aumentare della quantità di WCO, come evidenziato, per i campioni non invecchiati. Si nota, però, che i campioni con WCO trattato, posseggono, sempre, una temperatura di rammollimento maggiore rispetto a quelli con WCO non trattato, mostrando come l'aggiunta di olio modificato, apporti benefici al bio-legante, in termini di minore penetrazione e quindi, un migliore comportamento nei confronti dell'accumulo di deformazioni permanenti. Infine, per i campioni di olio trattato (caso legante invecchiato), si nota un aumento generale delle temperature di rammollimento, arrivando ad eguagliare, circa, il valore di quelle relative al legante di base 60/70.

PROVA DI VISCOSITA'

Questa prova è stata eseguita sia sui campioni non invecchiati (trattati e non) sia su quelli invecchiati (trattati e non), in modo da determinare la resistenza al fluire. Di seguito viene riportato il grafico in cui sono visualizzati tutti i valori, ottenuti dalla prova di viscosità.

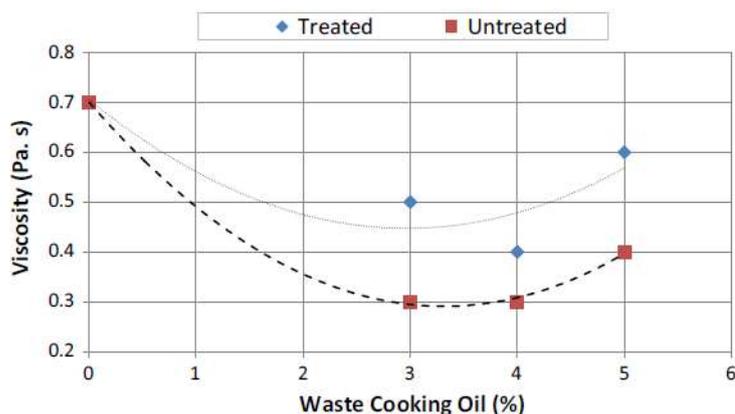


Figura 54 Risultati della prova di viscosità CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

Come evidente, al variare della quantità del WCO, la viscosità mostra un andamento decrescente oltre ad una sensibile riduzione, se confrontata con quella del legante di base (0.7 Pas). Sia per l'olio trattato che per quello non trattato, il trend risulta essere decrescente, anche se in misura maggiore per quelli non trattati, raggiungendo un punto di minimo per percentuali di WCO tra il 3 % ed il 4 %, osservando, poi, un aumento per valori di WCO maggiori del 4 %, valore comunque inferiore rispetto a quello del legante di base.

Tabella 5 Risultati della prova di viscosità (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

% WCO	Campione non invecchiato	
	non trattato	trattato
3 %	0.3 Pas	0.5 Pas
4 %	0.3 Pas	0.4 Pas
5 %	0.4 Pas	0.6 Pas

Dal punto di vista economico, però, una bassa viscosità risulta essere favorevole, in quanto porta alla diminuzione della temperatura di miscelazione e di compattazione della miscela, con conseguente risparmio, in termini di costi. Tuttavia, però, l'aggiunta eccessiva di olio di scarto da cucina non è vantaggioso, in quanto determina un legante con una consistenza troppo morbida e quindi con possibili problemi di ormaiamento.

CARATTERISTICHE REOLOGICHE: RESISTENZA ALL'ORMAIAMENTO

Utilizzando un DSR sono stati valutati sia la norma del modulo complesso ($|G^*|$) che l'angolo di fase (δ), in modo tale da caratterizzare il comportamento visco-elastico del bio-legante. Per lo studio del comportamento di questo, nei confronti dell'accumulo delle deformazioni permanenti, il parametro preso in esame è stato: $|G^*|/\sin\delta$. In generale, per evitare la comparsa di ormaiamento sarebbe auspicabile che il rapporto fosse il più alto possibile, in quanto lo scopo principale è quello di ottenere leganti con elevati valori di $|G^*|$ e bassi valori dell'angolo δ , al fine di considerare materiali con comportamento il più possibile elastico, per accumulare, così, meno deformazioni.

Considerando, invece, il rapporto $|G^*|/\sin\delta$ con riferimento alla variazione di temperatura, si nota, sperimentalmente, che all'aumentare della stessa, il rapporto diminuisce. Un'altra informazione ricavabile, dall'osservazione del grafico sotto riportato, sta nel fatto che fissata la temperatura, all'aumentare della percentuale di WCO, il rapporto $|G^*|/\sin\delta$ diminuisce, in quanto si fa riferimento a leganti con consistenze più morbide, quindi con valori di penetrazione maggiori e temperature di rammollimento minori. Questi leganti, pertanto, sono soggetti a maggiori deformazioni permanenti, trasmesse dal passaggio del traffico veicolare, criticità nei confronti della resistenza all'ormaiamento.

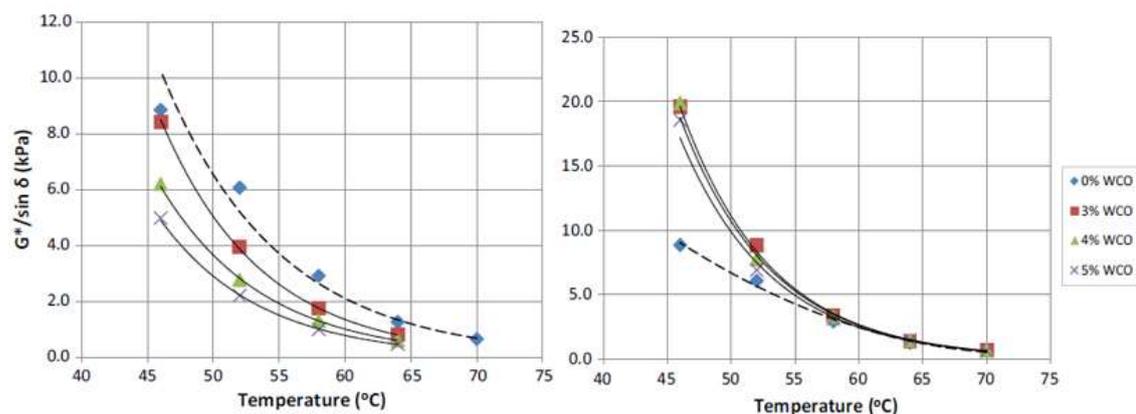


Figura 55 Resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti con WCO trattato (a destra) e WCO non trattato (a sinistra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).



Figura 56 Temperatura di rottura per leganti con WCO trattati e WCO non trattati (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

Nel grafico di sinistra, riportato nella pagina precedente, riguardante la variazione del rapporto $|G^*|/\sin\delta$ in funzione della temperatura, si evidenzia come gli oli non trattati, abbiano raggiunto la temperatura di rottura ben prima, rispetto al legante di base, in particolare quello bio a 64 °C, mentre quello standard a 70 °C. Questo, invece, non si osserva nel caso di leganti con WCO trattati (grafico di destra) i quali mostrano, in effetti, la stessa temperatura di rottura di quello base. Nel caso di WCO non trattato si hanno performance minori rispetto al bitume convenzionale, mentre per WCO trattati si osservano rapporti di $|G^*|/\sin\delta$ ben maggiori rispetto al legante di base.

In conclusione, si può osservare come l'utilizzo di WCO trattati mediante transesterificazione, abbiano mostrato una minore penetrazione, una consistenza più dura, una temperatura di rammollimento maggiore, portando, quindi, ad un miglior comportamento alle alte temperature, uno dei parametri critici nel design delle pavimentazioni.

INDICE DI INVECCHIAMENTO

L'indice di invecchiamento (AI) indica la suscettibilità all'invecchiamento di un materiale descrivendone lo sviluppo della rigidità, a differenti periodi della vita utile della pavimentazione.

Questo indice può essere valutato attraverso la seguente espressione:

$$AI = \frac{PFI}{PFNI}$$

dove: *PFI* rappresenta la proprietà fisica del legante invecchiato, mentre *PFNI* rappresenta la medesima proprietà, di quello non invecchiato. Di seguito, i grafici con i risultati della sperimentazione:

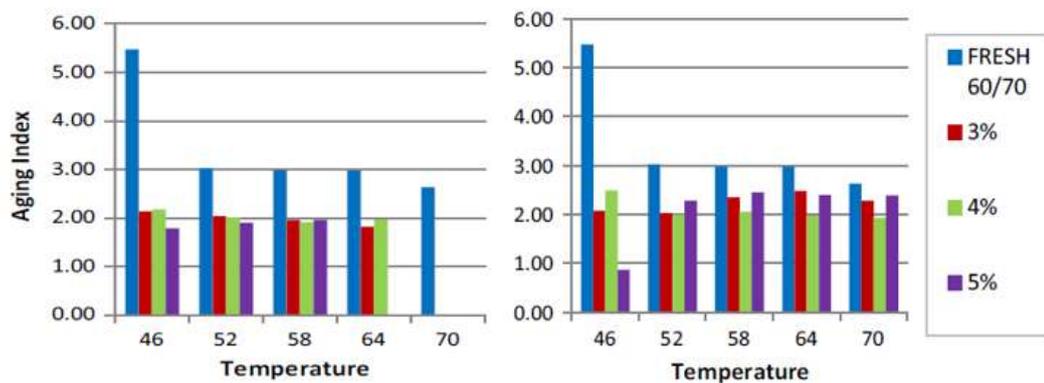


Figura 57 Indice di invecchiamento con WCO non trattato (a sinistra) e un WCO trattato (a destra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).

L'indice (AI) è stato valutato, prendendo a riferimento differenti temperature, da 46 °C a 70 °C, sia per il bio-legante con WCO trattato (a destra) che con quello non trattato (a sinistra). Il valore di AI per il bitume di riferimento 60/70 diminuisce all'aumentare della temperatura, variando da: 5.47 a 2.63, passando per 3.03, 2.99 e 2.98. La qualità del WCO utilizzato, in questo caso, risulta essere essenziale, fungendo da antiossidante, soprattutto se questo possiede un basso valore acido, avendo così un maggior effetto protettivo contro i danni dovuti al naturale processo di ossidazione, a cui sono sottoposti tutti i leganti stradali. Un basso valore di indice di invecchiamento AI, limite auspicabile da raggiungere, corrisponde ad una minore suscettibilità all'invecchiamento. Come si evince dai due grafici sopra riportati, sia per i leganti con WCO trattati che quelli con WCO non trattati, l'indice di invecchiamento risulta essere, comunque, minore rispetto a quello del legante di base 60/70, risultato promettente per quanto riguarda l'utilizzo dei WCO come sostitutori parziali del bitume.

3.4.3 Caratterizzazione fisica e reologica dei bio-leganti a base di WCO in condizioni aged e unaged

Mentre nel paragrafo precedente, è stata analizzata l'influenza della qualità del WCO, mediante trattamenti chimici, sulle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante, in questo, invece, non si prenderanno in considerazione i WCO modificati chimicamente, bensì si analizzeranno solamente le proprietà fisiche e reologiche di leganti modificati, in condizioni aged e unaged. In particolare, si eseguirà una panoramica generale sui risultati ottenuti, nei differenti casi studio, dal CS-2 al CS-6 (Haifang et al., 2013; Wang et al., 2018; Asli et al., 2012; Chen et al., 2014; Sun et al., 2016), ricercando punti in comune nei relativi risultati, considerando anche le diverse tecniche con cui sono stati lavorati gli scarti di olio da cucina, prima di essere uniti, poi, al legante di base. Questo potrebbe essere interessante per comprendere se la tipologia di lavorazione eseguita sugli oli, potrebbe influire, in qualche modo, sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del bio-legante. Anche in questo paragrafo, si seguirà la medesima struttura proposta nel precedente, prendendo in esame, in primis, i risultati relativi alle prove fisiche (prova di penetrazione, prova di rammollimento, prova di viscosità e prova di duttilità) ed in seguito, quelli derivanti da quelle reologiche (la norma del modulo complesso, sia di taglio $|G^*|$ che assiale $|E^*|$, l'angolo di fase δ , il modulo di rigidità S), analizzando, dove possibile, sia i risultati in condizioni aged che in quelle unaged.

CARATTERISTICHE FISICHE: PROVA DI PENETRAZIONE

Di seguito si riportano i risultati, derivanti dalla prova di penetrazione, eseguita durante le diverse sperimentazioni. In particolare, una di queste ha preso in considerazione un legante non invecchiato (CS-6; Sun et al., 2016) e due, invece, hanno lavorato su un legante invecchiato (CS-4; Asli et al, 2012 e CS-5; Chen et al., 2014).

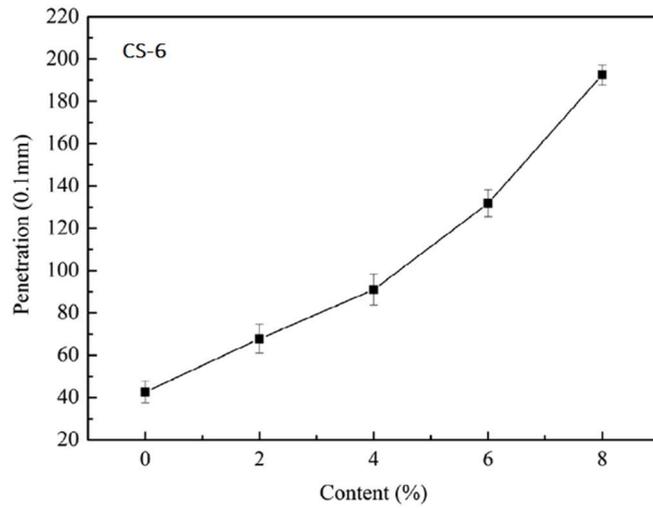


Figura 58 Risultati prova di penetrazione CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).

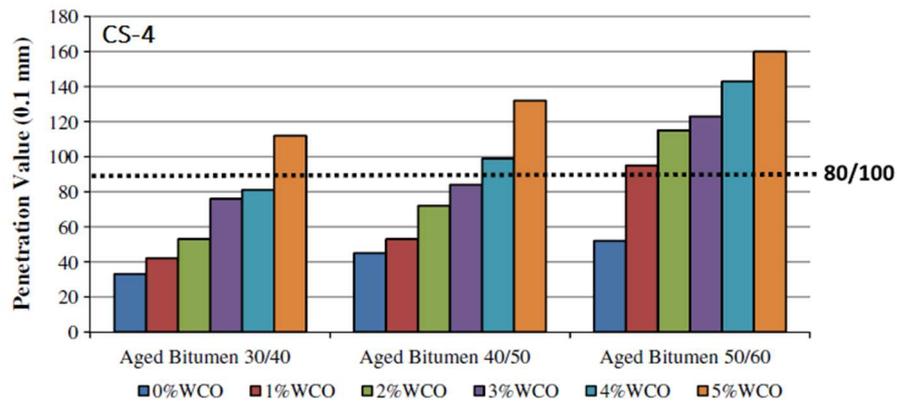


Figura 59 Risultati prova di penetrazione CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).

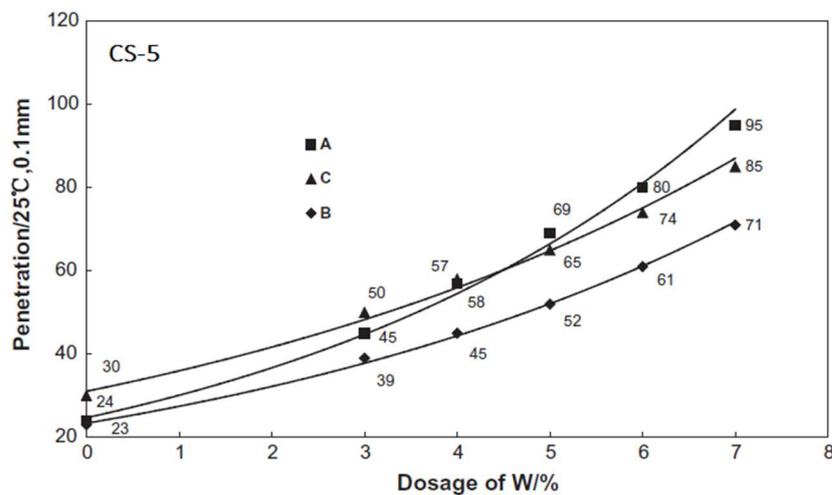


Figura 60 Risultati prova di penetrazione CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

I tre grafici sopra riportati, fanno riferimento a tre differenti sperimentazioni, che hanno analizzato classi e tipologie di pretrattamento differenti, come già indicato in precedenza. Quello che si nota, è che gli andamenti risultano essere i medesimi, sia per i casi invecchiati (Asli et al., 2012 - CS-4 e Chen et al., 2014 - CS-5) che per quelli non (Sun et al., 2016 - CS-6), ovvero: con l'aumento del contenuto del WCO si osserva una crescita del valore di penetrazione, ottenendo dei bio-leganti di consistenza, sempre più, morbida. In generale, l'aumento del valore di penetrazione potrebbe portare a successivi problemi per quanto riguarda la resistenza del legante nei confronti dell'accumulo di deformazioni permanenti. Nel primo grafico, caso unaged, si nota che, superato il 4 % di WCO, si ha un incremento repentino del valore di penetrazione. Nel secondo e terzo grafico, casi aged, si osserva come gli scarti di oli possano essere utilizzati come ringiovanenti del legante base e la maggiore o minore penetrazione sia data dalla natura del legante di riferimento considerato. Per esempio, nel CS-4, Asli et al., 2012, (secondo grafico sopra riportato), è stato eseguito un processo di invecchiamento non convenzionale, sul legante di base 80/100, ottenendo tre nuove classi di leganti: un 30/40, un 40/50 ed un 50/60. Osservando la figura si nota come, in base alla tipologia di classe di legante, variano anche le percentuali ottimali di WCO necessarie per raggiungere, per esempio, un grado di penetrazione simile e a quello base. Infatti, si passa da una percentuale dell'1 % per la classe 50/60, al 3 % per la classe 40/50 ed al 4 % per quella 30/40. Analizzando, invece, i risultati del CS-5, Chen et al., 2014, (terzo grafico), ottenuti con processi di invecchiamento standard (RTFOT e PAV), si nota che, all'aggiunta dello stesso quantitativo di WCO, l'incremento del valore di penetrazione non è il medesimo: nel legante A (60/80), questo è più evidente mentre, nel caso C (legante modificato con SBS), questo risulta essere un effetto, quasi secondario.

PROVA DI RAMMOLLIMENTO

Di seguito si riportano i risultati, derivanti dalla prova di rammollimento, eseguiti durante diverse sperimentazioni. In particolare, una di queste ha considerato un legante non invecchiato (CS-6; Sun et al., 2016) e due, invece, hanno lavorato su un legante invecchiato (CS-4; Asli et al., 2012 e CS-5; Chen et al., 2014).

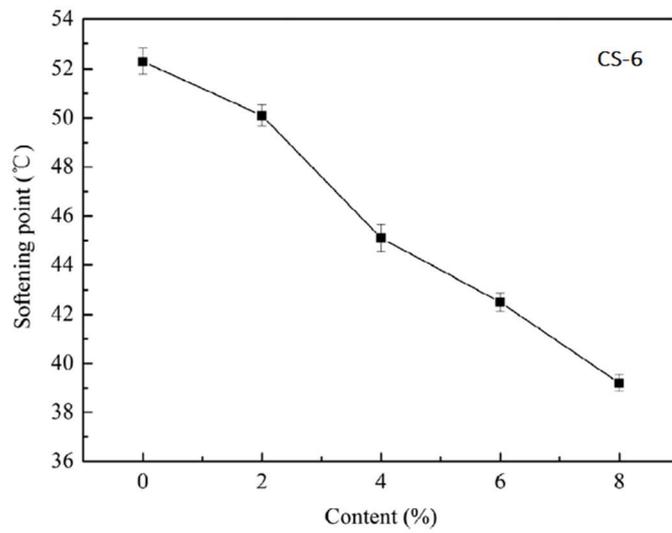


Figura 61 Risultati prova di rammollimento CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).

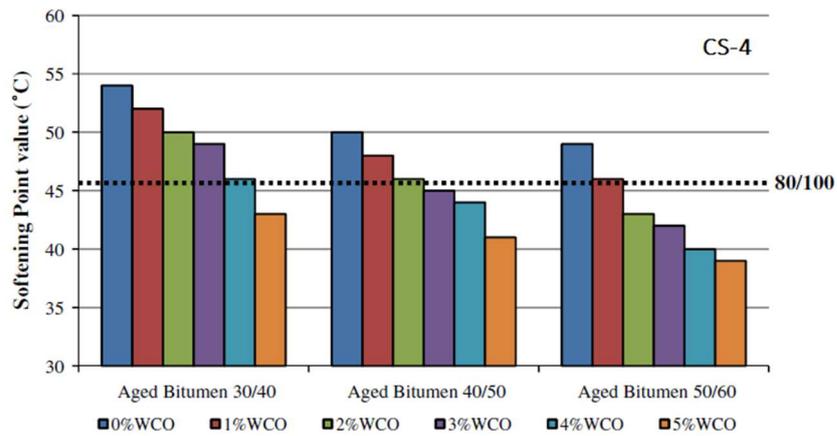


Fig. 4. Relationship of softening point value and different aged bitumen groups.

Figura 62 Risultati prova di rammollimento CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).

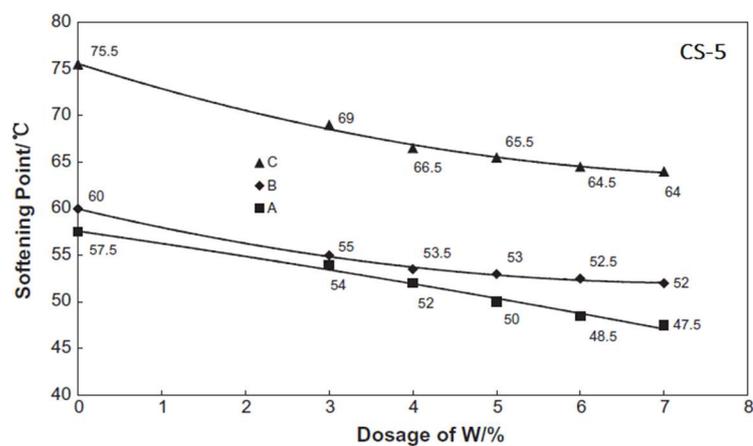


Figura 63 Risultati prova di rammollimento CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

I tre grafici sopra riportati, fanno riferimento a tre differenti sperimentazioni, che hanno analizzato classi di leganti differenti, come già indicato in precedenza. Quello che però può essere notato, è che gli andamenti risultano essere gli stessi, sia per i casi invecchiati (Asli et al., 2012 - CS-4 e Chen et al., 2014 - CS-5) che per quelli non (Sun et al., 2016 - CS-6), ovvero: all'aumentare del contenuto di WCO, la temperatura di rammollimento tende a diminuire, in maniera più o meno uniforme. In generale, più la temperatura di rammollimento è bassa e più si avranno valori di penetrazione alti, individuando così leganti morbidi. La temperatura diminuisce in quanto, i bitumi invecchiati posseggono maggiori molecole ad elevato peso molecolare, dovuto al processo di invecchiamento, rendendo per questo i leganti di consistenza più dura. Nel primo grafico (caso non invecchiato), si riportano i risultati del CS-6 (Sun et al., 2016) dove si osserva che, passando dalla percentuale del 2 % a quella del 4 %, si ottiene una brusca variazione di temperatura, non rilevata per le altre percentuali di WCO. Nel secondo grafico (caso invecchiato), si riporta, pari a 46 °C, il valore della temperatura di palla e anello, del legante di base 80/100. In questo modo si comprende, come detto in precedenza per i leganti invecchiati, che la percentuale di WCO ottimale risulta essere differente in base alle diverse classi del legante. In questo studio si evince, infatti, come aggiungendo l'1 % di WCO nella classe 50/60, oppure usandone il 2 % per la classe 40/50 o il 4 % per la classe 30/40, si raggiunga il valore del legante di base 80/100. Nel terzo grafico (caso invecchiato), infine, si nota che, per la prova di rammollimento, si raggiunga una variazione maggiore del legante A (60/80) ed una minore del legante C (modificato con SBS), nei confronti della temperatura di rammollimento.

PROVA DI VISCOSITA'

Di seguito si riportano i risultati, derivanti dalla prova di viscosità, eseguita durante le diverse sperimentazioni. In particolare, una che ha considerato un legante non invecchiato (CS-6; Sun et al., 2016) e due, invece, che hanno lavorato su un legante invecchiato (CS-4; Asli et al, 2012 e CS-5; Chen et al., 2014). In genere, si nota una diminuzione della viscosità all'aumentare della quantità di WCO inserito all'interno del legante di base. Come evidente, la viscosità è un parametro fortemente dipendente dalla temperatura e quindi il materiale è stato testato considerandone differenti valori.

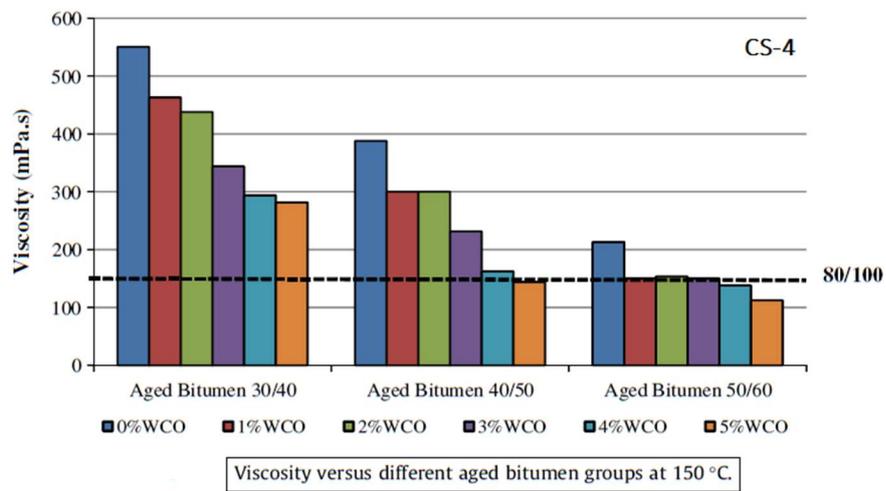
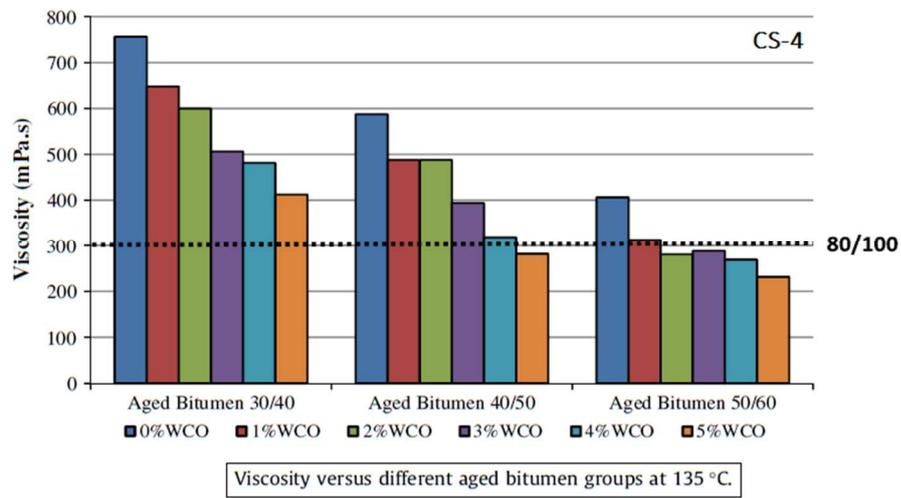
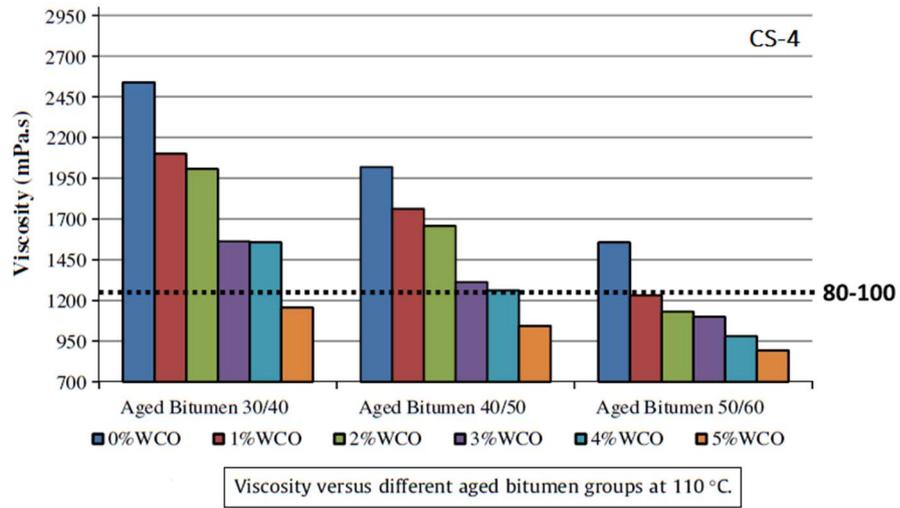


Figura 64 Risultati prova di viscosità CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).

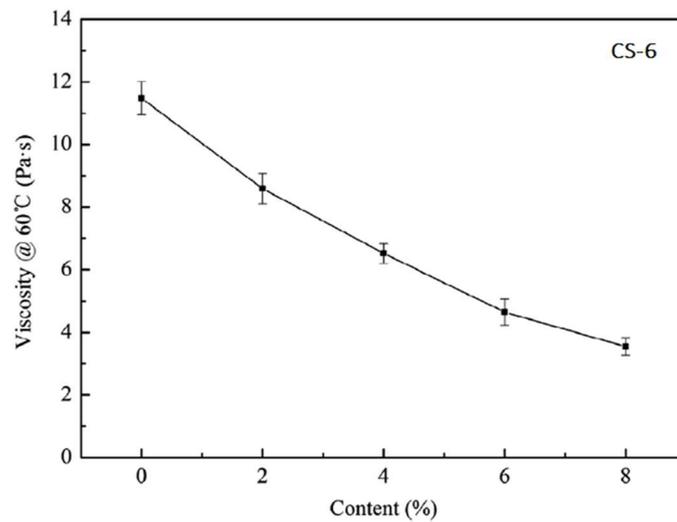


Figura 65 Risultati prova di viscosità CS-6 (60 °C) – caso unaged (Sun et al., 2016).

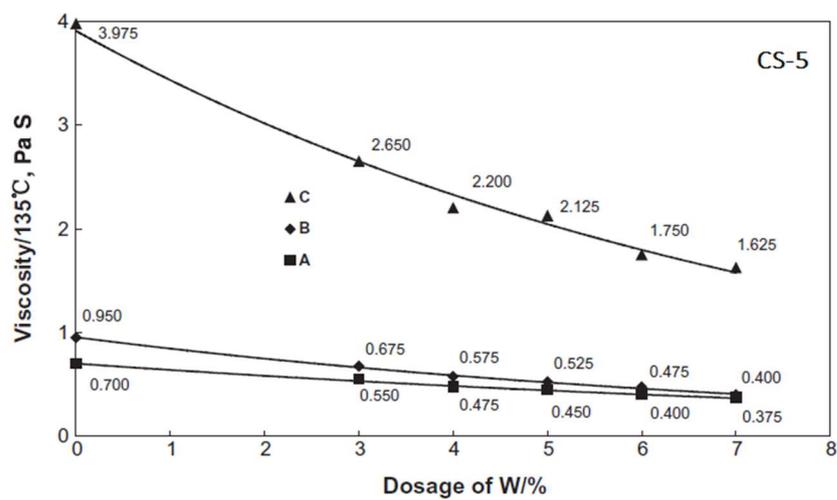


Figura 66 Risultati prova di viscosità CS-5 (135 °C) – caso aged (Chen et al., 2014).

Confrontando i grafici relativi alla temperatura di rammollimento e quelli relativi alla viscosità, si osserva come questa, aumenti all'aumentare della temperatura di palla e anello, per tutti i casi analizzati. Nel CS-4 (Asli et al., 2012) (caso invecchiato) sono state considerate tre temperature di prova: 110 °C, 135 °C e 150 °C. Questa scelta è stata effettuata in quanto, per un HMA (*Hot Mix Asphalt*), la temperatura media di miscelazione e di posa è di circa 135 °C e di conseguenza, sono state utilizzate altri due valori nello stesso intorno, per valutare se ci fossero o meno grandi differenze di comportamento.

Come evidenziato dai grafici, riportati nella precedenti pagine, all'aumentare della temperatura di prova, il valore della viscosità diminuisce in maniera repentina. Per esempio, considerando il legante di base (0 % di WCO), si passa dal valore di circa 2450 mPas, a 110 °C, a circa 550 mPas, a 150 °C. Oltre alla diminuzione dovuta all'aumento della temperatura, si osserva un'ulteriore riduzione della stessa, all'aumentare della percentuale di WCO. Per la classe di leganti 50/60, si raggiunge il valore di viscosità del legante di base 80/100, aggiungendo soltanto l'1 % di WCO, per tutte e tre le temperature prese in esame, passando al 4 %, per esempio, per la classe 40/50.

Come già detto, aumentando la quantità di WCO inserita all'interno del legante di base, si osserva una diminuzione del valore di viscosità. Questo fa sì che i bio-leganti siano molto più *eco-friendly* rispetto a quelli convenzionali, in quanto si abbassano, di conseguenza, anche le temperature di miscelazione, di compattazione e di messa in opera, andando a risparmiare sui costi e sull'energia adoperata. Però, un'eccessiva quantità di WCO andrebbe, allo stesso tempo, a ridurre le prestazioni adesive e di servizio (penetrazione e duttilità) del legante, nei confronti degli aggregati presenti nella miscela. Quindi, l'aggiunta del WCO, dovrebbe ricadere in alcuni range ottimali, individuati per ciascuna miscela e grado di invecchiamento. Nel terzo grafico (caso invecchiato) si nota come il legante C (modificato con SBS), mostri una diminuzione molto più evidente rispetto all'A e al B, non modificati.

PROVA DI DUTTILITA'

Di seguito si elencano i risultati, derivanti dalla prova di duttilità, eseguita durante le diverse sperimentazioni. In particolare, una ha considerato un legante non invecchiato (CS-6; Sun et al., 2016) e una, invece, un legante invecchiato (CS-5; Chen et al., 2014).

In generale, la duttilità, sia nel caso di leganti invecchiati che non, aumenta all'aumentare della quantità di WCO utilizzato. Anche in questo caso, però, occorrerebbe raggiungere delle quantità ottimali, altrimenti la presenza del WCO, potrebbe tradursi in uno svantaggio, anziché in un vantaggio.

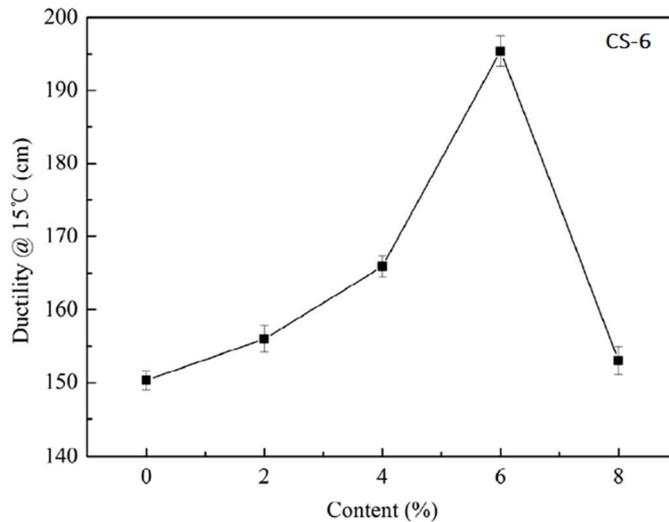


Figura 67 Risultati prova di duttilità CS-6 (15 °C) – caso unaged (Sun et al., 2016).

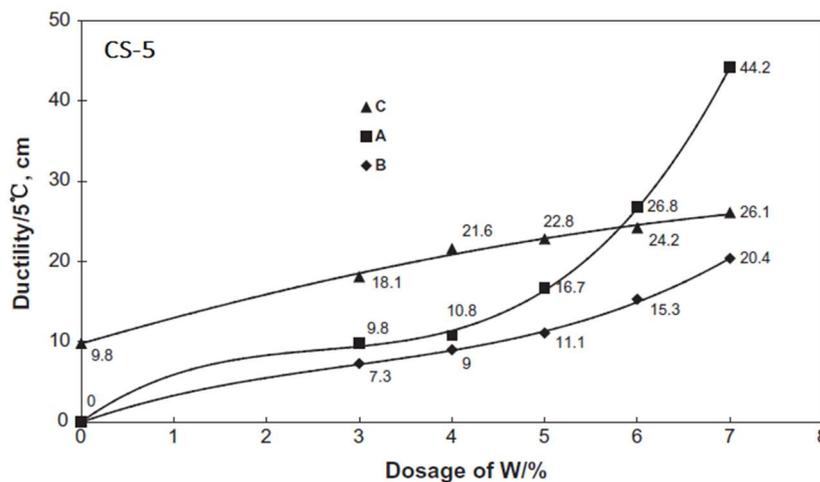


Figura 68 Risultati prova di duttilità CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

Nel primo grafico (caso non invecchiato), si osserva un rapido aumento della duttilità in funzione della % WCO, che, però, si riduce bruscamente superando il contenuto di olio pari al 6 %. Il punto anomalo, con l'8 % di WCO, potrebbe essere dovuto, a detta dei ricercatori, alla separazione del bio-olio, all'interno del legante di base. Nel secondo grafico (caso invecchiato), si nota, invece, come l'aggiunta di WCO aumenti in maniera considerevole la duttilità, migliorando, così, la flessibilità del bio-legante alle basse temperature e migliorando, anche, la resistenza nei confronti della comparsa di fessure nella pavimentazione. Come per le altre proprietà fisiche, l'incremento della duttilità è diverso anche in base alla classe di legante e del suo grado di invecchiamento.

Per esempio, l'incremento di duttilità nel legante A (60/80) risulta essere maggiore rispetto a quello B (40/60) e a quello C (modificato con SBS). In conclusione, i leganti modificati con scarti di olio da cucina, posseggono un maggior valore di penetrazione, una minore temperatura di rammollimento ed una maggiore duttilità.

CARATTERISTICHE REOLOGICHE: MODULO COMPLESSO E ANGOLO DI FASE

Di seguito si riportano i risultati, derivanti dall'utilizzo di un reometro (DSR), ottenuti durante le diverse sperimentazioni. In particolare, tre di queste hanno considerato un legante non invecchiato (CS-2; Aifang et al., 2014; CS-3; Wang et al., 2018; CS-6; Sun et al., 2016), mentre una ha lavorato su uno invecchiato (CS-5; Chen et al., 2014).

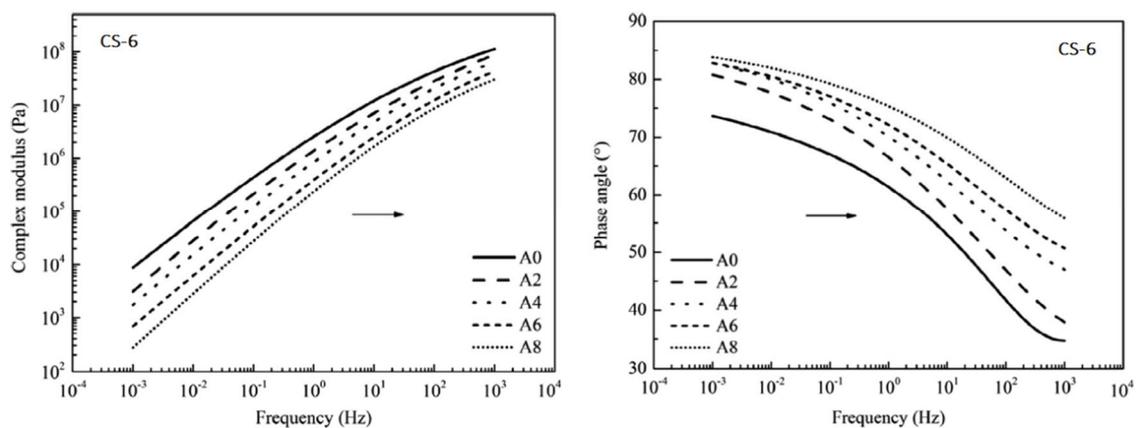


Figura 69 Norma del modulo complesso e angolo di fase (T_{ref} 20 °C) CS-6 - caso unaged (Sun et al., 2016).

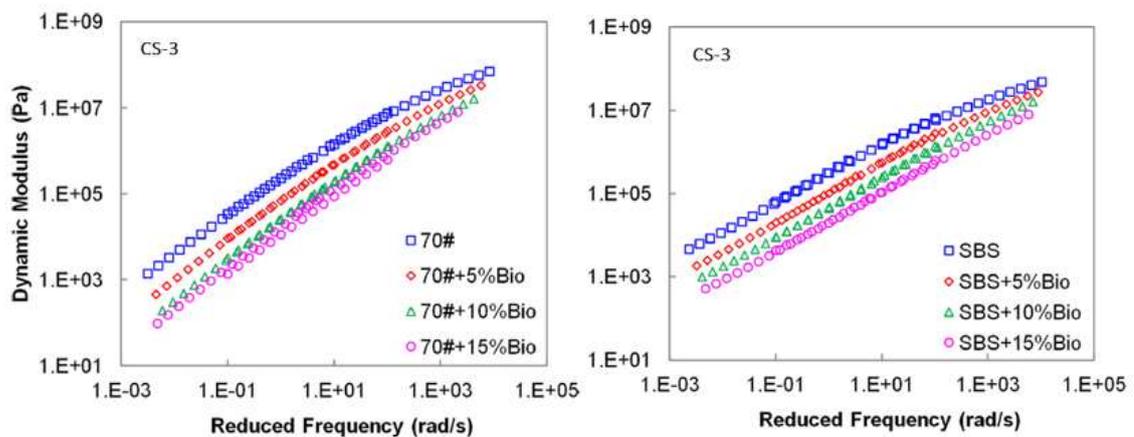


Figura 70 Curva Maestra (T_{ref} 20 °C) CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).

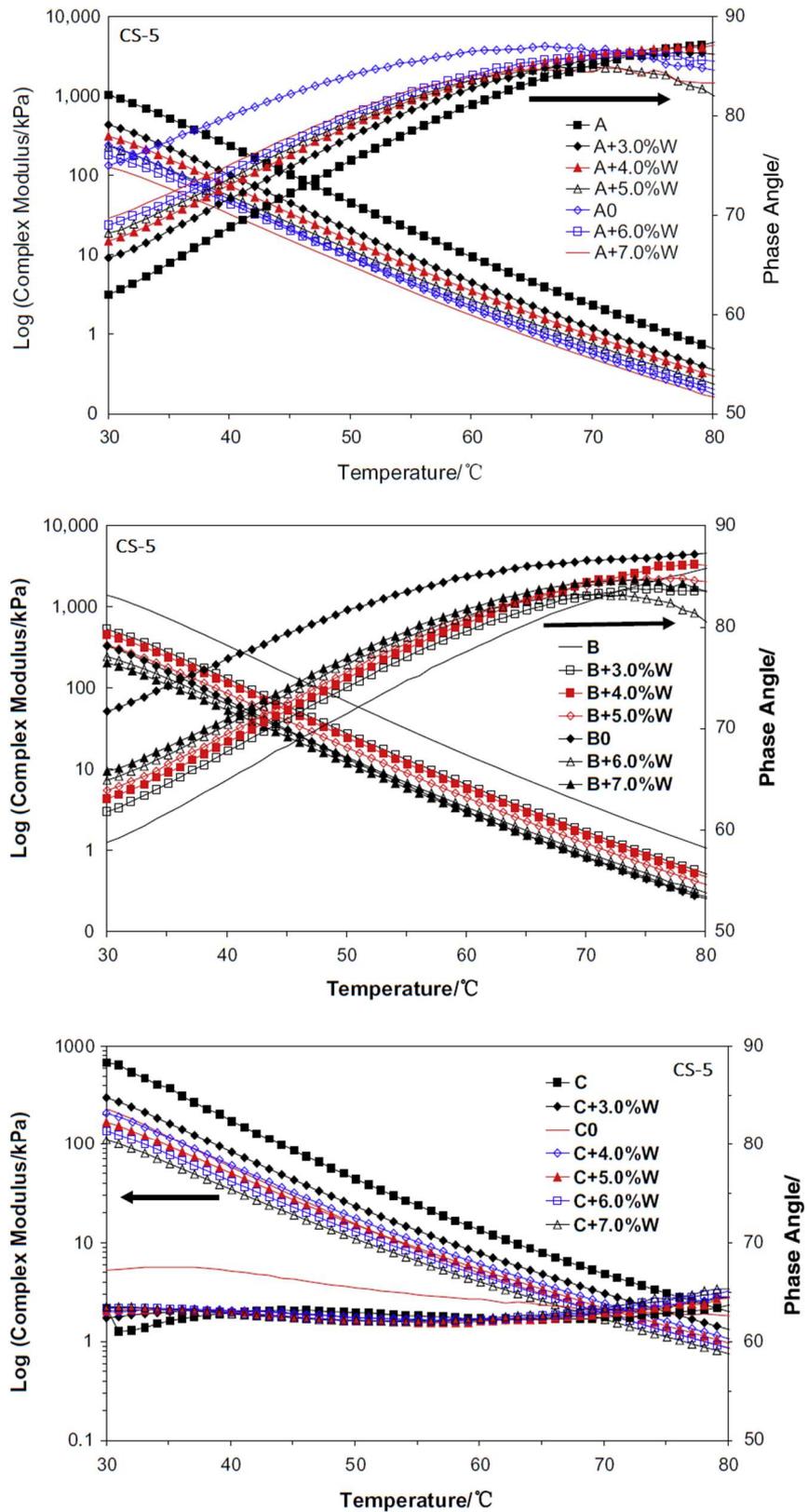


Figura 71 Norma del modulo complesso e angolo di fase CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

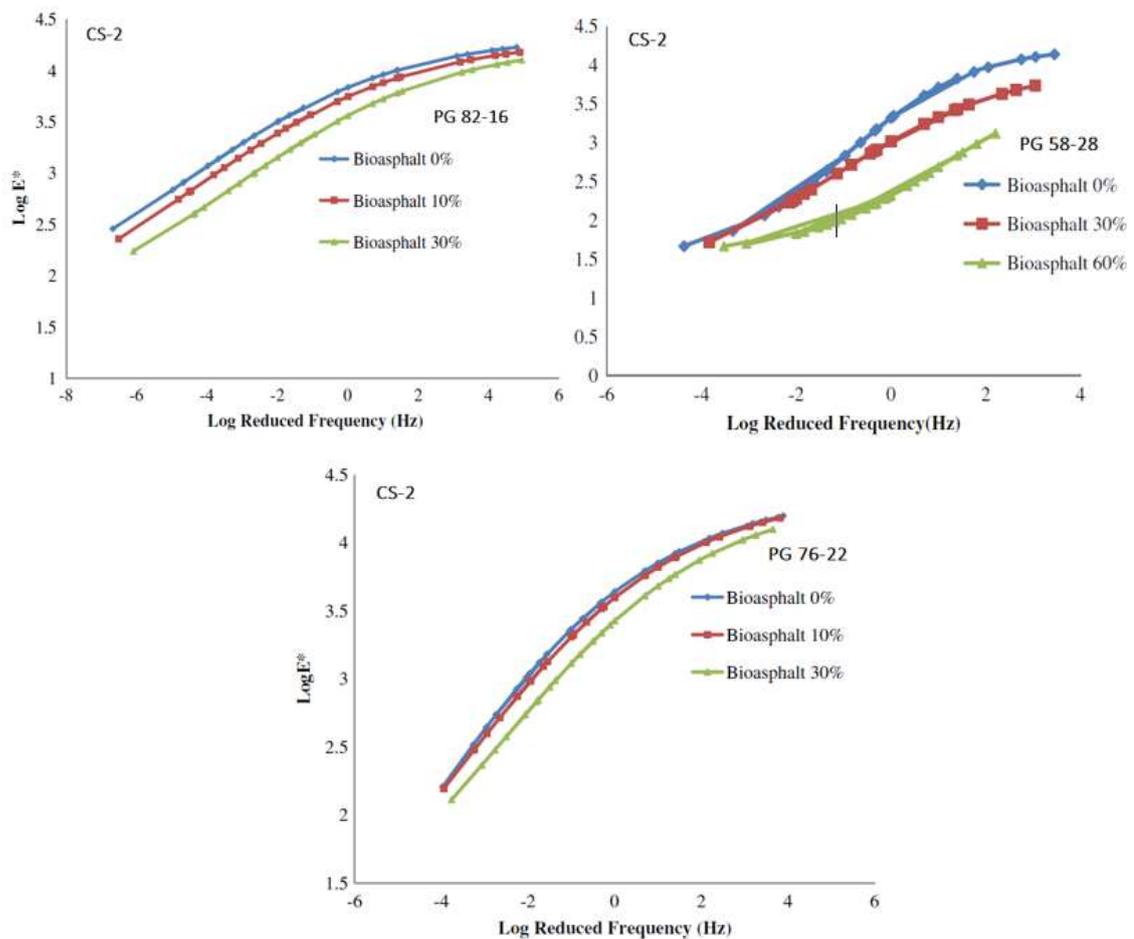


Figura 72 Curva Maestra CS-2 – caso unaged (Haifang et al., 2013).

Per la determinazione delle Curve Maestre (Haifang et al., 2013 - CS-2, Wang et al., 2018 - CS-3 e Sun et al., 2016 - CS-6) (casi non invecchiati), è stato utilizzato il *Modello di Christenson – Anderson – Marasteanu* (CAM), valutando i valori della norma del modulo complesso e l'angolo di fase, per un range di frequenze e diverse temperature, per poi, sfruttare il principio di equivalenza tempo-temperatura, potendo, così, ricostruire l'intero spettro delle frequenze. In generale, come si può notare da tutti i grafici sopra riportati, riferiti a diversi casi studio, all'aumentare del contenuto di WCO, il valore della norma del modulo complesso, sia di taglio $|G^*|$ che assiale $|E^*|$, diminuisce, mentre l'angolo di fase aumenta. Una diminuzione della norma del modulo complesso porta ad avere un legante di consistenza più morbida, ad una ridotta rigidità, quindi più predisposto, per esempio, ad una scarsa resistenza nei confronti dell'ormaiamento.

Invece, un angolo di fase crescente, porta ad avere leganti con comportamento più viscoso che elastico, avendo come conseguenza un minor recupero elastico nel bio-legante.

Il caso studio CS-5 (Chen et al., 2014) (caso invecchiato) ha evidenziato, invece, come, sia la norma del modulo complesso che l'angolo di fase, siano fortemente dipendenti dalla temperatura, andando a studiare un range di valori dai 30 °C agli 80 °C. L'andamento dei grafici, mostra che l'angolo di fase dei leganti invecchiati, contenenti dal 3 % al 7 % di WCO, abbia valori leggermente inferiori rispetto a quelli dei leganti vergini. Per quanto riguarda, invece, la norma del modulo complesso dei leganti ringiovaniti con WCO, questo diminuisce all'aumentare sia della temperatura di prova che della percentuale di WCO usata. Però, come già detto, un dosaggio appropriato di WCO, renderebbe il legante ringiovanito più resistente, per esempio, all'accumulo di deformazioni permanenti. Inoltre, si può osservare come i campioni A4 (6 % di WCO), B3 (5 % di WCO) e il C2 (4 % di WCO), considerando le stesse temperature di prova, abbiano valori di norma del modulo complesso simili a quello del rispettivo legante di riferimento.

MODULO DI RIGIDEZZA

Nella sperimentazione CS-6 (Sun et al., 2016) è stato analizzato, mediante una prova BBR (tempo di carico pari a 60 secondi), l'andamento del modulo di rigidezza in funzione del contenuto di WCO, diagrammando, anche, l'andamento dell'*m*-value. In generale, sarebbe auspicabile una rigidezza sufficientemente ridotta ed una sufficiente capacità di rilassamento (valutata tramite l'*m*-value), riducendo lo stato coattivo. In generale, all'aumentare della quantità di WCO, il valore della rigidezza diminuisce, come evidente dal grafico sotto riportato, provocando, così, un minor accumulo di stress durante l'abbassamento della temperatura, valutando, allo stesso tempo, un aumento dell'*m*-value, e quindi della capacità di rilassamento.

L'aggiunta di WCO porta, così, a migliorare il comportamento dei leganti alle basse temperature e, quindi, anche nei confronti della comparsa di cricche e fessure. Come si può evincere dal grafico, sono state trovate delle buone relazioni lineari, sia per il valore del modulo di rigidezza che per l'*m*-value.

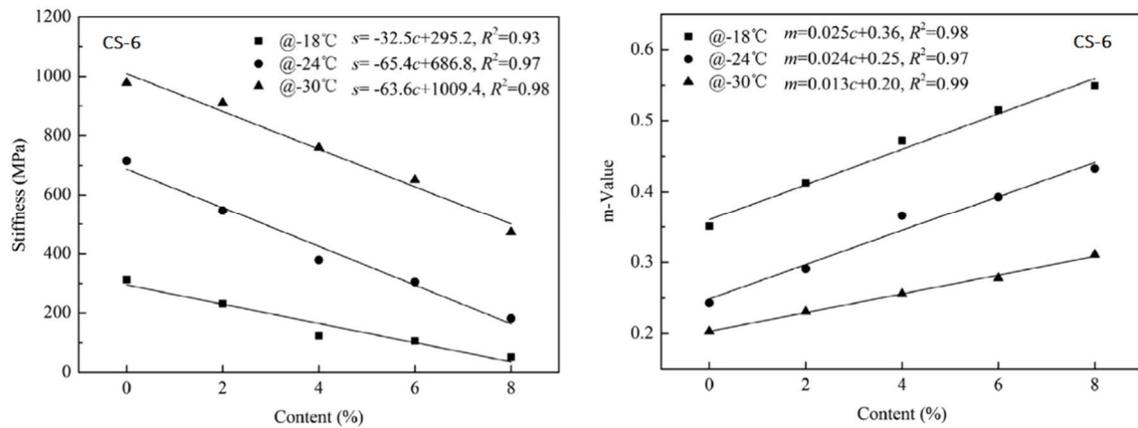


Figura 73 Modulo di rigidezza CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).

RESISTENZA ALL'ORMAIAMENTO

Di seguito, i risultati relativi alla resistenza all'ormaiamento, ottenuti durante le diverse sperimentazioni. In particolare, una che ha considerato un legante non invecchiato (CS-3; Wang et al., 2018) e l'altra che ha lavorato, invece, su uno invecchiato (CS-5; Chen et al., 2014).

Per lo studio del comportamento del bio-legante, nei confronti dell'accumulo delle deformazioni permanenti, il parametro preso in esame è stato: $|G^*|/\text{sen}\delta$, detto *rutting factor*. In generale, per evitare la comparsa di ormaiamento sarebbe auspicabile che il rapporto fosse il più alto possibile, in quanto lo scopo principale è quello di ottenere leganti con elevati valori di $|G^*|$ e bassi valori dell'angolo di fase δ , al fine di considerare materiali con comportamento il più possibile elastico, per accumulare meno deformazioni.

Considerando, invece, il rapporto $|G^*|/\text{sen}\delta$, con riferimento alla variazione di temperatura, si nota sperimentalmente come, all'aumentare della stessa, il rapporto diminuisca. Un'altra informazione ricavabile, dall'osservazione del grafico sotto riportato, sta nel fatto che, fissata la temperatura, all'aumentare della percentuale di WCO, il rapporto $|G^*|/\text{sen}\delta$ diminuisca, in quanto ci si riferisce a leganti con consistenze più morbide, con valori di penetrazione maggiori e temperature di rammollimento minori. Questi, quindi, sono soggetti a maggiori deformazioni permanenti, trasmesse dal passaggio del traffico veicolare, criticità nei confronti della resistenza all'ormaiamento.

Per quanto attiene, invece, al comportamento dei leganti invecchiati (Chen et al., 2014 - CS-5), questo dipende fortemente dal dosaggio del WCO utilizzato, oltre al grado di invecchiamento dello stesso. Leganti ringiovaniti, con un'aggiunta eccessiva di WCO, mostrano, però, una scarsa resistenza nei confronti dell'accumulo delle deformazioni permanenti, risultati coerenti con quelli riferiti alla temperatura di rammollimento e alla viscosità, fatti in precedenza. Per esempio, i campioni A4 (6 % di WCO), B3 (5 % di WCO) e C2 (4 % di WCO), possiedono una resistenza all'ormaiamento simile a quelli dei rispettivi leganti di base, questo grazie all'aggiunta degli scarti di olio di cucina.

Un'altra prova eseguibile, affiancata alla sola determinazione del parametro $|G^*|/\sin\delta$ è il *Multiple-Stress Creep Recovery Test* (MSCR Test). Infatti, studiando per esempio, leganti modificati, non sempre l'approccio SHRP-SUPERPAVE (parametro $|G^*|/\sin\delta$) risulta efficace, poiché per questi materiali si potrebbero sottostimare alcune proprietà. Usando il *MSCR Test*, si utilizza un DSR, con frequenze e temperatura costante, imponendo, però, dei cicli ripetuti di creep recovery, a differenti livelli tensionali, in particolare a 0.1 kPa e a 3.2 kPa (10 cicli di creep (1 s) – recovery (9 s)), considerando così il fatto che il traffico veicolare non sia costante nel tempo ma variabile.

Nel CS-3 è stato utilizzato il *MSCR Test*, per valutare il comportamento nei confronti dell'ormaiamento e si è riportata la risposta tempo-deformativa, ad una temperatura di prova pari a 60 °C, considerando dieci cicli a 0.1 kPa e dieci a 3.2 kPa.

Come evidenziato, di seguito, nei grafici, con l'aumento del WCO, aggiunto al legante di base, si osservano deformazioni sempre maggiori e di conseguenza si valutano leganti più propensi ad accumulare deformazioni permanenti, rispetto al legante di controllo.

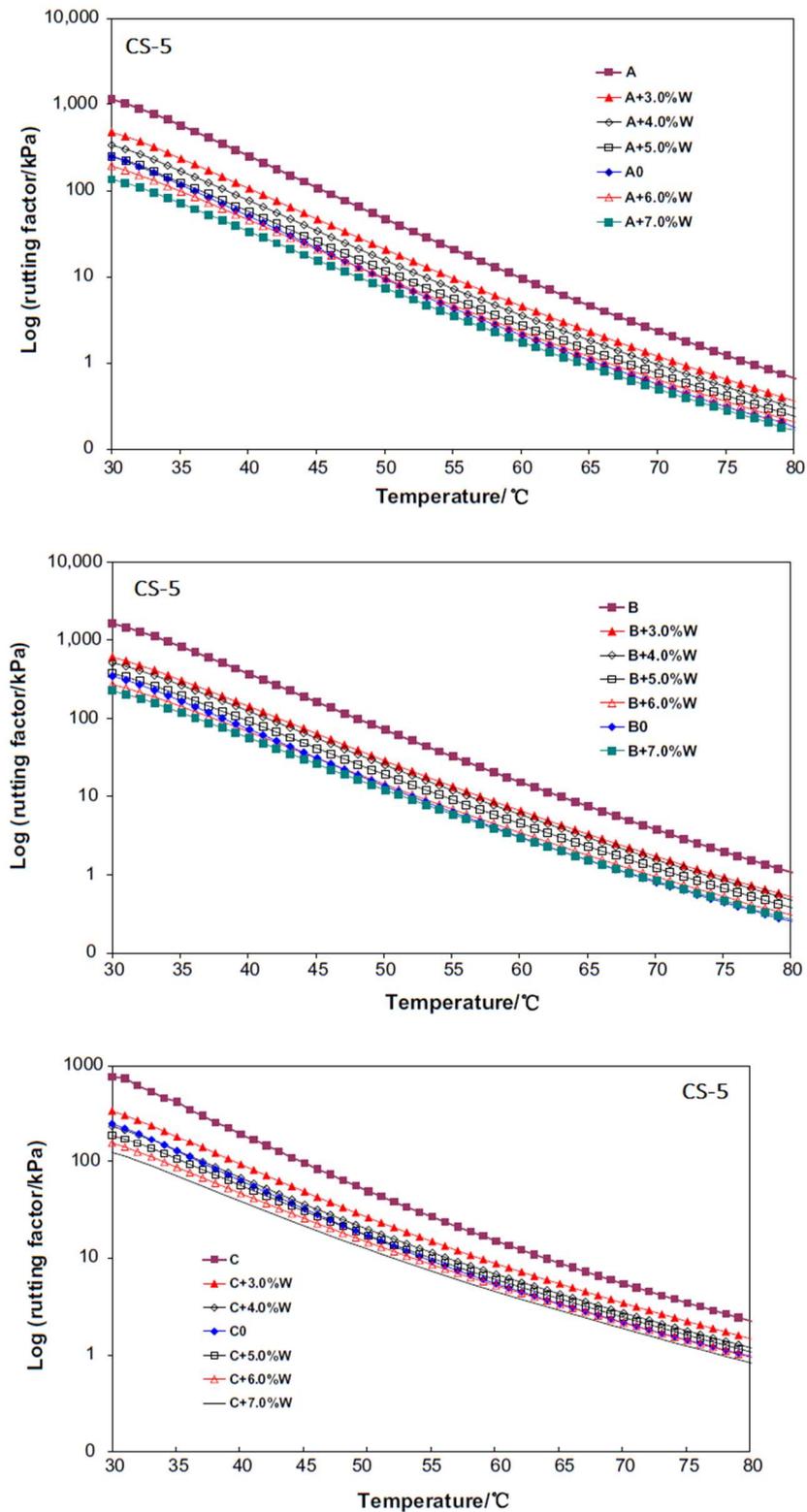


Figura 74 Andamento della resistenza nei confronti dell'ormaiamento CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

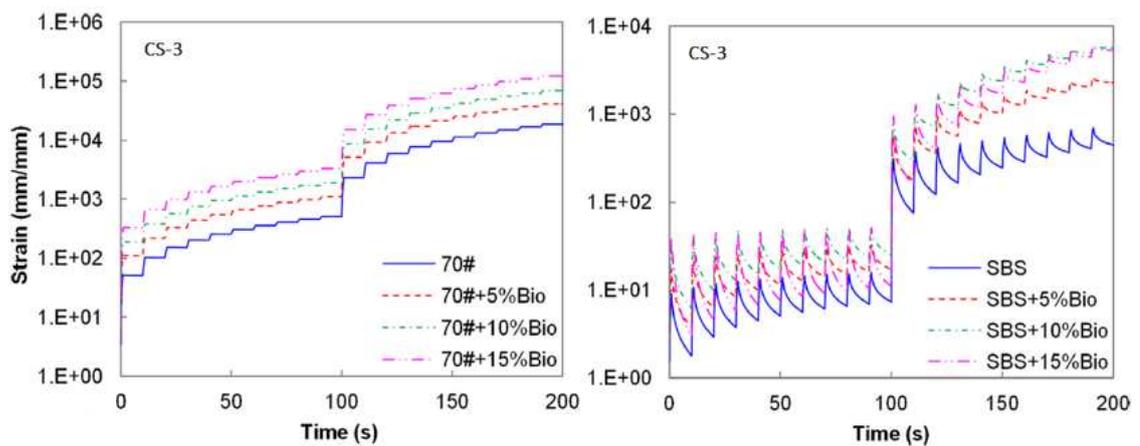


Figura 75 Risultati MSCR Test CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).

RESISTENZA ALLA FATICA

Di seguito si riportano i risultati, relativi alla resistenza alla fatica, ottenuti durante le diverse sperimentazioni. In particolare, una che ha considerato un legante non invecchiato (CS-3; Wang et al., 2018) e una, invece, che ha lavorato su uno invecchiato (CS-5; Chen et al., 2014). Nel CS-3 (caso non invecchiato) sono state tracciate le “rette di fatica” dove, sull’asse delle ordinate è stata riportata la deformazione, mentre su quello delle ascisse, sono stati indicati il numero di cicli a cui si è giunti, a rottura. Infine, sono stati tracciati i rispettivi andamenti, sul piano bi-logaritmico, constatando come i bio-leganti, abbiano una migliore resistenza nei confronti della fatica, rispetto ai leganti di controllo. Questo comportamento migliora, all’aumentando della quantità di WCO considerato. Quando si considera, invece, un legante di base modificato con SBS, l’aggiunta di WCO migliora significativamente la risposta nei confronti della fatica, aumentando di gran lunga il numero di cicli, per i quali si osserva la rottura. Un'altra prova eseguibile, per valutare la resistenza alla fatica è il *Time Sweep Test*, eseguito con un DSR a frequenza e temperatura costante, fino al raggiungimento della rottura del materiale. Nel corso della prova, per effetto dell’accumularsi del danno, la norma del modulo complesso subisce progressivamente una diminuzione, quando iniziano a formarsi delle micro-fessure che portano al decadimento del modulo stesso. Come si nota dai grafici, la norma del modulo complesso dei bio-leganti invecchiati (A4, B3 e C2) è inferiore rispetto a quelli di controllo, sempre invecchiati (A0, B0 e C0).

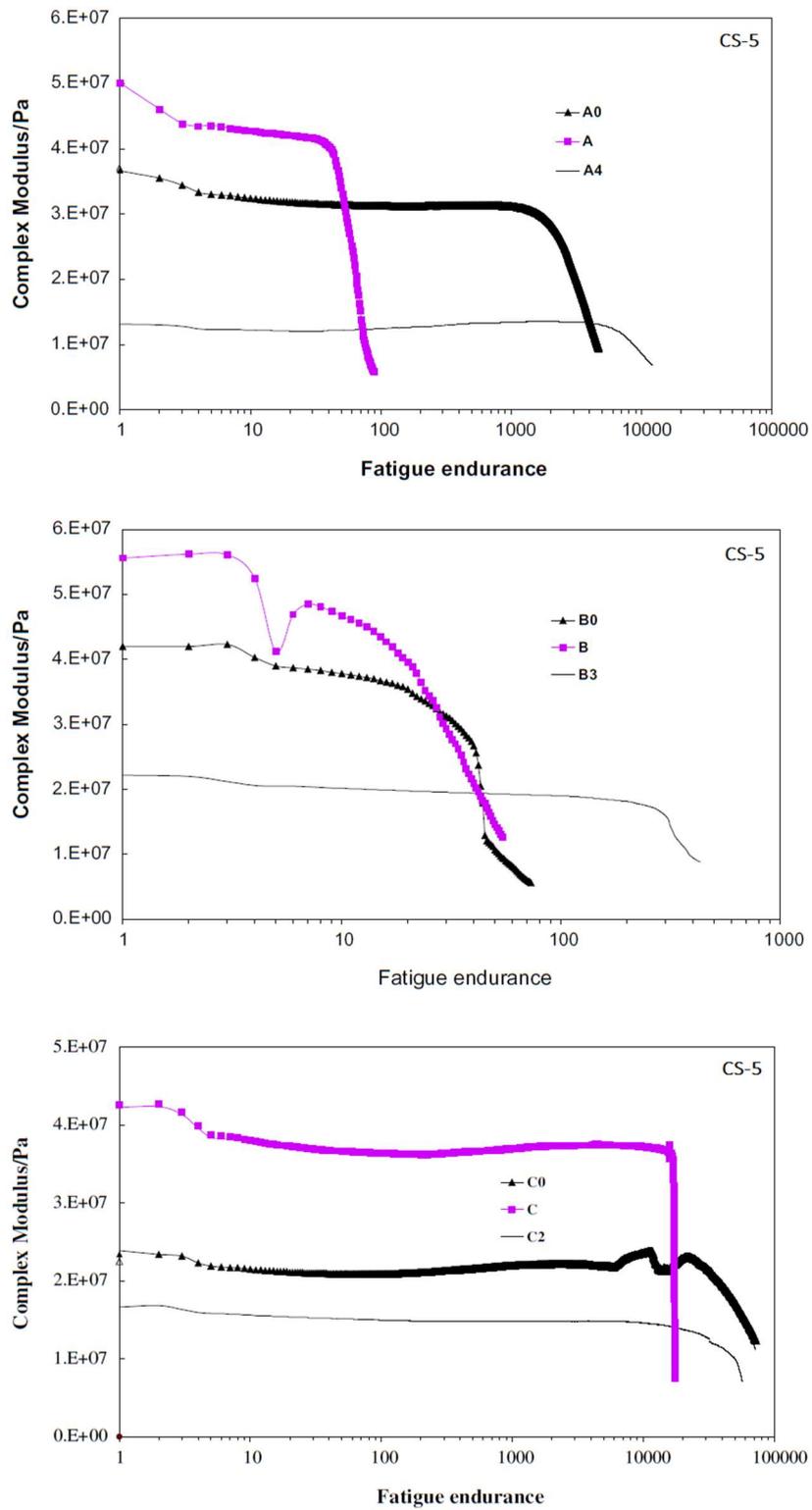


Figura 76 Risultati Time Sweep Test CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).

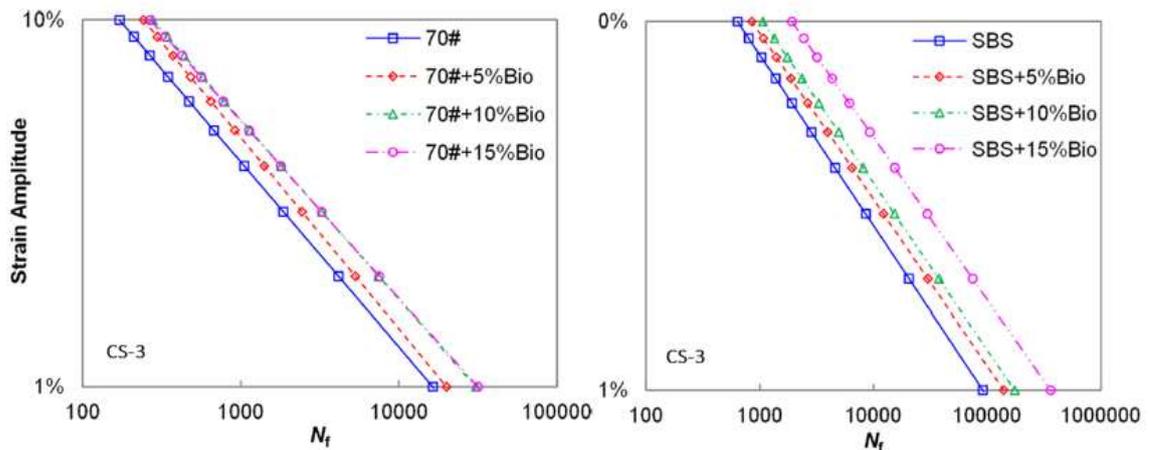


Figura 77 Rette di fatica CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).

La tabella di seguito, riporta la “*fatigue life*” per il legante di riferimento, invecchiato e modificato con WCO:

Tabella 6 “*Fatigue life*” per leganti unaged, aged e modificati con WCO – CS-5 (Chen et al., 2014).

	A0	A	A4	B0	B	B3	C0	C	C2
Fatigue life [s]	3377	60	12206	42	31	365	72000	17250	56691

Le sigle A0, B0 e C0 si riferiscono ai leganti non invecchiati, mentre le sigle A, B e C rappresentano gli stessi leganti, sottoposti, però, al processo di invecchiamento (RTFOT e PAV), mentre A4, B3 e C2 sono i leganti A, B e C modificati con WCO, rispettivamente con il 4 %, il 3 % ed il 2 % in peso, rispetto al legante di base.

Come si può osservare, tutti e tre i leganti di base, hanno una resistenza alla fatica, in termini di tempo di carico, superiore a quelli invecchiati. Se, invece, si valutano i bio-leganti, modificati con WCO, si osservano valori superiori anche a quelli di riferimento, numeri promettenti da un punto di vista sperimentale, in quanto gli stessi indicano che la presenza di scarti di olio potrebbe migliorare la resistenza alla fatica dei bio-leganti, potendo tradursi in una minore comparsa di fessurazione, nella pavimentazione.

Sintesi e considerazioni generali

In questo quarto paragrafo, sono state analizzate le proprietà del bio-olio, derivante dalla lavorazione dell'olio di scarto da cucina (WCO), per essere utilizzato come sostituto parziale del bitume. Sono stati presi a riferimento la tipologia di pretrattamento del WCO prima della miscelazione con il bitume e poi, in maniera separata, l'influenza della qualità del WCO e, infine, la differenziazione tra condizioni aged e unaged, sulle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante.

Per quanto riguarda la tipologia di pretrattamento utilizzata sul WCO, sono stati analizzati i seguenti lavori: Wan Nur Aifa Wan Azahar et al. (2016), Haifang et al. (2013), Wang et al. (2018), Asli et al. (2012), Chen et al. (2014) e Sun et al. (2016) che rispettivamente hanno eseguito: filtraggio, polimerizzazione, raffinazione, filtraggio, frittura ripetuta ed in seguito filtraggio ed infine raffinazione, dello scarto di olio da cucina. In generale le percentuali di WCO considerate variano in un ampio range: dall'1 % nello studio di Asli et al. (2012) fino al 60 % in quello di Haifang et al. (2013), potendo, così, indagare le varie proprietà fisiche e reologiche, su un maggior numero di percentuali²².

Per quanto riguarda l'influenza della qualità del WCO sulle proprietà fisiche e reologiche del bio-legante è stato preso a riferimento il lavoro di Wan Nur Aifa Wan Azahar et al. (2016), nel quale sono stati considerati campioni di bitume invecchiato (RTFOT) e non, in modo da valutare eventuali differenze tra il WCO trattato e quello non trattato chimicamente, in funzione delle caratteristiche fisiche e reologiche.

Per quanto concerne la viscosità, questa mostra un andamento decrescente sia per l'olio trattato che per quello non, al variare della % di WCO. Dal lato economico, però, una bassa viscosità risulta essere favorevole, in quanto porta alla diminuzione della temperatura di miscelazione e compattazione della miscela, risparmiando sui costi.

²² Per un maggiore dettaglio di informazione, in merito alla tipologia di bitume testato, al tempo, alla temperatura e alla velocità di miscelazione, si rimanda alla tabella riassuntiva, alla fine del primo sottoparagrafo 3.4.1, riferito alla sostituzione parziale del bitume, con WCO.

Tuttavia, però, l'aggiunta eccessiva di WCO non è vantaggiosa, poiché porta ad ottenere un legante troppo morbido e quindi con possibili problemi di ormaiamento.

L'utilizzo di WCO trattato, mediante transesterificazione, mostra una minore penetrazione, quindi una consistenza più dura, una temperatura di rammollimento maggiore, portando, quindi, ad un miglior comportamento alle alte temperature e, di conseguenza, alla resistenza all'ormaiamento, uno dei parametri critici, nel design delle pavimentazioni. Per quanto riguarda i campioni trattati ed invecchiati, si nota lo stesso trend osservato per quelli trattati e non invecchiati, ma su scala minore.

Per quanto attiene, invece, all'influenza sulle proprietà fisiche e reologiche di leganti modificati, in condizioni aged e unaged (in questo caso il WCO funge anche da agente ringiovanente), è stata eseguita una panoramica generale sui risultati dei vari casi studio: Haifang et al. (2013), Wang et al. (2018), Asli et al. (2012), Chen et al. (2014) e Sun et al. (2016). Per le proprietà fisiche si osservano gli stessi andamenti osservati nel caso studio di "*WCO trattati vs. WCO non trattati*" chimicamente. In particolare, la penetrazione aumenta all'aumentare della % di WCO, la temperatura di rammollimento e la viscosità diminuiscono all'aumentare della % di WCO, sia per casi aged che per quelli unaged.

Per quanto riguarda la duttilità, invece, nel caso non invecchiato, si osserva un rapido aumento della stessa in funzione della % WCO, che, però, si riduce bruscamente superando il contenuto di olio pari al 6 %. Nel caso invecchiato, si nota come l'aggiunta di WCO aumenti in maniera considerevole la duttilità, migliorando sia la flessibilità del bio-legante alle basse temperature che la resistenza nei confronti della comparsa di fessure, nella pavimentazione.

In generale, con riferimento ai diversi casi studio, all'aumentare del contenuto di WCO, il valore della norma del modulo complesso, sia di taglio $|G^*|$ che assiale $|E^*|$, diminuisce (legante di consistenza più morbida, ad una ridotta rigidezza, quindi più predisposto ad una scarsa resistenza nei confronti dell'ormaiamento), mentre l'angolo di fase aumenta (leganti con comportamento più viscoso che elastico, con conseguente minor recupero elastico nel bio-legante).

Con riferimento alla rigidità, si è notato che la stessa diminuisce all'aumentare della quantità di WCO ed un aumento nell'andamento dell' m -value, con il conseguente miglioramento del comportamento dei leganti alle basse temperature (miglior rilassamento) e, quindi, anche nei confronti della comparsa di cricche e fessure.

Per quanto riguarda la resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti, all'aumentare della percentuale di WCO, il rapporto $|G^*|/\sin\delta$ diminuisca, in quanto si fa riferimento a leganti con consistenze più morbide, con valori di penetrazione maggiori e temperature di rammollimento minori, quindi, soggetti a maggiori deformazioni permanenti trasmesse dal passaggio del traffico veicolare (gli stessi risultati si sono ottenuti eseguendo il *Multiple-Stress Creep Recovery Test*).

Ultima caratteristica presa in esame, è stata la resistenza nei confronti della fatica, che migliora all'aumentare della quantità di WCO, osservando che i bio-leganti possiedono una maggiore resistenza nei confronti della stessa, rispetto ai leganti di controllo.

In generale, la presenza di WCO, migliora la duttilità ed il comportamento alle basse temperature, migliorando la resistenza nei confronti della comparsa di cricche e fessure nella pavimentazione, grazie ad una maggiore capacità di rilassamento.

Con l'aggiunta, però, di WCO si ottengono leganti più propensi all'accumulo di deformazioni permanenti, rispetto al legante di controllo, portando a successivi danni della pavimentazione.

L'utilizzo di questi bio-legante potrebbe portare, nel tempo, alla necessità di interventi di manutenzione con frequenza maggiore, portando ad un conseguente aggravio dei costi e impatti ambientali. Gli interventi che si potrebbero pianificare, sono: rappezzatura (patching), sigillatura delle fessure (crack sealing) o anche fresatura totale dello strato (Full Depth Reclamation - FDR).

3.5 SOSTITUZIONE PARZIALE: leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino

Come già ampiamente esposto, con la diminuzione della quantità di petrolio, da destinare all'industria stradale, la domanda delle risorse alternative e rinnovabili sta crescendo sempre più. Infatti, negli Stati Uniti, statistiche riferite ai trasporti, risalenti al 2004, già indicavano, che le miglia percorse per ciascun veicolo, sarebbero cresciute fino al 50% nei successivi 20 anni (U.S. Department of Transportation, 2005). Questo, avrebbe determinato, così, una sempre maggiore domanda di bitume per la costruzione di nuove strade o per la semplice manutenzione di quelle esistenti, avendo come conseguenza un aumento degli effetti negativi sull'ambiente, primo tra tutti, l'emissione di gas serra, provenienti dalla costruzione o manutenzione delle stesse.

Per trovare una risposta a queste problematiche, si è cercato di studiare un prodotto, anche di scarto, da destinare alla produzione di un nuovo bio-legante in sostituzione, almeno parziale, del bitume. In merito a questo, infatti, un team di studiosi americano (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012) è riuscito a valorizzare il letame suino, da sempre considerato un materiale di scarto, o al più utile come fertilizzante dei campi agricoli. Il principale problema di questo prodotto però, sta nel fatto che, lo stesso, rilascia nell'atmosfera gas serra come, anidride carbonica (CO₂) e metano (CH₄), durante il proprio decadimento aerobico e anaerobico.

Attualmente, il letame è utilizzato come fertilizzante, solamente per una piccola percentuale, circa il 5 %, dei terreni statunitensi, destinati all'agricoltura. Infatti, l'utilizzo del letame suino, come fertilizzante, dipende sia da esigenze agronomiche che dai costi di trasporto, in quanto, avendo un'alta percentuale di umidità rispetto ad altre tipologie di letame secco, questi, verrebbero ad essere maggiori, risultando meno competitivo sul mercato (MacDonald et al., 2009).

Per ottenere il bio-legante, derivante dalla lavorazione del letame suino, si esegue un processo TCC (*Thermo-Chemical Conversion*), simile ad una liquefazione idrotermale

(HTL), già analizzata per i bio-leganti, derivanti da residui di micro-alghe. Il processo TCC può essere suddiviso, principalmente, in tre parti: pirolisi, gassificazione e liquefazione.

Negli ultimi anni, molti ricercatori hanno studiato questo processo, in modo da renderlo il più efficiente possibile. Il TCC sfrutta il calore e la pressione per scomporre i materiali in molteplici fasi, ottenendo, come rifiuto, un bio-petrolio, un olio denso e nero, con caratteristiche energetiche simili a quelle del petrolio, propriamente detto (Ocfemia et al., 2006). Eseguendo il suddetto processo sul letame suino, si ottiene come risultato un bio-olio, successivamente frazionato al fine di ottenere (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012; Md Maniruzzaman et al., 2015):

- una fase acquosa, ricca di azoto, fosforo e potassio (N, P, K), da poter utilizzare, come fertilizzante;
- alcuni composti organici, sotto forma di olio, utilizzabili come fonte rinnovabile di energia;
- un residuo solido, da utilizzare come modificatore del bitume.

Secondo Fini, questo bio-legante potrebbe essere un candidato promettente, da utilizzare come modificatore parziale del bitume, in quanto andrebbe a migliorare alcune delle proprietà del legante stesso, fornendo al tempo stesso benefici, sia da un punto di vista ambientale, portando ad una riduzione di gas serra prodotti, che economici, essendo la materia prima, molto meno costosa rispetto al legante convenzionale (Md Maniruzzaman et al., 2015).

Nonostante l'assenza di sperimentazioni destinate alla determinazione del costo di produzione del bio-legante da letame suino, si possono fare, comunque, delle stime basandosi su un processo simile, durante il quale, invece, è stata utilizzata della polpa di barbabietola da zucchero. Facendo alcune considerazioni, alla fine, si può giungere ad una stima approssimativa, relativamente ad un litro di bio-legante, giungendo, così, ad un costo pari a 0.12 €/L, contro gli 0.47 €/L di un bitume standard (Fini et al., 2011).

Di seguito, verrà riportato lo studio condotto dai gruppi di studiosi (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012; You et al., 2012) al fine di comprendere quali siano le caratteristiche chimiche, fisiche, reologiche, oltre agli effetti sull'invecchiamento del bio-bitume, confrontandole con quelle di uno convenzionale, di riferimento.

3.5.1 Caratterizzazione chimica e reologica

La sperimentazione eseguita da Fini et al. (2011; 2012) riporta, in maniera dettagliata, ogni singola lavorazione dei materiali, sia di preparazione che di esecuzione delle varie prove. Per ottenere un bio-legante da rifiuti suini, questi devono essere caricati in un reattore, riscaldato fino al raggiungimento di una prefissata temperatura (350 °C) e pressione (10 MPa), mantenute per un determinato tempo (80 minuti). Al termine del processo TCC, il reattore viene rapidamente raffreddato, riportandolo a temperatura ambiente. I gas formati vengono rilasciati all'esterno, mentre il residuo appiccicoso viene, infine, separato dalla fase acquosa, con una filtrazione sottovuoto, per poterlo, poi, testare e caratterizzare.

Come detto in precedenza, in questo studio, si sono effettuate sia una caratterizzazione chimica che una reologica, in modo tale da confrontare questo bio-legante con un bitume convenzionale, denominato AAD-1.

Per quanto riguarda la caratterizzazione chimica del residuo solido, ottenuto dalla lavorazione del letame suino, sono state eseguite sia un'analisi elementare, volta alla ricerca delle percentuali di carbonio (C), idrogeno (H), azoto (N) ed ossigeno (O), e un'analisi SARA, volta alla determinazione delle quantità di saturi, aromatici, resine ed asfalteni. Infine, per avere una maggiore panoramica a riguardo, sono state effettuate analisi chimiche specifiche, come: *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR), *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS), *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR) e *Asphaltene Determinator* (AD). Basandosi sulla sola analisi elementare, il bio-legante mostra livelli estremamente elevati di ossigeno e di azoto, rispetto al campione AAD-1. Gli studiosi, hanno sottolineato che l'alta percentuale di ossigeno potrebbe derivare, dal fatto che questa, sia stata determinata per differenza dal totale, potendo, così, considerare anche la parte di zolfo, non risultante dall'analisi. Per quanto riguarda, invece, l'analisi SARA, è interessante sottolineare, come il bio-legante abbia una bassa concentrazione di saturi e di aromatici, arrivando, così, alla conclusione che questo sia costituito principalmente da pseudo-resine e pseudo-asfalteni.

Va anche detto, però, che solo queste due analisi chimiche, non forniscono una misura quantitativa della potenziale compatibilità tra il bio-bionder ed il bitume AAD-1.

Component (%wt)	Bio-binder	AAD-1
C	72.58	81.6
H	9.76	10.8
N	4.47	0.77
O	13.19	0.9
Water content	2.37	
Ash content	0.13	

Figura 78 Risultati dell'analisi chimica elementare (Fini et al., 2012).

SARA component	Adhesive type	Saturated compounds	Aromatic compounds	Resin	Asphaltenes
Percentage (percent by weight)	Biobinder from swine manure	2.48	1.67	45.87	43.39
Percentage (percent by weight)	AAD-1 (the softest asphalt binder)	8.6	41.3	25.1	20.5

Figura 79 Risultati dell'analisi SARA (figura riadattata) (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).

Per quanto riguarda la caratterizzazione reologica, si è studiato l'effetto del residuo del letame suino, come sostituto parziale, con l'aggiunta di questo ad un bitume standard, PG 64-22, andandone a studiare differenti percentuali, in particolare: 2 %, 5 % e 10 % in peso, rispetto al legante di base.

Questo ed il bio-legante sono stati riscaldati a 60 °C e a 120 °C rispettivamente e sono stati miscelati accuratamente con una velocità pari a 3000 giri/minuto, mantenendo una temperatura costante di 120 °C. Una volta ottenuto il bio-legante, sono stati eseguiti degli esperimenti sulla viscosità, sulla temperatura di fessurazione, sulla norma del modulo complesso, sulla resistenza all'ormaiamento e sul modulo di rigidità, sia su questo che su un legante standard, per confrontare i risultati ed osservarne eventuali criticità.

Per quanto riguarda la viscosità, questa è stata valutata attraverso un viscosimetro rotazionale Brookfield e, dai risultati ottenuti, si è osservato come l'aggiunta del bio-legante al legante di base, ne abbia fatto diminuire la stessa, all'aumentare delle percentuali di bio-legante.

La diretta conseguenza di questo è una minore temperatura di miscelazione e di compattazione, caratteristiche positive in un nuovo bio-legante, portando alla diminuzione, così, delle emissioni di gas serra, durante la messa in opera della pavimentazione.

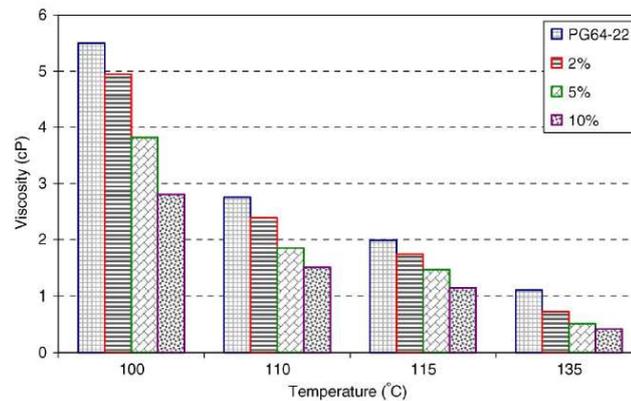


Figura 80 Variazione della viscosità in funzione della percentuale di bio-legante aggiunta (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).

Per qualificare il materiale, contenente il bio-olio da letame suino con diverse percentuali, alle basse temperature di esercizio, sono state effettuate varie misurazioni utilizzando il reometro a trave inflessa (BBR - *Bending Beam Rheometer*). La prova BBR valuta le caratteristiche di rigidità del legante al variare della temperatura, in particolare, si osserva la sua propensione alla fessurazione alle basse temperature. La fessurazione termica è causata dall'accumulo di tensioni durante la contrazione della pavimentazione, in seguito alla diminuzione repentina della temperatura. Le sollecitazioni accumulate, quindi, possono superare la capacità di rilassamento del materiale, con conseguente innesco della cricca. Di seguito si riportano le Curve Maestre e l'andamento dell'*m*-value, sia per provini modificati che non.

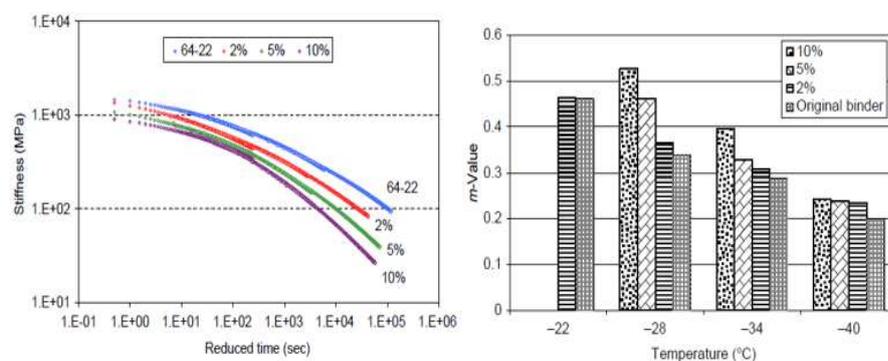


Figura 81 Curva Maestra e andamento dell'*m*-value con la temperatura (Fini et al., 2012).

L'aggiunta di bio-legante riduce la rigidità per tutte e tre le percentuali analizzate oltre ad osservare l'aumento dell' m -value, che porta, quindi, al miglioramento della capacità di rilassamento, traducendosi in un minore accumulo di stress. Come si evince dal grafico, alla temperatura di $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, i provini contenenti il 5 % ed il 10 %, risultavano essere di consistenza troppo "morbida" e quindi non sono stati valutati i valori dell' m -value. Questo è dovuto al fatto che le deflessioni erano maggiori rispetto a quelle misurabili dal macchinario utilizzato.

Per quanto riguarda, invece, la temperatura di fessurazione, si è constatato, inoltre, che la stessa diminuisce all'aumentare della percentuale di bio-legante, migliorando, così, la resistenza nei confronti della temperatura di craking, evitando la formazione di uno stato fessurativo e di degrado precoce della pavimentazione.

Binder	Cracking temperature ($^{\circ}\text{C}$)
PG 64-22	-31.7
BMB-2 (2%)	-33.1
BMB-5 (5%)	-34.7
BMB-10 (10%)	-36.3

Figura 82 Risultati analisi BBR (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).

Osservando la tabella soprariportata, si nota che, con la presenza del 10 % di residui, si ottiene un abbassamento della temperatura critica di ben 4.6 gradi centigradi.

Ulteriori grandezze investigate, sono state la norma del modulo complesso, $|G^*|$, e l'angolo di fase (δ), attraverso l'utilizzo di un reometro rotazionale (DSR -*Dynamic Shear Rheometer*). Per lo studio riferito alle alte temperature, quindi all'ormaiamento, il parametro, in generale, da prendere a riferimento è il rapporto tra la norma del modulo complesso ed il seno dell'angolo di fase: $|G^*|/\sin(\delta)$. Il motivo per cui si utilizza, come riferimento, questo parametro, sta nel fatto che occorrerebbe garantire un sufficiente grado di rigidità (elevato valore di $|G^*|$) ed elasticità (basso valore dell'angolo di fase), per contrastare l'accumulo di deformazioni permanenti.

Di seguito si mostra, la Curva Maestra, dalla quale si evince, come, a seguito dell'aumento della quantità di bio-legante, il legante mostra un minor grado di rigidità, ottenendo, così, un legante di consistenza più "morbida". Il calo della norma del modulo complesso, allo stesso tempo, però, preoccupa in quanto potrebbe essere negativo dal punto di vista della resistenza nei confronti dell'ormaiamento.

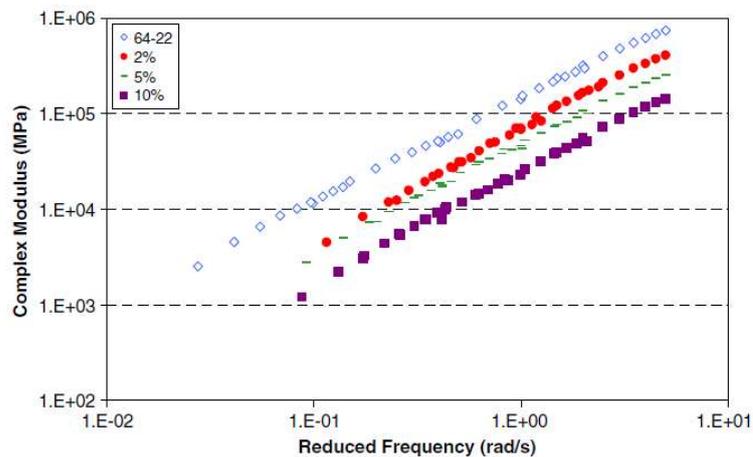


Figura 83 Curva Maestra bio-legante con bio-olio derivante da letame suino (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).

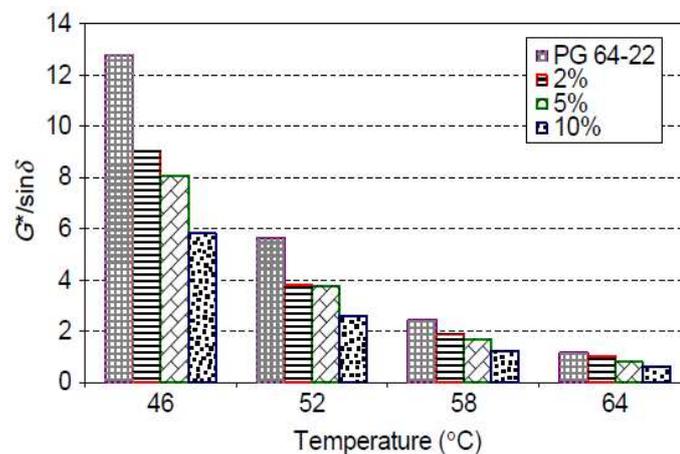


Figura 84 Variazione del parametro $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ con la temperatura e percentuale di bio-legante (Fini et al., 2012).

Gli studiosi (Fini et al., 2012), per migliorare il comportamento alle alte temperature, hanno aggiunto alla miscela l'1.5% di PPA (Acido Polifosforico e densità pari a 2.06 g/cm^3) in tutte le percentuali di bio-legante indagate (2%, 5% e 10%). L'aggiunta di PPA ha comportato un aumento significativo della norma del modulo complesso, come si evince di seguito.

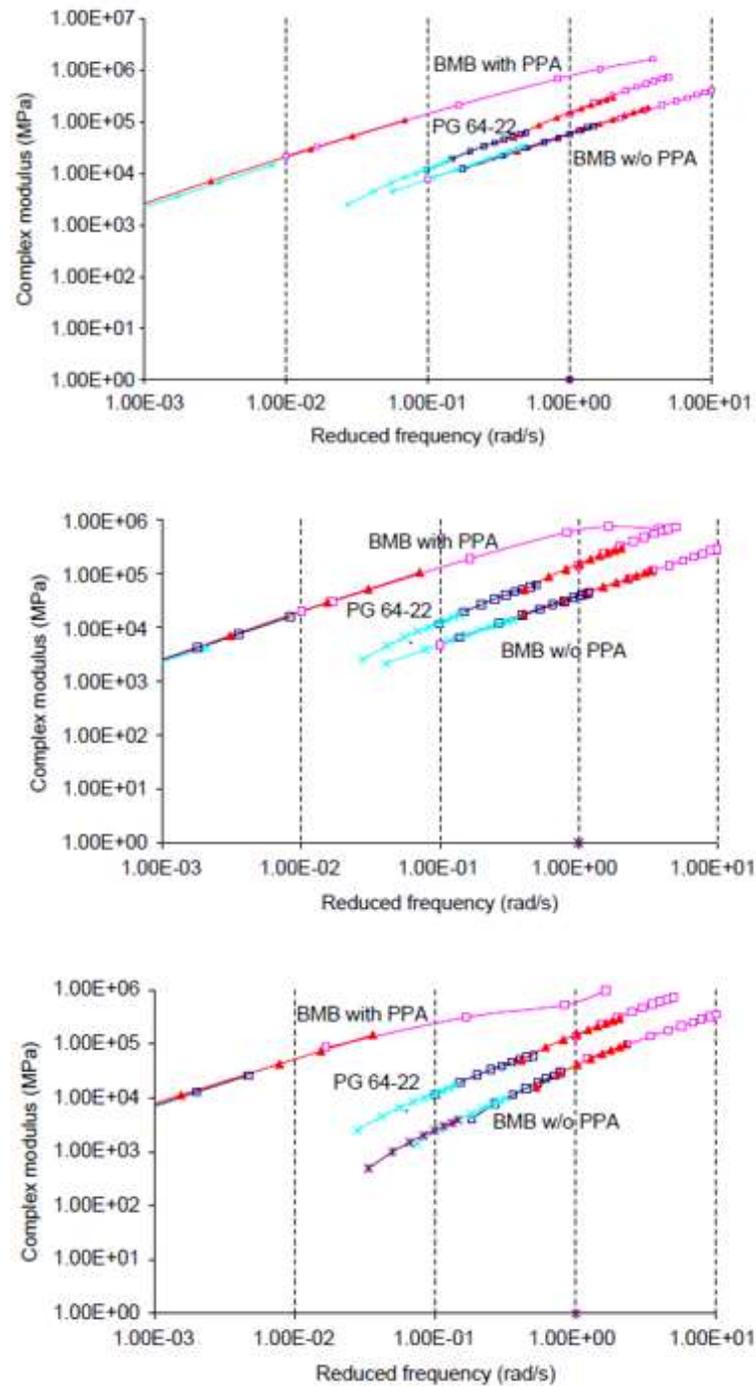


Figura 85 Curva Maestra con e senza la presenza di PPA per le percentuali di bio-legante analizzate (2 % primo grafico, 5 % secondo grafico e 10 % terzo grafico) (Fini et al., 2012).

Infine, si è voluto confrontare il comportamento di un bitume standard con un bio-legante, senza aggiunta di PPA, in termini di resistenza all'ormaiamento, eseguendo l'*Hamburg Rut Test*.

Nello studio effettuato da Fini (2011; 2012), è stato analizzato, però, solo il bio-legante con il 2 % di residuo di letame suino ed i risultati, considerando un numero di passaggi di 20000, non hanno mostrato una significativa differenza nella profondità dell'ormaia.

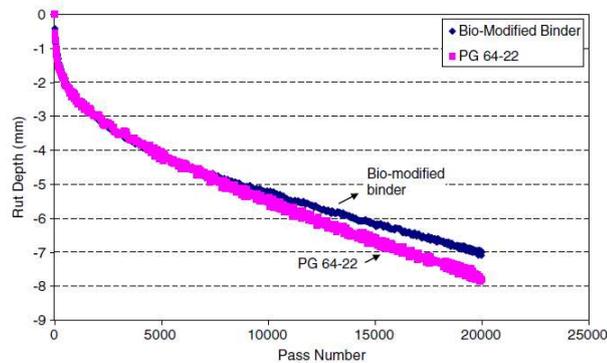


Figura 86 Risultati dell'Hamburg Rut Test (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).

Come ben evidenziato nel grafico soprariportato, il legante bio-modificato mostra una profondità dell'ormaia, a 20000 passaggi, di poco inferiore rispetto a quella del provino eseguito con bitume standard e, questa piccola differenza, può essere, a detta degli studiosi, attribuibile alla variabilità del test. Per comprendere meglio questo comportamento, bisognerebbe eseguire, quindi, la medesima prova, utilizzandone il 5 % ed il 10 %, valutando, poi, eventuali variazioni di comportamento.

Per comprendere meglio il comportamento di questi bio-leganti, la sperimentazione dovrebbe ancora essere approfondita, anche se il residuo derivante dal letame di suino, nel suo complesso, sembrerebbe essere un candidato promettente come sostituto parziale del bitume, grazie alla sua capacità di migliorarne la risposta alle basse temperature, punto critico di molti bitumi convenzionali. Un altro punto a suo favore, invece, sta nel processo di lavorazione, in quanto il letame suino è molto più facile da convertire in un bio-olio, attraverso un processo termochimico, grazie al suo alto contenuto di lipidi ed al suo elevato tasso di umidità.

Infatti, la maggior parte delle biomasse richiedono l'aggiunta di grandi quantità d'acqua al fine di facilitare questo processo di conversione, andando, così, ad aumentarne il costo di produzione, parametro importante da tenere in considerazione, se si volesse eseguire un confronto, anche dal punto di vista economico, con altri bio-legante, di natura diversa.

Sintesi e considerazioni generali

In questo quinto, ed ultimo, paragrafo si sono indagate le caratteristiche del bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino come possibile candidato per la sostituzione parziale del bitume, ottenuto attraverso un processo di conversione termo-chimica. Gli studi presi in considerazione sono quelli eseguiti dal gruppo di ricerca americana di Fini et al. (2011; 2012).

Per quanto riguarda la caratterizzazione chimica del residuo solido, ottenuto dalla lavorazione del letame suino, sono state eseguite sia un'analisi elementare (% C, % H, % N e % O) che una SARA (% di saturi, aromatici, resine ed asfalteni), sottolineando come il bio-legante sia costituito principalmente da pseudo-resine e pseudo-asfalteni.

Per quanto attiene la caratterizzazione del bio-legante, si è studiato l'effetto del bio-olio derivante dal letame suino al 2 %, 5 % e 10 %, tramite l'aggiunta ad un bitume standard (PG 64-22).

Per quanto riguarda la viscosità, si è osservato come l'aggiunta del bio-legante al legante di base, ne abbia fatto diminuire la stessa all'aumentare delle percentuali, con la diretta conseguenza di una minore temperatura di miscelazione e di compattazione e quindi minori emissioni di gas serra, durante la messa in opera della pavimentazione.

Per quanto concerne la rigidità, invece, l'aggiunta di bio-legante porta ad una riduzione della stessa, per tutte e tre le percentuali analizzate, osservando, però, un aumento del m-value, che si traduce in un minore accumulo di stress e in una maggior capacità di rilassamento.

In merito alla temperatura di fessurazione, si è constatato che la stessa diminuisce all'aumentare della percentuale di bio-legante, resistendo meglio nei confronti della temperatura di craking evitando, così, la formazione di uno stato fessurativo precoce e ottenendo un abbassamento della temperatura critica di ben 4.6 gradi centigradi, con l'aggiunta del 10 % di bio-olio.

Per quanto riguarda, invece, l'evoluzione della norma del modulo complesso, si osserva che, a seguito dell'aumento della quantità di bio-legante, il legante mostra un minor modulo $|G^*|$, anche se un calo di questo, preoccupa allo stesso tempo, dal punto di vista della resistenza nei confronti dell'ormaiamento. Per migliorare il comportamento alle alte temperature, però, Fini et al. (2012) hanno aggiunto alla miscela l'1.5 % di acido polifosforico ed in tutte le percentuali di bio-legante indagate (2 %, 5 % e 10 %), questa ha comportato un aumento significativo della norma del modulo complesso.

Infine, si è voluto confrontare il comportamento di un bitume standard con un bio-legante, in termini di resistenza all'ormaiamento, analizzando solamente il caso con il 2 % di residuo di letame suino, ed i risultati non hanno mostrato una significativa differenza nella profondità dell'ormaia.

In conclusione, l'utilizzo di bio-olio derivante da letame suino porta ad avere una diminuzione della norma del modulo complesso ed un peggioramento di comportamento nei confronti delle alte temperature (ormaiamento), portando, invece vantaggi, dal lato di quelle basse, migliorando, quindi, il comportamento nei confronti della fatica.

In questo caso, pertanto, non si dovrebbero riscontrare grandi problematiche dal punto di vista fessurativo dovendo, invece, prestare attenzione alla presenza di ormaie.

Saranno necessari, quindi, maggiori interventi per ristabilire la planarità del piano di rotolamento utilizzando, per esempio, una fresatura totale degli strati (Full Depth Reclamation - FDR) e successiva ricostruzione.

4. LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

4.1 LCA: filosofia e struttura generale

Il Life Cycle Assessment (LCA), detto anche “Valutazione del ciclo di vita”, è una metodologia che valuta le interazioni presenti tra un prodotto e l’ambiente, considerando il suo intero ciclo di vita, che include: le fasi di preproduzione (estrazione e produzione dei materiali), distribuzione, uso, manutenzione, riciclaggio e dismissione finale. Questo, avviene tramite la quantificazione dell’utilizzo delle risorse: immissioni, come energia, materie prime e acqua ed emissioni nell’ambiente, associate al sistema oggetto della valutazione. In altre parole, il Life Cycle Assessment è un processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali, verificatisi a seguito del ciclo di vita di un prodotto, processo o attività (Biondani 2014; Green Building Council Italia, 2019).

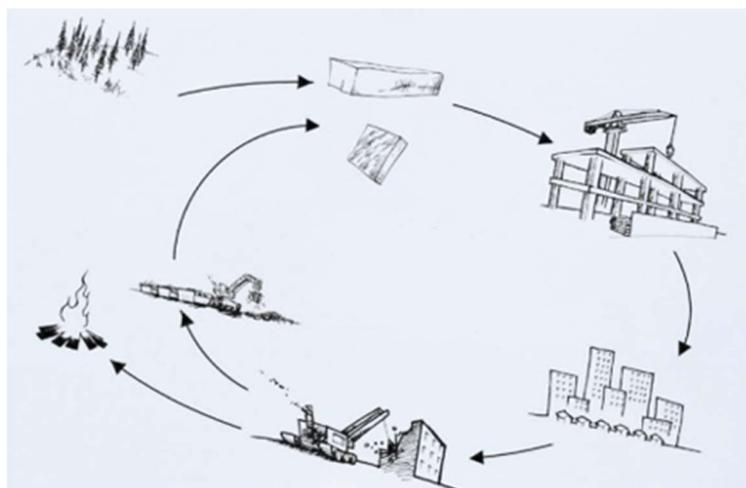


Figura 87 Life Cycle Assessment: schema generale (Green Building Council Italia, 2019).

Questo metodo sta diventando sempre più importante in tutti quei campi dove è richiesta una valutazione della sostenibilità, essendo questa una metodologia che permette di valutare i potenziali impatti, già in fase di concezione e progettazione.

4.1.1 Cenni storici

Le origini del Life Cycle Assessment (LCA) possono essere fatte risalire tra gli anni '60 e '70, quando furono redatti i primi bilanci energetici e di massa, a causa della crescente preoccupazione per l'esauribilità delle risorse fossili ed i cambiamenti climatici, causati dall'inquinamento; problemi, ancora oggi, di grande attualità (Rondini, 2014).

Un nuovo impulso, poi, si ebbe negli anni '80 poiché crebbe, su scala mondiale, il problema dei rifiuti solidi e l'LCA si scoprì essere uno strumento adatto anche all'analisi di queste problematiche ambientali. Contemporaneamente, però, si sviluppò l'interesse per la valutazione dei potenziali impatti legati allo sfruttamento delle risorse e alle emissioni nell'ambiente, facendo quindi un passo in più rispetto alla semplice contabilizzazione degli stessi (Rondini, 2014).

Alla fine degli anni '80, esisteva però una situazione di disordine, in quanto valutazioni LCA condotte sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti tra loro, basati su dati, metodi e terminologie differenti. Nacque, così, la forte esigenza di standardizzare la metodologia, in modo da renderla univoca (Rondini, 2014).

Nel 1993 durante il congresso della SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), tenutosi nel Vermont (USA), venne coniato il termine "LCA" e pubblicato il quadro di riferimento accettato in campo internazionale, per meglio caratterizzare l'obiettivo delle analisi, fino ad allora svolte sotto il nome di REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis*). Pertanto, la definizione di LCA, proposta dalla SETAC in quella occasione, recitava come segue (Rondini, 2014):

"procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici e ambientali relativi a un prodotto/processo/attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto/processo/attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale"

4.1.2 Normativa LCA: ISO 14040 – ISO 14044

Gli standard LCA sono stati creati dall'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO), al fine di fornire le linee guida per l'esecuzione di una Valutazione del ciclo di vita. Questa normativa definisce, quindi, il quadro di riferimento da seguire per effettuare un Life Cycle Assessment (Tisberger Ibañez, 2020).

A livello internazionale, la procedura LCA è regolata dalle norme ISO 14040 e ISO 14044 del 2006, in particolare (Rondini, 2014):

- **ISO 14040** (Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento);
- **ISO 14044** (Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida).

La prima fornisce, in un quadro generale, gli ambiti, le applicazioni e le limitazioni dell'LCA, mentre la seconda, le linee guida: per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, dell'interpretazione dei risultati e della valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti (Rondini, 2014).

Questa normativa, però, non fa riferimento in modo specifico alle opere stradali, non essendo questa tuttora esistente, né a livello nazionale né europeo. Infatti, i metodi LCA specifici per la valutazione del ciclo di vita, di una pavimentazione stradale, sono di origine americana²³, dove l'evoluzione delle tecniche progettuali delle opere stradali e lo studio dei sistemi di trasporto, sono stati oggetto di studio già in passato e quindi, in continua evoluzione (Biondani 2014).

²³ Data l'origine americana anche del tool Excel PaLATE, che utilizzeremo durante la trattazione dei casi studio, si userà la virgola come separatore delle migliaia e il punto come separatore decimale. Le unità di misura saranno riferite al sistema di misura americano e non a quello internazionale (S.I.), cercando comunque di riportare i risultati, anche, in quello S.I.

La norma ISO 14044, come già detto, descrive dettagliatamente i requisiti di esecuzione del LCA, prevedendo quattro differenti fasi (Biondani, 2014; Tisberger Ibañez, 2020):

1) la fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (*Goal and Scope*) (definizione dei limiti del sistema e dell'unità funzionale²⁴ dell'analisi): il livello di dettaglio del LCA dipende dal soggetto e dall'utilizzo previsto dallo studio. La precisione e l'ampiezza del LCA possono differire in modo considerevole, in funzione dell'obiettivo fissato.

2) la fase di analisi dell'inventario del ciclo di vita (*LCI – Life Cycle Inventory*): si concentra sulla raccolta dei dati primari, quantifica il consumo di risorse, i flussi di rifiuti e le emissioni per unità funzionale, attribuibili a tutti i processi, all'interno dei confini del sistema.

3) la fase di valutazione degli impatti del ciclo di vita (*LCIA - Life Cycle Impact Assessment*): mira a comprendere il significato ambientale dei risultati di LCI, trasformandoli in diverse categorie di impatto (ad esempio il Global Warming Potential - GWP). LCIA adotta due elementi obbligatori: selezione delle categorie d'impatto, assegnazione dei risultati di LCI, alle categorie d'impatto selezionate.

4) la fase di interpretazione dei risultati del ciclo di vita (*Life Cycle Interpretation*): fase finale della procedura, nella quale i risultati di un LCI o di un LCIA, o di entrambe, vengono riepilogati e discussi, secondo la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, come base per effettuare conclusioni, raccomandazioni e decisioni.

²⁴ L'unità funzionale rappresenta l'unità di misura di riferimento dello studio a cui verranno normalizzati tutti i dati in ingresso e in uscita. La sua scelta è libera e dipende dalla funzione del prodotto e dall'obiettivo dello studio.

La norma ISO 14040:2006, la definisce come: “Misura della prestazione del flusso in uscita funzionale del sistema prodotto. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in uscita ed in entrata. Questo riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati della LCA, che risulta essere critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che il confronto venga fatto su base comune” (Rondini, 2014).

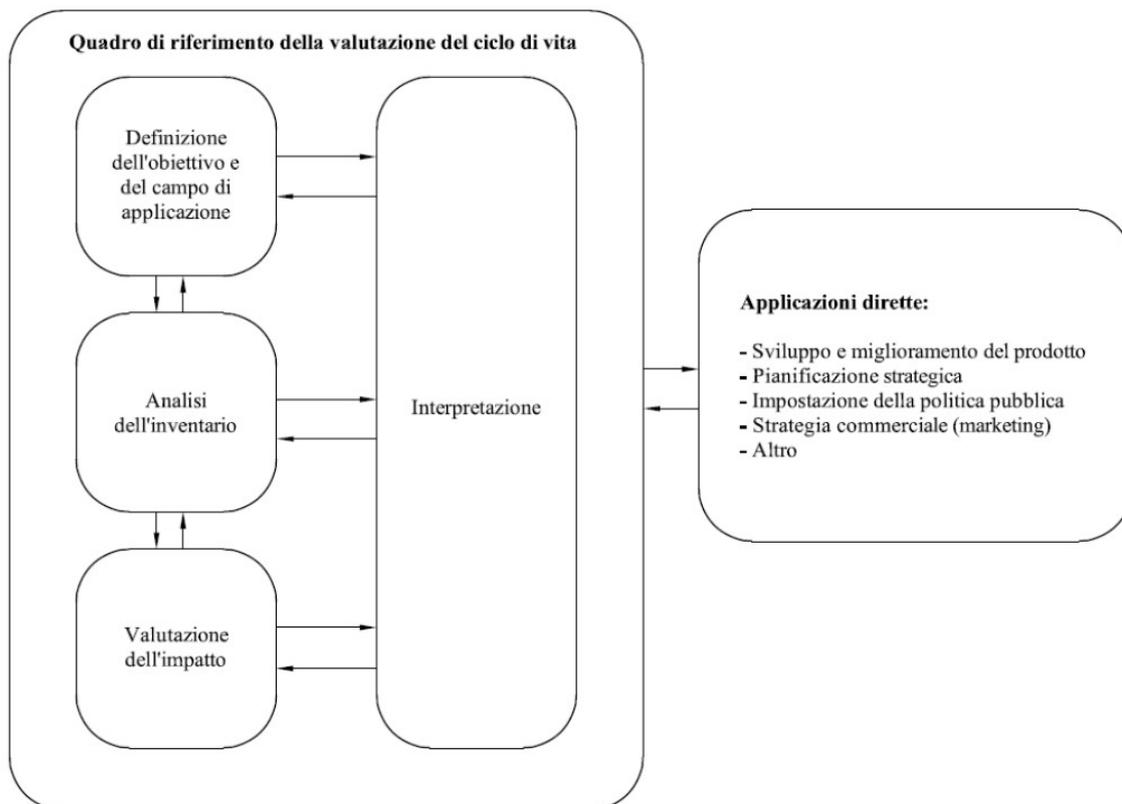


Figura 88 Fasi del LCA (Biondani, 2014).

4.1.3 Life Cycle Assessment di una pavimentazione

Come già detto, la prima fase di un LCA è quella di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, e quest'ultimo può differire in modo considerevole, in funzione dell'obiettivo prefissato o anche in base alla disponibilità dei dati posseduti.

Generalmente ci sono tre modalità di esecuzione di un LCA, per una pavimentazione:

- **“Cradle-to-gate”** (dalla culla al cancello): LCA “parziale” che prede in esame la fase di estrazione della materia prima (culla) fino a quella di costruzione (cancello), escludendo dall'analisi, le fasi di utilizzo e di dismissione;
- **“Cradle-to-grave”** (dalla culla alla tomba): LCA “completo” che prede in esame la fase di estrazione della materia prima (culla) fino allo smaltimento/dismissione (tomba);
- **“Cradle-to-cradle”** (dalla culla alla culla): LCA, detto “a ciclo chiuso” in quanto considera i rifiuti, ovvero i sottoprodotti della pavimentazione generati dalla fase di costruzione e da quella di dismissione, riciclati o riutilizzati nella produzione di un “nuovo” materiale (culla) con un ciclo di vita detto secondario, invece che terminare la propria vita, in una discarica.

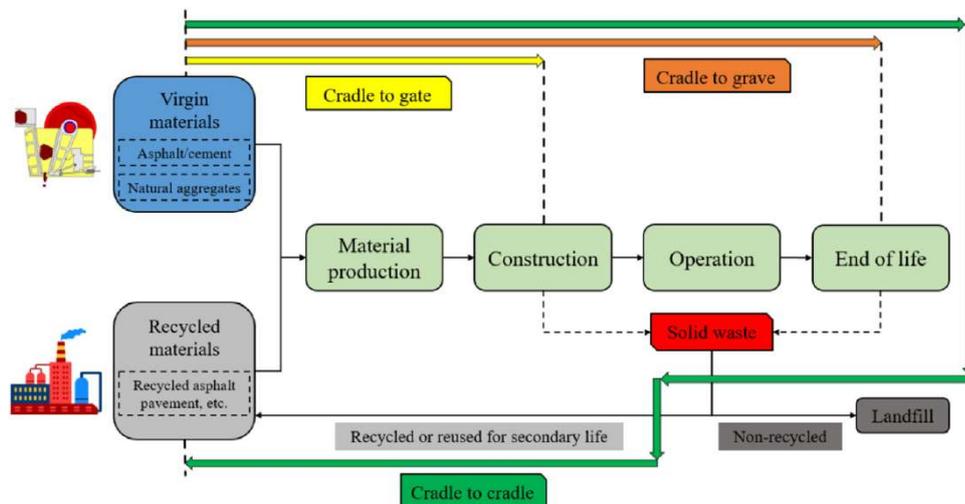


Figura 89 Tipologie di analisi LCA (Li et al., 2019).

La prima tipologia di LCA (dalla culla al cancello) viene utilizzata tutte quelle volte in cui i dati a disposizione per le fasi di uso e dismissione, non sono noti, caso di materiali di nuova generazione o ancora poco studiati. La seconda tipologia (dalla culla alla tomba), invece, è quella più comune anche se, in un futuro, si vorrebbe tendere sempre più al terzo metodo (dalla culla alla culla), raggiungendo, così, un livello di riciclo e quindi di riutilizzo maggiore, auspicabile, in una società sempre più green. In generale, il LCA per una pavimentazione, segue le seguenti fasi:

- Fase di produzione dei materiali;
- Fase di costruzione;
- Fase di utilizzo;
- Fase di manutenzione;
- Fase di dismissione.

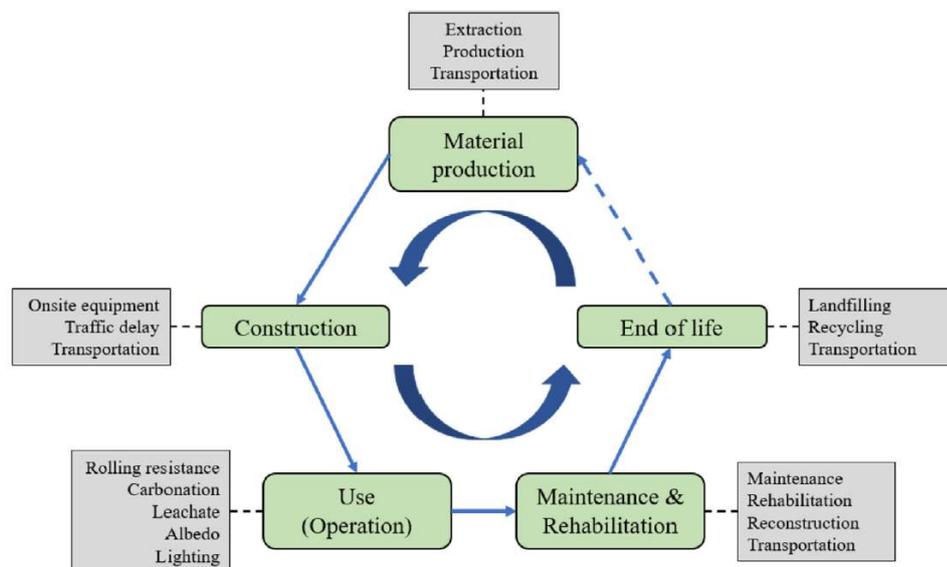


Figura 90 LCA generico di una pavimentazione (Li et al., 2019).

Per ottenere, però, un LCA più completo e rispettoso dell'ambiente, l'obiettivo sarebbe quello di collegare l'ultima fase, quella di dismissione, con la prima, ottenendo così un ciclo chiuso. Nello specifico, in ognuna di queste fasi, devono essere presi in considerazione tutti quei fattori che influiscono su ciascuna di queste, come: energia in ingresso, emissioni in uscita oltre al trasporto, sempre in termini di emissioni, tra una fase e l'altra.

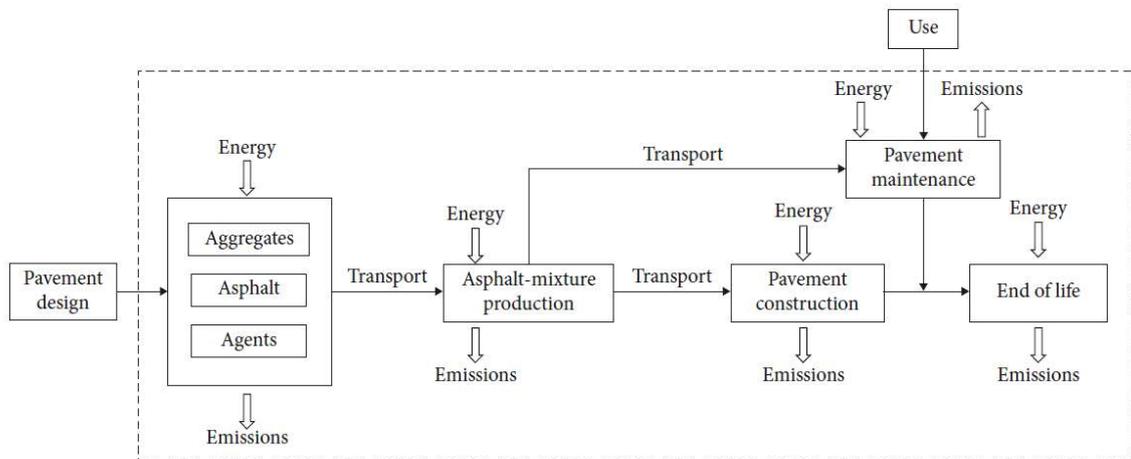


Figura 91 LCA di una pavimentazione (Hui et al., 2019).

Per eseguire un LCA, esistono varie metodologie e soprattutto differenti programmi, tra i quali, per esempio, SimaPro o PalATE, che sfrutta un approccio ibrido²⁵ di LCA. In questo lavoro di tesi si è deciso di utilizzare quest'ultimo, fornendo di seguito maggiori informazioni a riguardo.

²⁵ L'approccio ibrido del LCA è un metodo che combina gli approcci "LCA di processo" e "LCA Input – Output", in modo da sfruttare i loro punti di forza e limitare le loro "debolezze".

Il "LCA di processo" mira a quantificare gli Input e le emissioni di ogni processo discreto, all'interno del ciclo di vita del sistema ed infine, gli input, le emissioni e gli impatti totali del ciclo di vita sono stimati, sommando i dati di tutti i processi discreti.

Il "LCA Input – Output", invece, include nell'analisi, tutti i settori economici, identificando i flussi di beni e servizi tra i diversi settori, tracciando tutti gli Input economici, diretti e indiretti, necessari per produrre un'unità di Output, da un dato settore economico (Tisberger Ibañez, 2020).

4.2 PaLATE: Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects



Figura 92 Logo di PaLATE (Biondani, 2014).

Questo paragrafo è stato redatto eseguendo una ricerca, sia in letteratura, consultando articoli e tesi, sia su siti Internet specializzati nell'ambito analizzato (Biondani, 2014; Celauro et al., 2015; Pasetto et al., 2017; Santero et al., 2010; Tisberger Ibañez, 2020, [1], [2]).

Che cos'è PaLATE?

PaLATE (Strumento per la Valutazione del Ciclo di Vita di una Pavimentazione per gli Effetti Economici ed Ambientali) è uno strumento progettato per la stima degli oneri ambientali ed economici, associati alla progettazione di una pavimentazione stradale negli Stati Uniti, tramite sia un'analisi ambientale, secondo la metodologia LCA (Life Cycle Assessment) che una economica, in base alla metodologia di Valutazione del Costo del Ciclo di Vita (LCCA - Life Cycle Cost Analysis).

PaLATE, in generale, modella il ciclo di vita di una pavimentazione, tenendo conto delle fasi di: estrazione dei materiali, produzione, costruzione, manutenzione e dismissione (fine vita).

Da chi è stato sviluppato?

Questo strumento è stato sviluppato, nel 2003, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università della California (Berkeley Consortium on Green Design and Manufacturing - CGDM), dal team di ricerca del Professor Arpad Horvath.

Per chi è stato sviluppato?

Questo strumento è stato pensato per tutti i progettisti di pavimentazioni, i decision makers delle varie agenzie di trasporto, gli ingegneri civili ed i ricercatori, per avere a disposizione un valido alleato che li aiutasse a comprendere quali potessero essere le implicazioni, dal punto di vista ambientale ed economico, delle loro scelte. PaLATE ci aiuterà, per esempio, a dare una risposta alle seguenti domande, ma non solo:

- Quale(i) opzione(i) di manutenzione ridurrà al minimo gli effetti ambientali ed economici?
- Il cambiamento del tipo e/o della capacità delle attrezzature utilizzate in loco, ridurrà le emissioni?
- La modifica del contenuto di materiale riciclato in una particolare pavimentazione influirà sui risultati ambientali?

Qual è l'interfaccia di PaLATE?

La procedura PaLATE è stata implementata con Microsoft Excel, dove nel file, scaricato da Internet [1], sono presenti vari fogli di lavoro, interconnessi tra di loro, che possono essere suddivisi, in prima approssimazione, in: principali e secondari.

Fogli principali: Introduzione, Design, Costruzione Iniziale, Manutenzione, Attrezzatura, Costi, Risultati Costi, Risultati Ambientali, Riferimenti.

Fogli secondari: Densità, Dettagli Attrezzatura, Emissioni di Trasporto, Vapori, Percolato, Dati Costi, Conversioni e Diagrammi, facenti parte, tutti, della sezione "Dati". Questi fogli permettono di personalizzare il lavoro, in base alle proprie esigenze. Per esempio, nella sezione "Dati Costi" sono presenti i prezzi unitari, riferiti però ai materiali utilizzati negli Stati Uniti, essendo possibile inserire, comunque, i valori riferiti alla propria regione di studio (es. Prezzario Regione Piemonte), oppure nella sezione "Emissioni di Trasporto"

può essere inserito l'LCI di riferimento europeo, rispetto a quello americano, per una valutazione più accurata delle emissioni e dei costi.

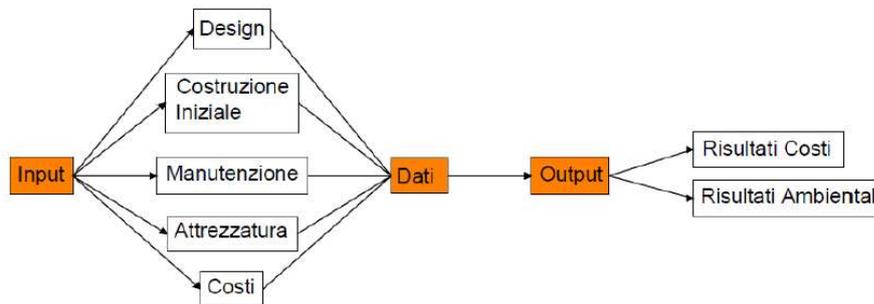


Figura 93 Schema degli Input e Output di PaLATE (Biondani, 2014).

Come si evince dallo schema soprariportato, i fogli elettronici secondari (Dati), fungono da connessione tra i dati di input, che andranno inseriti nei primi cinque fogli elettronici, ed i dati di output, contenuti nei fogli di lavoro rimanenti. Di seguito viene riportato un grafico che illustra, in maniera concisa, la logica e la procedura seguita da PaLATE, durante tutta l'analisi:

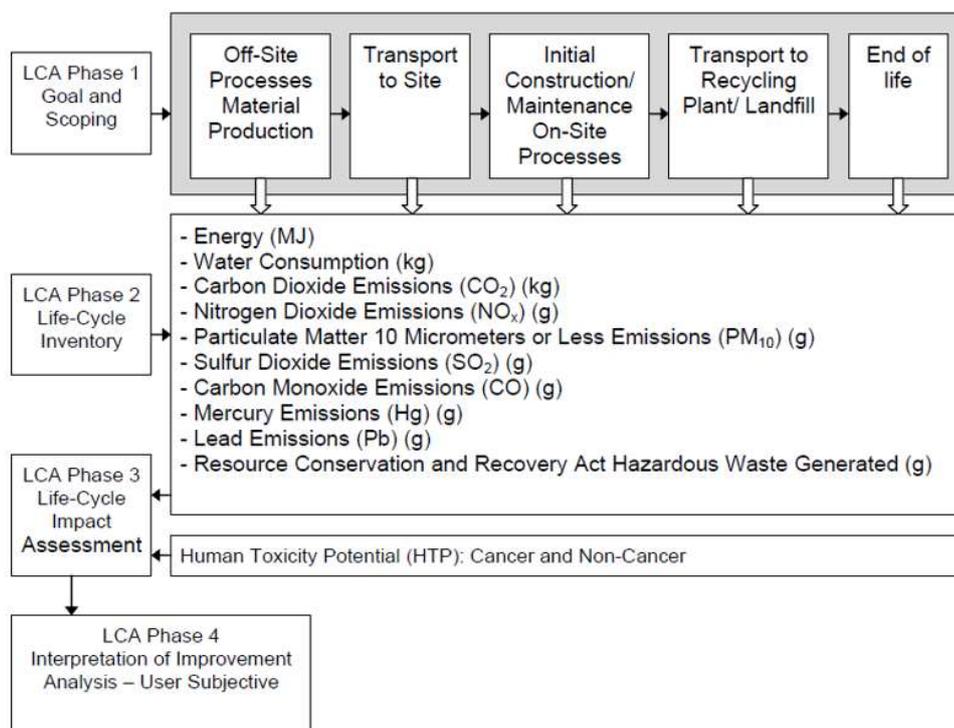


Figura 94 Processo logico seguito da PaLATE (Santero et al., 2010).

PaLATE: Sistema di Misura.

PaLATE è un tool sviluppato negli Stati Uniti e, quindi, il Sistema di Misura utilizzato è quello USC (*United States Customary*), a differenza, invece, del più comune Sistema Internazionale (S.I.). Quindi: le larghezze saranno espresse in piedi (ft), le lunghezze in miglia (miles), gli spessori in pollici (inches), i volumi in iarde cubiche (yd³), mentre le masse in libbre (lb) oppure in tonnellate “americane” (short ton²⁶). Di seguito, si riportano alcune conversioni base, utili per l’esecuzione dei calcoli:

- lunghezze:

$$1 \text{ in} = 0.025 \text{ m}$$

$$1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ mi} = 1.609 \text{ km}$$

- volumi:

$$1 \text{ yd}^3 = 0.764 \text{ m}^3$$

- masse:

$$1 \text{ short ton} = 2000 \text{ lb}$$

$$1 \text{ Mg} = 1.102 \text{ short ton}$$

PaLATE: Vantaggi e Svantaggi.

I principali vantaggi di questo strumento sono: la fruibilità libera, la flessibilità, la trasparenza e la sua struttura analitica.

La fruibilità libera (*free tool*) da parte dell’utente [1], che può scaricare liberamente e gratuitamente dalla rete il file excel di PaLATE, senza costi di licenza, da poter essere, così, utilizzato da un maggior numero di potenziali fruitori (studenti, ricercatori e professionisti).

²⁶ Negli Stati Uniti, la “short ton” è l’unità di misura della massa e rappresenta esattamente 2000 libbre (907.18474 kg), ed è comunemente conosciuta con il nome “ton”. Questa è differente dalla “tonnellata” comunemente conosciuta in Europa che, invece, viene detta “metric ton” (1000 kg = 2,204.62 lb).

La flessibilità permette di utilizzarlo in diversi Paesi, in quanto gli utenti possono apportare modifiche, in base alle loro esigenze, in materia di materiali, di diverse tecniche di manutenzione, tipologia di macchinari utilizzati e non solo, in modo semplice e intuitivo.

Per trasparenza si intende, essenzialmente, la possibilità da parte dell'utente di conoscere l'origine dei dati, delle ipotesi fatte nei calcoli e seguire i percorsi logici eseguiti dal programma per giungere al risultato di un qualsiasi valore, semplicemente osservando i calcoli eseguiti, in automatico, da Excel.

La struttura analitica, infine, permette di poter studiare e analizzare separatamente, ogni fase della progettazione, seguendo uno schema predefinito che guida l'utente, in una corretta ed efficiente progettazione.

Uno dei principali svantaggi riscontrabile in questa metodologia, riguarda, invece, il non puntuale aggiornamento delle banche dati, che potrebbe portare all'obsolescenza precoce del programma, in una realtà progettuale, sempre in continuo aggiornamento. Essendo queste, in realtà, fondamentali per l'accuratezza e l'efficacia del programma, sia in termini di LCI ma anche in termini di nuove tecniche scoperte ed utilizzate nella pratica corrente, necessiterebbero, invece, di un aggiornamento continuo.

Per questo motivo è stato necessario lo sviluppo di una nuova versione di PaLATE, PaLATE 2.0, che ha introdotto l'utilizzo, per esempio, dei materiali riciclati o di scarto, potendo così aggiornare le diverse tipologie di pavimentazioni utilizzabili per l'analisi, assenti nella prima versione, come: il RAP (Recycled Asphalt Pavement) ed il FRAP (Fractionated Recycled Asphalt Pavement).

Un ulteriore aggiornamento che potrebbe essere apportato in futuro, con riferimento anche all'argomento di questo lavoro di tesi, potrebbe riguardare l'implementazione dell'utilizzo di nuovi materiali, anche di origine vegetale e/o naturale, come i bio-leganti, per poterli, così, considerare direttamente nell'analisi.

Per un'analisi più dettagliata, di ciascun foglio di calcolo presente nel file Excel di PaLATE, si rimanda a due lavori di tesi, focalizzate sulla spiegazione del tool:

- "LCA – Life Cycle Assessment applicato alla realizzazione di opere stradali" (Biondani, 2014), nella quale si è analizzata in maniera dettagliata la questione "Costi";
- "Life Cycle Assessment of Pavements through PaLATE", (Tisberger Ibañez, 2020) nella quale si è analizzata in maniera dettagliata la questione "Impatti Ambientali".

4.3 PaLATE: Valutazione degli effetti dovuti alla presenza del bio-legante

L'ultima versione di PaLATE, disponibile in rete, non permette l'inserimento "diretto" di altri materiali diversi da quelli standard, come per esempio quelli di origine naturale e/o vegetale, per la sostituzione parziale o totale del bitume, come nel caso dei bio-leganti e quindi sarà necessario inserirli, in maniera "indiretta".

Analizzando il file Excel, si è deciso di prendere in considerazione i bio-leganti, in due differenti fogli di calcolo: quello "Densities", riguardanti le densità dei materiali considerati nell'analisi, e quello "EMF Transport", riportante, tra le altre, informazioni relative alle emissioni, dovute al trasporto.

Per quanto riguarda il foglio "Densities", sapendo che, il bio-legante ed il bitume posseggono densità differenti, si è deciso di valutarne una densità derivante dalla media pesata sulle percentuali relative, come di seguito riportato:

$$\rho_{bio-binder} = \% B \cdot \rho_B + \% bio \cdot \rho_{bio}$$

dove:

- $\rho_{bio-binder}$: densità del "nuovo" legante, contenete il bio-legante [g/cm³];
- $\% B$: percentuale di bitume [-];
- ρ_B : densità del bitume nel legante [g/cm³];
- $\% bio$: percentuale del bio-legante [-];
- ρ_{bio} : densità del bio-legante [g/cm³].

Si è deciso di prendere in considerazione la presenza del bio-legante nella densità, in quanto, questa, influenza la massa e il trasporto del materiale, oltre alle emissioni che ne derivano. Ogni macchinario, possiede un carico massimo per asse, non superabile e, pertanto, a parità di volume, la densità gioca un ruolo non trascurabile nei confronti della massa e quindi, per esempio, questo potrebbe portare ad effettuare un maggior numero di viaggi per il trasporto del materiale, aumentando, così, le emissioni dovute allo stesso.

Un altro modo per inserire, in PaLATE, la presenza dei bio-legante, è il foglio “EMF transport”, nel quale sono presenti i vari Inventari (LCI) di tutti i materiali. In questo caso, si è deciso di considerare i bio-modificanti, eseguendo una media pesata sulle percentuali relative delle varie emissioni o consumi. Visto che l’analisi, nello specifico, verterà su due principali impatti, la presenza del bio-legante, viene valutata nel seguente modo:

per quanto riguarda l’anidride carbonica equivalente ($CO_{2,eq}$):

$$CO_{2,eq,bio-binder} = \% B \cdot CO_{2,eq,B} + \% bio \cdot CO_{2,eq,bio}$$

dove:

- $CO_{2,eq,bio-binder}$: emissioni di anidride carbonica equivalente del “nuovo” legante, contenete il bio-legante [g/ton];
- $\% B$: percentuale di bitume nel legante [-];
- $CO_{2,eq,B}$: emissioni di anidride carbonica equivalente del bitume [g/ton];
- $\% bio$: percentuale del bio-legante [-];
- $CO_{2,eq,bio}$: emissioni di anidride carbonica equivalente del bio-legante [g/ton].

mentre, per quanto riguarda l’energia:

$$E_{bio-binder} = \% B \cdot E_B + \% bio \cdot E_{bio}$$

dove:

- $E_{bio-binder}$: energia necessaria per il “nuovo” legante, contenete il bio-legante [MJ/ton];
- $\% B$: percentuale di bitume nel legante [-];
- E_B : energia necessaria per la produzione del bitume [MJ/ton];
- $\% bio$: percentuale del bio-legante [-];
- E_{bio} : energia necessaria per la produzione del bio-legante [MJ/ton].

4.3.1 Determinazione della densità dei bio-leganti di riferimento

Per determinare i valori di densità del bio-olio derivante da letame suino e della lignina, sono stati presi a riferimento studi e fonti, presenti in letteratura.

Per quanto riguarda il bio-olio da letame suino, ci si è riferiti, nel dettaglio, allo studio di Xiu et al. (2012) dove si sono studiati e paragonati differenti metodi di estrazione di bio-oli, da diverse risorse naturali. Per il letame suino è stata eseguita una liquefazione idrotermale (HTL), ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 7 Caratteristiche bio-olio derivante da letame suino (Xiu et al., 2012).

Properties	Liquefied bio-oil from swine manure [21]	Pyrolysis bio-oil from wood [39]	Heavy petroleum fuel oil [40]
Moisture content (wt%)	2.37	15–30	0.1
pH	–	2.5	–
Specific gravity	1	1.2	0.94
Elemental composition (wt%)			
	C 72.58	54–58	85
	H 9.76	5.5–7.0	11
	O 13.19	35–40	1.0
	N 4.47	0–0.2	0.3
Ash	0.78	0–0.2	0.1
HHV(MJ/kg)	36.05	16–19	40
Viscosity(at 50 °C)(cP)	843	40–100	180
Solids (wt%)	–	0.2–1	1
Distillation residue (wt%)	63	Up to 50	1

Dalla tabella soprariportata, si può ricavare il valore della densità relativa ρ^* (*specific gravity*), adimensionale, espressa come: “il rapporto tra la densità del materiale ρ , in esame, e la densità di un materiale di riferimento ρ_{rif} ”. Di solito, per i liquidi si usa come densità di riferimento quella dell’acqua, valutata alla temperatura di 4 °C, essendo queste le condizioni di massima densità.

Nello studio di Samieadel et al. (2018), che prende a riferimento un LCA sul bio-olio derivante da HTL del letame suino, è stato ipotizzato un valore di densità del bio-olio, circa simile a quello dell’acqua, essendo il materiale di partenza, il letame, composto da acqua, per circa l’80 %.

Quindi, si procede con la valutazione della densità dell'acqua, a 4°C, servendosi della seguente relazione (Santagata et al., 2016), in cui la temperatura va espressa in gradi centigradi:

$$\rho_{w,T} = 1.00016584 - 0.000793 \cdot T - 0.00000529 \cdot T^2 = 0.997 \frac{g}{cm^3}$$

Si procede, pertanto, alla stima della densità del bio-olio, in seguito a liquefazione idrotermale, assumendo una densità relativa ρ^* , pari all'unità, come riportato nella tabella, inserita nella pagina precedente, ottenendo:

$$\rho_{bio-olio} = \rho^* \cdot \rho_{H_2O} = 1 \cdot 0.997 \frac{g}{cm^3} = 0.997 \frac{g}{cm^3} = 997 \frac{kg}{m^3}$$

Per quanto riguarda, invece, la densità della lignina si è fatto riferimento ad un articolo²⁷, nel quale, la stessa, è stata valutata in un range tra 1.3 – 1.4 g/cm³, decidendo di utilizzare un valore medio, pari a:

$$\rho_{lignina} = 1.35 \frac{g}{cm^3} = 1350 \frac{kg}{m^3}$$

²⁷ <https://www.lifeder.com/lignina/>

4.4 Life Cycle Inventory (LCI)

Come già detto, l'analisi d'inventario (LCI – *Life Cycle Inventory*) si concentra sulla raccolta dei dati primari, quantifica il consumo di risorse, i flussi di rifiuti e le emissioni per unità funzionale, attribuibili a tutti i processi, all'interno dei confini del sistema. In questo lavoro di tesi si vuole eseguire un LCA di leganti “non convenzionali”, detti bio-leganti, in modo da poter sostituire parzialmente il legante di base, bitume, con: bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino o lignina. Di seguito vengono riportate le analisi d'inventario di tutti e tre i materiali: bitume, bio-olio e lignina.

4.4.1 Life Cycle Inventory: bitume

Per quanto riguarda il bitume, si prendono a riferimento i dati riportati in Eurobitume (European Bitumen Association, 2012) che analizza valori riferiti sia a bitumi standard che a bitumi modificati con polimeri (PMB). In questo studio si farà riferimento a quest'ultima tipologia di bitume, essendo usato nei casi studio, analizzati nei capitoli seguenti.

Il bitume, come noto, è un co-prodotto del processo di raffinazione del petrolio greggio e al fine di valutarne l'impatto ambientale, si deve definire una modalità di allocazione²⁸ degli impatti della catena di produzione tra il bitume e gli altri co-prodotti: benzina, olio combustibile pesante, gas di petrolio liquefatto (European Bitumen Association, 2012).

Il problema dell'allocazione si manifesta nel momento in cui un processo industriale possiede più di un prodotto, oppure ricicla i prodotti intermedi o di scarto, come fossero materie prime. Pertanto, i flussi di materia ed energia devono essere allocati ai differenti prodotti, secondo procedure definite (Rondini, 2014).

²⁸ La definizione di “allocazione”, riportata nella ISO 14040, par. 3.1, recita: “ripartizione dei flussi in ingresso o uscita di un processo unitario appartenente al sistema-prodotto studiato” (ISO, 2006).

In altre parole, per “allocazione” si intende: “l'attribuzione dei flussi inquinanti, ai diversi prodotti e sottoprodotti in uscita dalla filiera considerata, in funzione di parametri scelti su base più o meno soggettiva (massa, valore energetico, valore economico), consentendo, quindi, la suddivisione (allocazione) delle emissioni in maniera proporzionale, secondo i parametri voluti.”

Lo scopo della procedura di allocazione è quello di individuare un parametro adeguato in modo tale che, sia gli ingressi che le uscite del sistema studiato, possano essere assegnati al prodotto in esame. Secondo le norme ISO 14040 e ISO 14044, esistono diversi modi per affrontare la questione dell'allocazione, preferendo, però, un'allocazione fisica (basata sulla massa, energia, ecc.) oppure, quando ciò non fosse possibile, un'allocazione di tipo economica, basata sui relativi valori di mercato (European Bitumen Association, 2012).

In Eurobitume, l'allocazione degli ingressi e delle uscite, alle diverse fasi della catena di produzione, sono differenti e realizzate come segue (European Bitumen Association, 2012):

- per le fasi di estrazione e di trasporto del greggio, si utilizza un'allocazione di massa, in quanto, in queste fasi tutti i costituenti del petrolio greggio, dalla benzina all'olio combustibile pesante, risultano essere ancora mescolati e, quindi, considerati materiali grezzi, per i quali si può stabilire un rapporto di massa (resa);
- l'allocazione a livello di raffinazione si basa, invece, su fattori economici, in quanto, nessun rapporto fisico può essere stabilito tra il bitume e gli altri coprodotti. In primo luogo, non è possibile modificare il rapporto tra bitume e gli altri coprodotti senza un cambiamento significativo nel processo mentre, in secondo luogo, i co-prodotti hanno funzioni differenti: il bitume, infatti, risulta essere una materia prima grezza mentre gli altri co-prodotti sono utilizzati come combustibili, ecco perché si raccomanda una ripartizione economica per quanto concerne il bitume.

Eurobitume riporta, per ciascuna tipologia di bitume analizzato (standard o modificato con polimeri), sia un inventario del ciclo di vita (LCI) che tiene conto dei "processi e dell'infrastruttura" sia uno, invece, che tiene conto solamente del "processo".

Nel primo caso (processo + infrastruttura) esso include: i flussi associati alla costruzione delle infrastrutture necessarie per produrre, trasportare e raffinare il petrolio greggio. In questa analisi verrà preso a riferimento l'LCI relativo a "processo + infrastruttura", in quanto, per lo scopo del lavoro, risulta essere quello più rappresentativo dei flussi che entrano in gioco, durante l'analisi.

Si riportano, di seguito, i valori di interesse estratti da Eurobitume, facendo riferimento ad una tonnellata di bitume (unità funzionale):

Tabella 8 Emissioni e consumo di acqua per bitume PMB (European Bitumen Association, 2012).

CO ₂ [g/ton]	CH ₄ [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	H ₂ O [l/ton]
346,016	1,205	1,083	1744	1734	400	8,135

Alcuni di questi valori, però, verranno convertiti nelle idonee unità di misura, richieste dal tool PaLATE. Per esempio, il consumo di acqua deve essere espresso in g/ton, quindi:

$$H_2O = 8,135 \frac{l}{ton} = 8,135 \frac{kg}{ton} = 8,135,000 \frac{g}{ton} = 7,379,948 \frac{g}{short ton}$$

La tabella riporta sia il valore di emissione di anidride carbonica (CO₂) che quella di metano (CH₄). Su PaLATE, però, viene riportata solamente la cella "CO₂" e si è deciso di considerarla, in mancanza di un riscontro in letteratura, come il valore equivalente di anidride carbonica (CO_{2,eq}), che tiene conto anche delle emissioni di metano, valore di maggiore interesse nelle analisi LCA:

$$CO_{2,eq} = CO_2 + 25 \cdot CH_4 = 346,016 \frac{g}{ton} + 25 \cdot 1,205 \frac{g}{ton} = 376,141 \frac{g}{ton}$$

$$CO_{2,eq} = 376,141 \frac{g}{ton} = 341,230 \frac{g}{short ton}$$

In ultimo, si valuta anche l'energia, MJ/ton, necessaria per la produzione di una tonnellata di bitume, considerando i consumi delle risorse energetiche (kg/ton) ed i rispettivi poteri caloriferi (MJ/kg).

Consumi delle risorse energetiche (RE):

Tabella 9 Risorse energetiche per la produzione di una tonnellata di bitume (European Bitumen Association, 2012).

Gas Naturale [kg/ton]	52.3
Petrolio greggio [kg/ton]	69.1
Carbone [kg/ton]	18
Uranio [kg/ton]	0.0004

Poteri caloriferi (PC), ricavati dalla letteratura disponibile in rete [3], pari a:

Tabella 10 Poteri caloriferi delle risorse energetiche per la produzione di una tonnellata di bitume.

Gas Naturale [MJ/kg]	52.3
Petrolio greggio [MJ/kg]	44.5
Carbone [MJ/kg]	18
Uranio [MJ/kg]	500,000

A questo punto è possibile valutare il consumo di energia (E), come:

$$E = \sum RE_i \cdot PC_i$$

$$52.3 \frac{kg}{ton} \cdot 52.3 \frac{MJ}{kg} + 69.1 \frac{kg}{ton} \cdot 44.5 \frac{MJ}{kg} + 18 \frac{kg}{ton} \cdot 18 \frac{MJ}{kg} + 0.0004 \frac{kg}{ton} \cdot 500,000 \frac{MJ}{kg}$$

ottenendo:

$$E = 6,334 \frac{MJ}{ton} = 5,746 \frac{MJ}{short ton}$$

Di seguito si riporta la tabella finale, con i valori da inserire in PaLATE:

Tabella 11 LCI “finale” per bitume PMB, da inserire in PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	Energia [MJ/ton]	H ₂ O [l/ton]
341,230	983	1582	1573	363	5,746	6,694,976

Nella tabella sopraripotata, sono state evidenziate le colonne riferite all’anidride carbonica equivalente ed al consumo di energia, essendo, queste, le due variabili prese a riferimento in questo studio, in quanto sia per il bio-olio che per la lignina, non esiste ancora una letteratura esaustiva, dalla quale evincere le informazioni rimanenti.

4.4.2 Life Cycle Inventory: bio-olio derivante da letame suino

Il primo bio-legante preso in esame è il bio-olio derivante dalla liquefazione idrotermale (HTL) del letame suino. Per maggiori informazioni relative al processo di Liquefazione Idrotermale, si rimanda all’*Appendice II*. Di seguito si riporta il processo di produzione, tramite flow chart, del caso studio preso in riferimento (Samieadel et al., 2018) nel quale si sostituisce parzialmente il bitume con il 10 % di bio-olio:

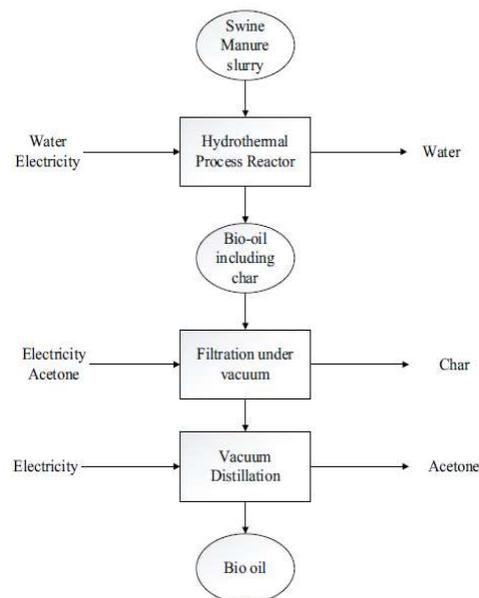


Figura 95 Processo di produzione del bio-olio derivante da letame suino tramite HTL (Samieadel et al., 2018).

Partendo dal letame suino, occorre poi eseguire un processo di Liquefazione Idrotermale ed in seguito una filtrazione ed una distillazione sottovuoto, per separare il bio-olio da impurezze e materiale solido. Di seguito si riportano i dati di LCI ottenuti dal gruppo di ricerca:

Parameter	Amount	Unit	Reference
Production of bio-binder energy consumption	1.19×10^9	J/ton of material	Ocfemia et al. (2006)
Vacuum distillation	0.19×10^9	J/ton of material	Readings from device
Emissions of production of bio-binder			
Carbon dioxide	76.87	kg/ton of material	Gas chromatography
Nitrous oxide	0.0017	kg/ton of material	FTIR test
Methane	1.6	kg/ton of material	Gas chromatography
Mixing and compaction of 10% bio-modified binder*	0.21×10^9	J/ton of material	DSC test results
Feedstock energy of 10% bio-modified binder*	41.23×10^9	J/ton of material	Bomb calorimeter measurement

*Comprises 90 wt% asphalt binder and 10 wt% bio-binder

Figura 96 LCI del bio-olio derivante da letame suino (Samieadel et al., 2018).

Per questo bio-legante, in assenza di dati in letteratura, ci si focalizza solamente sull'emissione di $CO_{2,eq}$ e dell'energia necessaria per la produzione del bio-olio. Per quanto riguarda la $CO_{2,eq}$, la si valuta come prima:

$$CO_{2,eq} = CO_2 + 25 \cdot CH_4 = 76,870 \frac{g}{ton} + 25 \cdot 1,600 \frac{g}{ton} = 116,870 \frac{g}{ton}$$

$$CO_{2,eq} = 106,023 \frac{g}{short ton}$$

Per l'energia necessaria per la sola produzione del bio-olio, invece, si prende in considerazione, osservando il flow chart soprariportato, sia quella relativa alla produzione che quella utilizzata per la distillazione sottovuoto:

$$E = 1,190 \frac{MJ}{ton} + 190 \frac{MJ}{ton} = 1,380 \frac{MJ}{ton} = 1,252 \frac{MJ}{short ton}$$

Ricapitolando:

Tabella 12 Valori LCI per bio-olio da letame suino, da inserire in PaLATE (Samieadel et al., 2018) (ton = short ton).

$CO_{2,eq}$ [g/ton]	Energia [MJ/ton]
106,023	1,252

4.4.3 Life Cycle Inventory: lignina

Per quanto riguarda l'LCI della lignina, vista la presenza in letteratura di un numero maggiore di studi, rispetto a quelli relativi al bio-olio derivante da letame suino, si è eseguito il medesimo ragionamento effettuato nell'Eurobitume, per quanto concerne il bitume, eseguendo un'allocazione di tipo economica sia per l'emissione di anidride carbonica che per l'energia necessaria alla produzione della lignina Kraft.

Per quanto attiene all'emissione di anidride carbonica si è fatto riferimento allo studio condotto da Khandelwal (2019), il quale ha indagato, attraverso differenti tipologie di allocazione (di massa, di energia ed economica), le relative emissioni di CO₂, dovute alla preparazione di un conglomerato bituminoso, tipo ZOAB (*Porous Asphalt - Zeer Open Asphalt Beton*). I risultati riportati nello stesso, fanno riferimento al conglomerato, anche se in questo lavoro di tesi, si è maggiormente interessati all'emissione di gas serra riferiti alla trasformazione e all'ottenimento della lignina in polvere, attraverso il processo, detto Lignoboost. Come riportato da Khandelwal (2019), questo processo è responsabile della maggior parte delle emissioni dirette di gas serra in atmosfera e quindi si è deciso di assumere tale valore, riportato nello studio, come quello di nostro interesse, in quanto non sono stati rinvenuti valori, riferiti esclusivamente al processo menzionato.

Il valore di emissione di CO_{2,eq.}, valutato attraverso un'allocazione di tipo economica, riportato nello studio di Khandelwal (2019), della lignina Kraft, risulta essere pari a:

$$CO_{2,eq.} = 59,600 \frac{g}{ton} = 54,068 \frac{g}{short ton}$$

Per quanto riguarda, invece, il valore di energia, seguendo la definizione di "allocazione", vanno individuati i prodotti o sottoprodotti, derivanti da una stessa filiera, in modo da poter capire come suddividere i flussi, in questo caso, energetici, rispetto al totale.

Come noto, dal legno, attraverso un processo di lavorazione (processo Kraft) si ottengono: la polpa di cellulosa, destinata all'industria della carta, e uno scarto, detto black liquor, contenete al suo interno la lignina ed altri scarti di lavorazione.

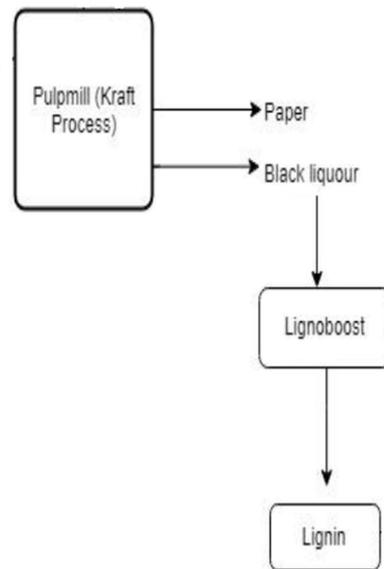


Figura 97 Processo Kraft e sottoprodotti ottenuti (riadattato) (Khandelwal, 2019)).

Per giungere alla suddivisione dei flussi di energia tra polpa di cellulosa e black liquor sono stati ricercati, in letteratura, studi che analizzassero questi due processi distintamente. Oltre a questo, è stata eseguita una ricerca mirata, anche, sui due rispettivi costi (€/ton) della polpa e della lignina.

Partendo dalla quantificazione delle energie, per quanto riguarda la polpa di cellulosa (o pasta Kraft), è stato preso a riferimento uno studio [4], nel quale viene specificato che esistono differenti stabilimenti per la produzione di pasta di cellulosa, in base al processo: non integrati²⁹ e integrati³⁰.

²⁹ Gli stabilimenti non integrati di pasta (pasta commerciale), producono solo la pasta, che viene quindi venduta sul mercato e, queste, acquistano la stessa, per la loro produzione di carta.

³⁰ Negli stabilimenti integrati le attività di produzione della pasta e della carta, si svolgono nello stesso stabilimento.

Nello studio [4], non sono stati trattati:

- i processi a monte, rilevanti dal punto di vista ambientale, come: la gestione forestale, la fabbricazione, in altri stabilimenti, dei prodotti chimici, necessari per la lavorazione e il trasporto delle materie prime alla cartiera;
- le attività a valle, come la stampa.

Inoltre, esistono varie tipologie di fabbriche di pasta Kraft, dette a basso consumo energetico, dove le componenti di energia termica ed elettrica sono indicate di seguito:

- *fabbriche non integrate di pasta Kraft sbiancata*: 10-14 GJ/Adt³¹ di calore di processo e 0.6-0.8 MWh/Adt di energia elettrica;
- *fabbriche integrate di pasta Kraft sbiancata*: 14-20 GJ/Adt di calore di processo e 1.2-1.5 MWh/Adt di energia elettrica;
- *fabbriche integrate di pasta Kraft non sbiancata*: 14-17.5 GJ/Adt di calore di processo e 1-1.3 MWh/Adt di energia elettrica.

Per questo lavoro di tesi, non entrando nel particolare della diversa tipologia di stabilimento, si è deciso di prendere a riferimento un valore medio di energia, pari a:

$$E_{polpa} = 14,917 \frac{MJ}{ton} = 15,533 \frac{MJ}{short ton}$$

Per quanto riguarda, invece, l'energia necessaria per la precipitazione della lignina, partendo dal black liquor, si è preso a riferimento un differente studio, condotto da Bernier et al. (2013). Questo si è concentrato sull'inventario del ciclo di vita (LCI) della lignina, originata dal processo di produzione della pasta di cellulosa Kraft, eseguendolo tramite la banca dati *Ecoinvent 2.2*. Il confine del sistema include la precipitazione della lignina dal black liquor, il lavaggio e l'asciugatura ma esclude: la raccolta della legna e il processo di macero. Di seguito si riporta uno schema nel quale vengono mostrate le principali fasi del recupero della lignina in un mulino Kraft ed i corrispondenti limiti del sistema, considerato in questa analisi del ciclo di vita (LCA).

³¹ *Air dried ton*: tonnellata "secca".

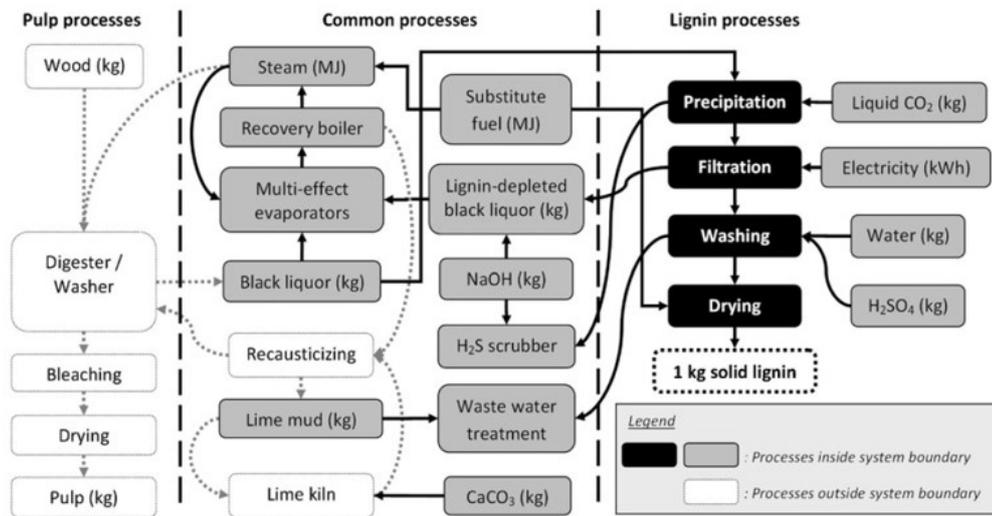


Figura 98 Confine del sistema per l'LCI della lignina Kraft (Bernier et al., 2013).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva, nella quale si possono individuare le informazioni utili al nostro scopo:

Input	Unit	Quantity	ecoinvent process name
Natural gas	MJ	31.5	Natural gas, burned in industrial furnace >100 kW/RER
CO ₂	kg	0.30	Carbon dioxide liquid, at plant/RER
H ₂ SO ₄	kg	0.230	Sulfuric acid, liquid, at plant/RER
NaOH	kg	0.107	Sodium hydroxide, 50 % in H ₂ O, production mix, at plant/RER
CaCO ₃	kg	0.230	Limestone, milled, packed, at plant/CH
Water	kg	4.85	Tap water, at user/RER
Electricity	kWh	0.010	Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE
Trucking	tkm	0.934	Transport, lorry 16–32 t, EURO4/RER

Figura 99 Processi Ecoinvent, utilizzati per modellare l'LCI della lignina Kraft (Bernier et al., 2013).

Dalla tabella soprariportata si individua il valore di energia utilizzata e stimata per il processo di estrazione della lignina, valutata pari a:

$$E_{lignina} = 31,500 \frac{MJ}{ton} = 28,576 \frac{MJ}{short ton}$$

Come evidente, il valore di energia appena riportato, risulta essere molto più alto rispetto a quello ricavato per la sola polpa di cellulosa.

Questo è dovuto al fatto che per l'estrazione della lignina sono necessarie maggiori lavorazioni, che richiedono un consumo superiore, in termini di energia.

Essendo interessati ad un'allocazione di tipo economico, sono stati reperiti anche i valori di mercato (€/ton) relativi sia alla polpa che alla lignina.

Per quanto riguarda il costo della polpa Kraft, si è fatto riferimento allo studio condotto da Secchi et al. (2019), il quale ha investigato, tramite un LCA e differenti allocazioni, il potenziale utilizzo della lignina non come scarto, ma come un co-prodotto della filiera Kraft. Nel caso specifico, viene riportata l'allocazione economica, in base al prezzo di mercato della lignina, relativo al periodo Ottobre 2013 - Maggio 2015.

Per quanto concerne il costo della polpa, il gruppo di studiosi ha fatto riferimento all'Index Mundi³² [5], portale che raccoglie statistiche di vari settori e differenti risorse, rilevando un prezzo medio della lignina, pari a: **688 €/ton**.

Per quanto attiene, invece, al costo della lignina, la ricerca di un unico valore, risulta essere più complessa, in quanto questo dipende dalla qualità della lignina ottenuta, in seguito al processo Kraft. In letteratura sono presenti diversi studi che indicano un costo diverso di lignina che, in base alla sua qualità, può variare dai 310 €/ton ai 2500 €/ton. Non essendo, pertanto, facilmente determinabile il valore di mercato della lignina, si è preso a riferimento il prezzo indicato nello studio di Secchi et al. (2019), pari a **1500 €/ton**, valore medio, tra 1000 e 2000 €/ton, presi come limiti inferiore e superiore, sui quali è stata eseguita, poi, una *Sensitivity Analysis*, per investigare come varino le percentuali di allocazione, rispettivamente, per polpa e lignina Kraft.

Dallo studio, si evince che, eseguendo un'allocazione di tipo economico, considerando il limite superiore di 2000 €/ton, è stato riportato che il 58 % è stato allocato nella produzione della polpa, mentre il restante 42 % nella lignina.

³² L'Index Mundi, riferito alla polpa di cellulosa (*Wood Pulp Monthly Price*), riporta il costo di mercato mensile e ne rappresenta un andamento grafico, per diversi orizzonti temporali (se mesi, uno, cinque, dieci, quindici e venti anni).

Considerando, invece, il costo minimo di 1000 €/ton, è stato ottenuto che il 74% fosse allocato nella produzione della polpa ed il restante 26 % nella lignina. Infine, poi per 1500 €/ton, di costo della lignina, è stato considerato che il 65 % degli impatti fossero allocati nella produzione della polpa ed il restante 35 % nella lignina.

Infine, nell'analisi PaLATE, verrà utilizzato un valore di energia, dovuta alla produzione di lignina, pari a:

$$E = 35 \% \cdot E_{tot} = 16,246 \frac{MJ}{ton} = 14,738 \frac{MJ}{short\ ton}$$

Ricapitolando:

Tabella 13 Valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	Energia [MJ/ton]
54,068	14,738

5. CASI STUDIO

Dopo aver eseguito, nei precedenti capitoli, un'ampia analisi dei vari bio-leganti presenti in letteratura e successivamente alla descrizione della procedura LCA, questo capitolo si pone l'obiettivo di comprendere se l'utilizzo di alcuni bio-leganti, tra cui il bio-olio derivante da letame suino e la lignina, possano portare vantaggi o meno, in termini di impatti ambientali, valutandoli tramite il tool PaLATE.

Lo studio si focalizzerà in particolare su due specifici impatti: l'emissione di $CO_{2,eq}$ e l'energia impiegata, nell'intero processo. Negli studi presenti in letteratura, per entrambi i bio-leganti, si utilizzano approcci di tipo "cradle-to-gate"³³, in quanto i materiali sono, spesso, in via di sperimentazione e non sempre sono presenti studi in vera grandezza, che prendano in riferimento, anche, le fasi successive alla formazione del conglomerato.

In questo lavoro, invece, si cercherà di utilizzarne uno "cradle-to-grave"³⁴, prendendo in considerazione, anche, le fasi di manutenzione e di dismissione della pavimentazione, effettuando le dovute ipotesi e considerazioni.

I due casi studio presi a riferimento (scenari base, senza sostituzione parziale con bio-bindes) sono i medesimi già studiati da Tisberger Ibañez (2020) ma, in questo contesto, si eseguirà un'ulteriore e diversa analisi. I due casi studio sono:

- il viadotto "Torre del Colle" sull'autostrada A32, fornito dalla società Sitalfa S.p.A.;
- una strada extraurbana italiana, con riferimento allo studio condotto da Farina et al. (2014).

³³ "Cradle-to-gate" (dalla culla al cancello): LCA "parziale" che prede in esame la fase di estrazione della materia prima (culla) fino a quella di costruzione (cancello), escludendo dall'analisi, le fasi di utilizzo e di dismissione.

³⁴ "Cradle-to-grave" (dalla culla alla tomba): LCA "completo" che prede in esame la fase di estrazione della materia prima (culla) fino allo smaltimento/dismissione (tomba).

5.1 Primo caso studio: Viadotto “Torre del Colle” – A32 (Sitalfa S.p.A.)

Nel primo caso studio si analizza la pavimentazione del Viadotto “Torre del Colle”, situato lungo la A32, Autostrada del Frejus o Torino-Bardonecchia, sulla quale verrà eseguita un LCA, focalizzandosi, principalmente, sugli impatti ambientali.



Figura 100 Localizzazione geografica A32 (Wikipedia).

Di seguito, si evidenziano tutte le fasi eseguite in PaLATE, per la computazione degli impatti ambientali, riportando e commentando gli eventuali calcoli, eseguiti, riportando, come esempio, solamente quelli effettuati per il caso di sostituzione parziale al 50 % con lignina. Successivamente, si evidenzieranno i risultati ottenuti, anche, in seguito alla sostituzione con diverse tipologie di bio-leganti e relative differenti percentuali, cercando di trarre conclusioni, se presenti, osservando, anche, eventuali differenze, dal punto di vista degli impatti ambientali.

Il *Caso Base*, conglomerato costituito solamente da bitume modificato, senza alcuna aggiunta di bio-leganti, come già analizzato nel lavoro di tesi di Tisberger Ibañez (2020, viene riportato nell'*Appendice V*. Nella stessa, si elencano tutti i dati da inserire nel tool, divisi per fasi (design, costruzione iniziale, manutenzione, attrezzature ed amissioni di trasporto), mentre di seguito si commenteranno solamente le prime tre fasi, essendo le altre invariate, in termini di dati di input.

5.1.1 FASE 1: Design

Nel primo foglio di calcolo del tool PaLATE, denominato "Design", vanno inserite tutte le dimensioni geometriche della pavimentazione, presa in esame (lunghezza, larghezza e spessore di ciascuno strato presente), oltre al periodo di analisi sul quale si vogliono determinare gli impatti.

Per quanto riguarda la geometria, si analizzerà solamente il rifacimento della corsia di accelerazione e la banchina sinistra. La lunghezza del tratto di analisi è pari a 382 m (0.24 mi), che risulterà essere anche l'unità funzionale dell'analisi LCA, con una larghezza della corsia pari a 3.75 m e una larghezza della banchina pari a 0.90 m, considerando nullo il volume della scarpata, trovandosi in un viadotto. Nel tool, la larghezza inserita è pari alla somma tra quella della corsia e quella della banchina, pari a 4.65 m. Per quanto riguarda, invece, gli spessori, rispettivamente, di 5 cm e 7 cm, si considereranno solamente lo strato di usura e di collegamento. Infine, per quanto concerne il periodo di analisi si è preso pari a 20 anni.

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
Wearing Course	15.25	0.24	1.97	117
Binder Course	15.25	0.24	2.76	165
Wearing Course 3				
Subbase 1				
Subbase 2				
Subbase 3				
Subbase 4				
Total			4.73	282

Embankment and Shoulder Volume [yd ³]:	
--	--

Period of Analysis [yrs] (40 yrs or less)	20
---	----

Figura 101 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura USC).

Specificazione degli Strati				
Strato	Larghezza [m]	Lunghezza [m]	Spessore [m]	Volume [m ³]
Strato di Usura	4.65	382	0.05	89
Strato di Collegamento	4.65	382	0.07	124
Strato di Base				
Sottofondo 1				
Sottofondo 2				
Sottofondo 3				
Sottofondo 4				
Totale			0.12	213

Volume della spalla e della banchina [m³]:

Periodo di Analisi [Anni]
(40 anni o meno) 20

Figura 102 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura SI).

La sezione del viadotto, presa in esame, risulta, quindi essere la seguente:



Figura 103 Sezione Viadotto "Torre del Colle".

5.1.2 FASE 2: Costruzione Iniziale

Nel foglio “Costruzione Iniziale”, vanno inseriti, per ciascun materiale della pavimentazione:

- le quantità, in termini di volumi;
- la distanza di trasporto unidirezionale e la modalità di trasporto.

Per ottenere, però, queste informazioni, vanno eseguiti alcuni calcoli preliminari, partendo da quelli forniti, direttamente, da Sitalfa S.p.A.

STRATO DI USURA (wearing course)

SETACCI [mm]	0,075	0,18	0,4	2	-	-	-	-	-	-	-	%
CRIVELLI [mm]					5	10	15	20	25	30	40	CURVA
Aggregati	<i>passante in %</i>											
Sabbione	2,6	7,5	16,5	55,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	42
3/8	0,0	0,0	1,0	8,2	49,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	18
8/18	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	27,0	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	33
18/30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	31,0	99,0	100,0	100,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
filler	90,2	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7

Figura 104 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di usura.

- Percentuale di bitume³⁵ nel conglomerato (senza polimero): 5.21 %;
- Densità del bitume: 1.025 g/cm³;
- Densità del polimero: 0.50 g/cm³;
- Percentuale di polimero utilizzata: 0.30 %;
- Massa volumica del campione (MV): 2.360 ton/m³;
- Percentuale dei vuoti (v): 5.39 %;
- P_b: percentuale di bitume nel conglomerato (con polimero)³⁶: 5.51 %.

³⁵ Per bitume modificato si considera “polimero + bitume”. Sitalfa S.p.A. non utilizza un bitume modificato tradizionale, ma il polimero viene inserito nell'impasto contemporaneamente agli aggregati ed il bitume utilizzato è 50/70.

³⁶ Il valore di 5.21 % rappresenta il 94.56 %, rispetto al 5.51 %.

Per prima cosa si calcola un valore medio di densità, considerando sia il bitume che il polimero, come:

$$\gamma_b = \frac{94.56 \%}{100} \cdot 1.025 + \frac{5.44 \%}{100} \cdot 0.50 = 0.996 \frac{g}{cm^3} = 0.84 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

A questo punto si valuta la densità del bio-legante, contenente lignina come:

$$\gamma_{bio-binde} = \% B \cdot \gamma_B + \% lignina \cdot \gamma_{lignina}$$

$$\gamma_{bio-binde} = 0.50 \cdot 0.996 \frac{g}{cm^3} + 0.50 \cdot 1.35 \frac{g}{cm^3} = 1.173 \frac{g}{cm^3} = 0.99 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

Si procede, adesso, al calcolo dei volumi, partendo da quello del bitume $V_b(\%)$:

$$V_b(\%) = \frac{P_b \cdot MV}{\gamma_{bio-binder}} = \frac{5.51 \cdot 2360 \text{ kg/m}^3}{1173 \text{ kg/m}^3} = 11.08 \%$$

Una volta nota la percentuale di bitume si ricava, per differenza, quella degli aggregati $V_G(\%)$, come:

$$V_G(\%) = 100 \% - V_b(\%) - v(\%) = 100 \% - 11.08 \% - 5.39 \% = 83.53 \%$$

Si procede, poi, alla valutazione della densità degli aggregati γ_g :

$$V_G(\%) = \frac{100 - P_b}{\gamma_G} \cdot MV \rightarrow \gamma_G = \frac{100 - P_b}{V_G(\%)} \cdot MV$$

ottenendo:

$$\gamma_G = \frac{100 - 5.51}{83.53} \cdot 2360 \frac{kg}{m^3} = 2669.78 \frac{kg}{m^3} = 2.25 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

Infine, per valutare i volumi, si calcolano le masse, degli aggregati M_G e del bitume M_b , considerando però anche la massa M , in condizioni compattate:

$$V_{usura} = 4.65 \text{ m} \cdot 382 \text{ m} \cdot 0.05 \text{ m} = 89 \text{ m}^3 = 117 \text{ yd}^3$$

$$M = V_{usura} \cdot MV = 89 \text{ m}^3 \cdot 2360 \frac{kg}{m^3} = 210040 \text{ kg}$$

$$M_G = \frac{100 - P_b}{100} \cdot M = \frac{100 - 5.51}{100} \cdot 210040 = 198467 \text{ kg} = 219 \text{ short ton}$$

$$M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M = \frac{5.51}{100} \cdot 210040 = 11573 \text{ kg} = 13 \text{ short ton}$$

Si valutano, infine, i volumi di aggregati e di bitume che vanno inseriti all'interno di PaLATE:

$$V_{\text{aggregati}} = \frac{M_G}{\gamma_G} = \frac{198467}{2669.78} = 74.34 \text{ m}^3 = 97.23 \text{ yd}^3$$

$$V_{\text{bitume}} = \frac{M_b}{\gamma_{\text{bio-binder}}} = \frac{11573}{1173} = 11.61 \text{ m}^3 = 15.19 \text{ yd}^3$$

Si può osservare come la somma di questi due volumi non sia pari al volume dello strato di usura (89 m^3) ma risulta essere inferiore (85.95 m^3), in quanto va tenuto in conto, anche, la presenza dei vuoti, all'interno del conglomerato. In PaLATE si sono modificati i valori di densità sia degli aggregati che del bitume, nel foglio "Densities".

STRATO DI COLLEGAMENTO (binder course)

SETACCI [mm]	0,075	0,18	0,4	2	-	-	-	-	-	-	-	%
CRIVELLI [mm]					5	10	15	25	30	40	50	CURVA
Aggregati	passante in %											
Sabbione	2,6	7,5	16,5	55,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	37
3/8	0,0	0,0	1,0	8,2	49,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	20
8/18	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	27,0	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	38
18/30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	83,0	99,0	100,0	100,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
filler	90,2	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5

Figura 105 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di collegamento.

- Percentuale di bitume³⁷ nel conglomerato (senza polimero): 4.76 %;
- Densità del bitume: 1.025 g/cm³;
- Densità del polimero: 0.50 g/cm³;
- Percentuale di polimero utilizzata: 0.30 %;

³⁷ Per bitume modificato si considera "polimero + bitume". Sitalfa S.p.A. non utilizza un bitume modificato tradizionale, ma il polimero viene inserito nell'impasto contemporaneamente agli aggregati ed il bitume utilizzato è 50/70.

- Massa volumica del campione (MV): 2.373 ton/m³;
- Percentuale dei vuoti (v): 6.10 %;
- P_b: percentuale di bitume nel conglomerato (con polimero)³⁸: 5.06 %.

Per prima cosa si calcola un valore medio di densità, considerando sia il bitume che il polimero, come:

$$\gamma_b = \frac{94.07\%}{100} \cdot 1.025 + \frac{5.93\%}{100} \cdot 0.50 = 0.994 \frac{g}{cm^3} = 0.84 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

A questo punto si valuta la densità del bio-legante, contenente lignina come:

$$\gamma_{bio-binder} = \% B \cdot \gamma_B + \% lignina \cdot \gamma_{lignina}$$

$$\gamma_{bio-binder} = 0.50 \cdot 0.994 \frac{g}{cm^3} + 0.50 \cdot 1.35 \frac{g}{cm^3} = 1.172 \frac{g}{cm^3} = 0.99 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

Si procede, adesso, al calcolo dei volumi, partendo da quello del bitume V_b(%):

$$V_b(\%) = \frac{P_b \cdot MV}{\gamma_{bio-binder}} = \frac{5.06 \cdot 2373 \text{ kg/m}^3}{1172 \text{ kg/m}^3} = 10.25\%$$

Una volta nota la percentuale di bitume, si ricava per differenza quella degli aggregati V_G(%), come:

$$V_G(\%) = 100\% - V_b(\%) - v(\%) = 100\% - 10.25\% - 6.10\% = 83.65\%$$

Si procede, poi, alla valutazione della densità degli aggregati γ_G:

$$V_G(\%) = \frac{100 - P_b}{\gamma_G} \cdot MV \quad \rightarrow \quad \gamma_G = \frac{100 - P_b}{V_G(\%)} \cdot MV$$

ottenendo:

$$\gamma_G = \frac{100 - 5.06}{83.65} \cdot 2373 \frac{kg}{m^3} = 2963.14 \frac{kg}{m^3} = 2.25 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

³⁸ Il valore di 4.76 % rappresenta il 94.07 %, rispetto al 5.06 %.

Infine, per valutare i volumi, si calcolano le masse, degli aggregati M_G e del bitume M_b , valutando però anche la massa M , in condizioni compattate:

$$V_{collegamento} = 4.65 \text{ m} \cdot 382 \text{ m} \cdot 0.07 \text{ m} = 124 \text{ m}^3 = 165 \text{ yd}^3$$

$$M = V_{collegamento} \cdot MV = 124 \text{ m}^3 \cdot 2373 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 294252 \text{ kg}$$

$$M_G = \frac{100 - P_b}{100} \cdot M = \frac{100 - 5.06}{100} \cdot 294252 = 279363 \text{ kg} = 308 \text{ short ton}$$

$$M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M = \frac{5.06}{100} \cdot 294252 = 14889 \text{ kg} = 16 \text{ short ton}$$

Si valutano di seguito, i volumi di aggregati e di bitume che vanno inseriti all'interno di PaLATE:

$$V_{aggregati} = \frac{M_G}{\gamma_G} = \frac{279363}{2963.14} = 103.73 \text{ m}^3 = 135.68 \text{ yd}^3$$

$$V_{bitume} = \frac{M_b}{\gamma_{bio-binde}} = \frac{14889}{1172} = 14.98 \text{ m}^3 = 19.59 \text{ yd}^3$$

Si può osservare come la somma di questi due volumi non sia pari al volume dello strato di collegamento (124 m^3) ma risulta essere inferiore (118.71 m^3), in quanto va tenuto in conto, anche, la presenza dei vuoti, all'interno del conglomerato. In PaLATE si sono modificati i valori di densità sia degli aggregati che del bitume, nel foglio "Densities".

Una volta determinati i volumi del bitume e degli aggregati, vanno identificate e calcolate anche le distanze di trasporto, unidirezionali, da inserire nel tool. Di seguito si valuteranno le distanze sia per gli aggregati che per il bitume, per entrambi gli strati, usura e collegamento. Si deve, però, eseguire una distinzione tra: la distanza fra il sito di produzione delle materie "prime", detta "cava", e l'impianto di preparazione della miscela e quella dall'impianto di preparazione della miscela al luogo di lavoro.

DISTANZA DA CAVA ALL'IMPIANTO DI MISCELAZIONE

- Aggregati

Gli aggregati vengono estratti dal fiume Dora Riparia, distante 3 km dallo stabilimento Sitalfa, dove è situato l'impianto di miscelazione, mentre il filler è fornito da una cava, NICEM S.r.l. di Bergamo, che dista 280 km dallo stabilimento. In questo caso, la distanza di trasporto unidirezionale è stata individuata eseguendo una proporzione, in base alle percentuali di materiali utilizzati, per la preparazione del conglomerato:

STRATO DI USURA

Nello strato di usura, dalla curva granulometrica, si osserva la presenza del filler per il 7 %, quindi:

$$dist = 0.93 \cdot 3 \text{ km} + 0.07 \cdot 28 \text{ km} = 22.39 \text{ km} = 13.92 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello "predominante", che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il dump truck.

STRATO DI COLLEGAMENTO

Nello strato di collegamento, dalla curva granulometrica, si osserva la presenza del filler per il 5 % e quindi:

$$dist = 0.95 \cdot 3 \text{ km} + 0.05 \cdot 28 \text{ km} = 16.85 \text{ km} = 10.47 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello "predominante", che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il dump truck.

- Bitume

Il bitume è fornito dalla raffineria Iplom S.p.A. di Genova, distante 230 km dallo stabilimento Sitalfa, mentre il polimero è fornito dalla Iterchimica S.r.l. di Bergamo, che dista 250 km.

STRATO DI USURA

La miscela bituminosa, come già detto, contiene il 5.21 % di bitume e lo 0.30 % di polimero e riferendosi al 100 % si ottiene circa il 95 % di bitume e il 5 % di polimero.

$$dist = 0.95 \cdot 230 \text{ km} + 0.05 \cdot 250 \text{ km} = 231 \text{ km} = 143.57 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il tanker truck.

STRATO DI COLLEGAMENTO

La miscela bituminosa, come già detto, contiene il 4.76 % di bitume e lo 0.3 % di polimero e riferendosi al 100 % si ottiene circa il 94 % di bitume e il 6 % di polimero.

$$dist = 0.94 \cdot 230 \text{ km} + 0.06 \cdot 250 \text{ km} = 231.2 \text{ km} = 143.69 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il tanker truck.

DISTANZA DA IMPIANTO DI MISCELAZIONE AL LUOGO DI LAVORO

Questa distanza prende in considerazione il trasporto della miscela dall’impianto Sitalfa fino al sito di lavorazione e prendendo a riferimento i dati, forniti dall’azienda, si sono valutate le seguenti distanze:

- Distanza dallo stabilimento Sitalfa al sito di lavorazione:

$$dist = 57 \text{ km} = 35.42 \text{ mi}$$

- Distanza dal sito di lavorazione allo stabilimento Sitalfa:

$$dist = 52 \text{ km} = 32.31 \text{ mi}$$

La differenza di distanza sta nel fatto che quando un mezzo lascia lo stabilimento, questo deve eseguire il cambio di direzione, attraverso un loop, mentre quando il mezzo rientra, questo non è più necessario.

Per l'analisi si è deciso di eseguire, quindi, una media:

$$dist = \frac{57 + 52}{2} = 54.5 \text{ km} = 33.87 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, come già detto, va preso in esame quello "predominante", che in questo caso risulta essere il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	2.25	97.23	0	33.87	13.92	dump truck	
		Bitumen	0.99	15.19	0		143.57	tanker truck	
		Cement	1.27	0	0		0	barge	
		Concrete Additives	0.84	0	0		0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0		0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0		0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0		0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0		0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0		0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0		0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0		0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0		0	dump truck	
		Water	0.84	0	0		0		
		Steel Reinforcing Bars	0.24	0	0		0	0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.19	112.42					33.87
Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0				mixing truck		
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0	0	0	0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88	0	0	0	0	dump truck		

Figura 106 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	135.68	0	33.87	10.47	dump truck	
		Bitumen	0.99	19.59	0		143.69	tanker truck	
		Cement	1.27	0	0		0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84	0	0		0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0		0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0		0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0		0	rail	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0		0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0		0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0		0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0		0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0		0	dump truck	
		Water	0.84	0	0		0		
		Steel Reinforcing Bars	0.24	0	0		0	0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.19	155.27					33.87
Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0				mixing truck		
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0	0	0	0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88	0	0	0	0	dump truck		

Figura 107 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

5.1.3 FASE 3: Manutenzione

Nel foglio “Manutenzione”, avendo considerato un periodo di analisi pari a venti anni, Sitalfa S.p.A. ha deciso di organizzare il Piano di Manutenzione, nel seguente modo:

- Ogni tre anni verrà effettuata la “fresatura totale” dello strato di usura (*Full Depth Reclamation - FDR*³⁹), per un totale di sei interventi, nel corso dei venti anni di analisi;
- Ogni anno verrà eseguita la “rappezzatura” (*patching*⁴⁰) dello strato di usura, ad eccezione in quegli anni in cui verrà già effettuato il processo FDR, per un totale di tredici interventi, nel corso dei venti anni di analisi;
- nell’ultimo anno si eseguirà una demolizione completa del pacchetto legato a bitume (strato di usura e di collegamento).

In PaLATE, si ipotizza, per il primo scenario analizzato (*Scenario 0*), di mantenere il medesimo Piano di Manutenzione analizzato nel lavoro di tesi di Tisberger Ibañez (2020), riportato nell’*Appendice V*. In PaLATE vanno inseriti i volumi totali dei materiali in questione, relativi a ciascun intervento di manutenzione, determinati come di seguito.

STRATO DI USURA: FDR

$$V_{\text{aggregati}} = 6 \cdot 74.34 \text{ m}^3 = 446.03 \text{ m}^3 = 583.39 \text{ yd}^3$$

$$V_{\text{bitume}} = 6 \cdot 11.61 \text{ m}^3 = 69.69 \text{ m}^3 = 91.15 \text{ yd}^3$$

³⁹ La Full Depth Reclamation (FDR) è una tecnica di riabilitazione della pavimentazione in cui l’intera sezione della pavimentazione flessibile, o parte di essa, viene polverizzata e miscelata, per produrre uno strato di base omogeneo e stabilizzato (Biondani, 2014).

⁴⁰ Il patching è una tecnica utilizzata per interventi temporanei o semi-permanenti. Si utilizzano sia conglomerati bituminosi a caldo che a freddo. Ha la funzione di riparare dissesti localizzati, impermeabilizzare la superficie stradale, migliorare la sicurezza, ripristinare la regolarità del piano viabile, ridurre la velocità di degrado. I passi da compiere nel processo di rappezzatura sono i seguenti: delimitazione delle zone da risanare, esecuzione dei tagli al contorno, rimozione del materiale ammalorato, applicazione di una mano di attacco, riempimento con il nuovo materiale e compattazione (Biondani, 2014).

Il volume totale, derivante dal processo FDR è pari a:

$$V_{FDR} = 446.03 + 91.15 = 515.72 \text{ m}^3 = 674.53 \text{ yd}^3$$

PATCHING

Come specificato da Sitalfa S.p.A., ogni anno viene eseguita la “rattoppatura” su l’1.8 % dello strato di usura. Considerando, quindi, il volume dello strato di usura, pari a 89 m^3 , questo si valuta in circa 1.6 m^3 . Eseguendo, poi, una semplice equivalenza si possono ricavare i valori, in termini di volumi, sia degli aggregati che del bitume, necessari per l’esecuzione dei lavori:

Aggregati

$$x : 1.6 \text{ m}^3 = 74.34 \text{ m}^3 : 89 \text{ m}^3$$

ottenendo un volume di aggregati, pari a:

$$V_{aggr_path} = 1.34 \text{ m}^3 = 1.75 \text{ yd}^3$$

Bitume

$$x : 1.6 \text{ m}^3 = 11.61 \text{ m}^3 : 89 \text{ m}^3$$

ottenendo un volume di bitume, pari a:

$$V_{bit_path} = 0.21 \text{ m}^3 = 0.27 \text{ yd}^3$$

Questo è riferito ad un'unica lavorazione, durante l'intero periodo di analisi, però, di queste ne verranno eseguite tredici, ottenendo:

$$V_{tot_aggr_path} = 13 \cdot 1.34 \text{ m}^3 = 17.40 \text{ m}^3 = 22.75 \text{ yd}^3$$

$$V_{tot_bit_path} = 13 \cdot 0.21 \text{ m}^3 = 2.72 \text{ m}^3 = 3.55 \text{ yd}^3$$

$$V_{tot_path} = 22.75 \text{ yd}^3 + 3.55 \text{ yd}^3 = 26.31 \text{ yd}^3$$

Considerando entrambe le lavorazioni, si ottengono i seguenti valori di volume riferiti agli aggregati e al bitume utilizzati:

$$V_{aggr} = 583.39 \text{ yd}^3 + 22.75 \text{ yd}^3 = 606.14 \text{ yd}^3$$

$$V_{bit} = 91.15 \text{ yd}^3 + 3.55 \text{ yd}^3 = 94.70 \text{ yd}^3$$

Nell'ultimo anno, il ventesimo, andranno valutati i volumi di materiale che dovranno essere trasportati in discarica, ottenendo:

STRATO DI USURA

$$V_{land_fill} = V_{FDR} + V_{tot_path} + V_{demol} = 674.53 + 26.31 + 117 = 817.84 \text{ yd}^3$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$V_{landfill} = V_{demol} = 165 \text{ yd}^3$$

Per quanto riguarda le distanze e le modalità di trasporto, si eseguono le medesime considerazioni effettuate, in precedenza, per i materiali.

Il calcolo delle distanze di trasporto viene ripetuto ogni volta che si esegue un intervento, quindi tredici volte per il patching e sei volte per l'FDR, oppure, nel caso di trasporto in discarica, venti volte, considerando il patching e l'FDR. Inoltre, la distanza dal cantiere allo stabilimento nel quale avverrà lo smaltimento finale, sito speciale che l'azienda Sitalfa possiede a Bruzolo, è pari a 16 km.

STRATO DI USURA

$$dist_{aggr} = (6 + 13) \cdot 22.39 \text{ km} = 425.41 \text{ km} = 264.48 \text{ mi}$$

$$dist_{bit} = (6 + 13) \cdot 231 \text{ km} = 4389 \text{ km} = 2727.83 \text{ mi}$$

$$dist_{asphalt \text{ mix to site}} = (6 + 13) \cdot 54.5 \text{ km} = 1035.5 \text{ km} = 643.53 \text{ mi}$$

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 20 \cdot 16 \text{ km} = 320 \text{ km} = 198.88 \text{ mi}$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$dist_{site\ to\ landfill} = 1 \cdot 16\ km = 16\ km = 9.94\ mi$$

Il mezzo di trasporto considerato è stato sempre il medesimo, il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Reparing	Reparing	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Reconstruction	Reconstruction				
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	2.25	606.14	0			264.48	dump truck	
		Bitumen	0.99	94.70				2727.83	tanker truck	
		Cement	1.27		0			0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck	
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	tanker truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck	
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.19	700.84					643.53	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Patching	2.19		26.31	0						
Microsurfacing	1.23		0	0						
Crack Sealing	0.84		0	0						
Whitetopping	2.03			0						
Rubblization	1.95			0						
Waste material to landfill	Full-depth Reclamation	1.83	674.53	0						
	RAP from site to landfill	1.85	817.84				198.88	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck		

Figura 108 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Reparing	Reparing	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Reconstruction	Reconstruction				
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	0	0			0	dump truck	
		Bitumen	0.99	0				0	tanker truck	
		Cement	1.27		0			0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck	
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	fall	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck	
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.187	0					0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Rubblization	1.95			0						
Full-depth Reclamation	1.83			0						
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	165				9.94	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck		

Figura 109 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

5.1.4 Emissioni di Trasporto

Nel foglio “EMF Transport”, vengono riportati, tra l’altro, tutti i *Life Cycle Inventory* (LCI), dei materiali da considerare nell’analisi. Per questo studio ci si concentrerà solamente sul “bitume”, mentre per tutti gli altri materiali, verranno mantenuti i valori proposti di default, da PaLATE. Per quanto riguarda il bio-legante, nonostante nei precedenti paragrafi, si sia già discusso del suo LCI, valutato prendendo in considerazione l’Eurobitume, per quanto concerne il bitume, e studi presenti in letteratura, per quanto riguarda il sostituto, si riporta, comunque di seguito, una tabella riassuntiva dei valori da inserire, in PaLATE. Per quanto riguarda l’anidride carbonica equivalente ($CO_{2,eq}$):

$$CO_{2,eq,bio-binder} = \% B \cdot CO_{2,eq,B} + \% bio \cdot CO_{2,eq,bio}$$

$$CO_{2,eq} = 0.50 \cdot 341,230 \frac{g}{short\ ton} + 0.50 \cdot 54,068 \frac{g}{short\ ton} = 197,649 \frac{g}{short\ ton}$$

mentre, per quanto riguarda l’energia:

$$E_{bio-binder} = \% B \cdot E_B + \% bio \cdot E_{bio}$$

$$E_{bio-binder} = 0.50 \cdot 5,746 \frac{MJ}{short\ ton} + 0.50 \cdot 14,738 \frac{MJ}{short\ ton} = 10,242 \frac{MJ}{short\ ton}$$

Tabella 14 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	Energia [MJ/ton]	H ₂ O [l/ton]
197,649	983	1582	1573	363	10,242	6,694,976

Per quanto riguarda, i valori relativi alle emissioni di mercurio (Hg) e di piombo (Pb), rispettivamente pari a 0.04 g/ton e 2 g/ton (0.036 g/short ton e 1.81 g/short ton), si sono lasciati quelli di default, presenti in PaLATE, non avendone rilevati altri né in Eurobitume né in letteratura, pur essendo consaperli che le loro assunzioni possano risultare “grezze” ma comunque significative per l’analisi.

Per quanto riguarda, invece, il consumo di elettricità, assunto pari a 252 kWh/ton (229 kWh/short ton), si è fatto riferimento ad uno studio svedese (Stripple, 2001) mentre per i rifiuti pericolosi, considerato pari a 1,900 g/ton (1,724 g/short ton), si è fatto riferimento ad uno finlandese (Häkkinen & Mäkelä, 1996), essendo gli unici documenti, tra quelli consultati, a prendere in considerazione queste tipologie di output.

5.2 Secondo caso studio: Strada extra-urbana italiana (Farina et al., 2014)

Il secondo caso studio, preso a riferimento in questo lavoro di tesi, è stato sviluppato da un gruppo di ricercatori del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino (Farina et al., 2014).

Di seguito, si evidenziano tutte le fasi eseguite in PaLATE, per la computazione degli impatti ambientali, riportando e commentando gli eventuali calcoli, eseguiti, riportando, come esempio, solamente quelli effettuati per il caso di sostituzione parziale al 50 % con lignina. Successivamente, si evidenzieranno i risultati ottenuti, anche, in seguito alla sostituzione con diverse tipologie di bio-leganti e relative differenti percentuali, cercando di trarre conclusioni, se presenti, osservando, anche, eventuali differenze, dal punto di vista degli impatti ambientali. Il *Caso Base*, conglomerato costituito solamente da bitume modificato, senza alcuna aggiunta di bio-leganti, come già analizzato nel lavoro di tesi di Tisberger Ibañez (2020, viene riportato nell'*Appendice VI*. Nella stessa, si elencano tutti i dati da inserire nel tool, divisi per fasi (design, costruzione iniziale, manutenzione, attrezzature ed amissioni di trasporto), mentre di seguito si commenteranno solamente le prime tre fasi, essendo le altre invariate, in termini di dati di input.

5.2.1 FASE 1: Design

In questo studio (Farina et al., 2014), viene presa a riferimento una strada extra-urbana italiana, costituita da due corsie per direzione, con una dimensione totale della carreggiata, pari a 21.9 m. In base ai carichi veicolari previsti (4 milioni di veicoli) e in base al valore minimo di capacità portante del sottofondo ($M_r = 90$ MPa), è stata selezionata, dal catalogo del CNR, relativo alla progettazione delle pavimentazioni, la seguente sezione: 5 cm di strato di usura, 6 cm di strato di collegamento, 10 cm di strato di base, ed infine, 20 cm per lo strato di fondazione, non legato, costituito da materiale granulare frantumato.

Per quanto concerne, invece, la lunghezza di riferimento, si è fissata pari ad 1.0 m (unità funzionale dell'analisi) mentre il periodo di analisi è stato imposto pari a 18 anni.

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
Wearing Course	71.85	0.0006	1.97	1.38
Binder Course	71.85	0.0006	2.36	1.66
Base Course	71.85	0.0006	3.92	2.75
Foundation	71.85	0.0006	7.87	5.53
Total			16.12	11.32

Embankment and Shoulder Volume [yd ³]:	
--	--

Period of Analysis [yrs] (40 yrs or less)	18
--	----

Figura 110 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura USC).

Specificazione degli Strati				
Strato	Larghezza [m]	Lunghezza [m]	Spessore [m]	Volume [m ³]
Strato di Usura	21.9	1.0	0.05	1.10
Strato di Collegamento	21.9	1.0	0.06	1.31
Strato di Base	21.9	1.0	0.10	2.19
Fondazione	21.9	1.0	0.20	4.38
Sottofondo 2				
Sottofondo 3				
Sottofondo 4				
Totale			0.41	9.0

Volume della spalla e della banchina [m ³]:	
---	--

Periodo di Analisi [Anni] (40 anni o meno)	18
---	----

Figura 111 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura S.I.).

La sezione della strada extra-urbana, presa in esame, risulta, quindi essere la seguente:



Figura 112 Sezione strada extra-urbana italiana – CS-2.

5.2.2 FASE 2: Costruzione Iniziale

Per quanto riguarda i valori da inserire nel foglio “Costruzione Iniziale”, si possono ricavare i dati dal lavoro svolto da Farina et al. (2014), eseguendo alcuni calcoli, come di seguito riportato:

Tabella 15 Mix Design di ciascuno strato costituente la pavimentazione.

Strato	[%]		Quantità [kg/m ³]	
	%B	%v	Q _B	Q _A
usura	5.3	4.5	119.9	2262
collegamento	5.0	5	113.2	2266
base	4.5	5.5	102.7	2282
fondazione	-	5.2	-	2201

Nella tabella soprariportata, sono state indicate le percentuali di bitume in massa ($\%B = Q_B/Q_A = P_b$), indice dei vuoti ($\%v$) e le quantità, al metro cubo, di bitume (Q_B) e di aggregati (Q_A), per ciascun strato analizzato nello studio. Come già eseguito per il 1° caso studio, si calcolano i valori di volume di bitume e di aggregati, riferite alla pavimentazione in esame, da inserire in PaLATE. Di seguito si riportano le quantità, espresse in kg, dei materiali (bitume e aggregati), necessari per la costruzione di ciascuno strato.

Tabella 16 Quantità di materiale necessario per ciascuno strato.

Strato	Materiale	Q [kg]
usura	Bitume	131
	Aggregati	2477
collegamento	Bitume	149
	Aggregati	2977
base	Bitume	225
	Aggregati	4998
fondazione	Aggregati	9641

STRATO DI USURA

Ai fini della valutazione dei volumi, sia di bitume che di aggregato, si sono considerate, in primo luogo, le quantità espresse al metro cubo e, in seguito, riportate alle dimensioni di riferimento. In questo caso studio si sono assunti i valori delle densità dei materiali, in particolare, per il bitume si è assunta pari a 1025 kg/m^3 ($0.86 \text{ short ton/yd}^3$) mentre per gli aggregati pari a 2700 kg/m^3 ($2.27 \text{ short ton/yd}^3$). Se si considera 1 m^3 di pavimentazione, i volumi di aggregati e di bitume, si valutano come:

$$V_{G,1m^3} = \frac{2262}{2700} = 0.84 \text{ m}^3$$

Per quanto riguarda il bitume, bisogna considerare, all'interno della densità da utilizzare nei calcoli, anche la presenza della lignina:

$$\gamma_{bio-binder} = \% B \cdot \gamma_B + \% \text{ lignina} \cdot \gamma_{lignina}$$

$$\gamma_{bio-binder} = 0.50 \cdot 1024 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.50 \cdot 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.00 \frac{\text{short ton}}{\text{yd}^3}$$

A questo punto si valuta il volume di bitume, in 1 m^3 , come:

$$V_{b,1m^3} = \frac{119.9}{1188} = 0.10 \text{ m}^3$$

Si può osservare come, in 1 m^3 , sia abbia che l'84 % sia composto da aggregati, il 10 % da bitume. La nostra geometria, però, non è riferita ad 1 m^3 di pavimentazione, ma bensì a:

$$V = 21.9 \cdot 1 \cdot 0.05 = 1.095 \text{ m}^3$$

A questo punto, i volumi di materiali, riferiti alla pavimentazione, risultano essere pari a:

$$V_G = 0.84 \cdot 1.095 = 0.92 \text{ m}^3 = 1.20 \text{ yd}^3$$

$$V_b = 0.10 \cdot 1.095 = 0.11 \text{ m}^3 = 0.14 \text{ yd}^3$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

Se si considera 1 m³ di pavimentazione, i volumi di aggregati e di bitume, si valutano come:

$$V_{G,1m^3} = \frac{2266}{2700} = 0.84 \text{ m}^3$$

Per quanto riguarda il bitume, bisogna considerare, all'interno della densità da utilizzare nei calcoli, anche la presenza della lignina:

$$\gamma_{bio-binder} = \% B \cdot \gamma_B + \% \text{ lignina} \cdot \gamma_{lignina}$$

$$\gamma_{bio-binder} = 0.50 \cdot 1024 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.50 \cdot 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.00 \frac{\text{short ton}}{\text{yd}^3}$$

A questo punto si valuta il volume di bitume, in 1 m³, come:

$$V_{b,1m^3} = \frac{113.2}{1188} = 0.10 \text{ m}^3$$

Si può osservare come, in 1 m³, sia abbia che l'84 % sia composto da aggregati, il 10 % da bitume. La nostra geometria, però, non è riferita ad 1 m³ di pavimentazione, ma bensì a:

$$V = 21.9 \cdot 1 \cdot 0.06 = 1.31 \text{ m}^3$$

A questo punto, i volumi di materiali, riferiti alla pavimentazione, risultano essere pari a:

$$V_G = 0.84 \cdot 1.31 = 1.10 \text{ m}^3 = 1.44 \text{ yd}^3$$

$$V_b = 0.10 \cdot 1.31 = 0.13 \text{ m}^3 = 0.16 \text{ yd}^3$$

STRATO DI BASE

Se si considera 1 m³ di pavimentazione, i volumi di aggregati e di bitume, si valutano come:

$$V_{G,1m^3} = \frac{2282}{2700} = 0.85 \text{ m}^3$$

Per quanto riguarda il bitume, bisogna considerare, all'interno della densità da utilizzare nei calcoli, anche la presenza della lignina:

$$\gamma_{bio-binder} = \% B \cdot \gamma_B + \% \text{ lignina} \cdot \gamma_{lignina}$$

$$\gamma_{bio-binder} = 0.50 \cdot 1024 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0.50 \cdot 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.00 \frac{\text{short ton}}{\text{yd}^3}$$

A questo punto si valuta il volume di bitume, in 1 m³, come:

$$V_{b,1m^3} = \frac{102.7}{1188} = 0.09 \text{ m}^3$$

Si può osservare come, in 1 m³, sia abbia che l'85 % sia composto da aggregati, il 9 % da bitume. La nostra geometria, però, non è riferita ad 1 m³ di pavimentazione, ma bensì a:

$$V = 21.9 \cdot 1 \cdot 0.10 = 2.19 \text{ m}^3$$

A questo punto, i volumi di materiali, riferiti alla pavimentazione, risultano essere pari a:

$$V_G = 0.85 \cdot 2.19 = 1.85 \text{ m}^3 = 2.42 \text{ yd}^3$$

$$V_b = 0.09 \cdot 2.19 = 0.19 \text{ m}^3 = 0.25 \text{ yd}^3$$

STRATO DI FONDAZIONE

Se si considera 1 m³ di pavimentazione, il volume di aggregati, si valutano come:

$$V_{G,1m^3} = \frac{2201}{2700} = 0.82 \text{ m}^3$$

Si può osservare come, in 1 m³, sia abbia che l'82 % sia composto da aggregati ma, la nostra geometria, però, non è riferita ad 1 m³ di pavimentazione, ma bensì a:

$$V = 21.9 \cdot 1 \cdot 0.20 = 4.38 \text{ m}^3$$

A questo punto, i volumi di materiali, riferiti alla pavimentazione, risultano essere pari a:

$$V_G = 0.85 \cdot 4.38 = 3.57 \text{ m}^3 = 4.67 \text{ yd}^3$$

Per quanto riguarda le distanze unidirezionali, da inserire in PaLATE, si riportano quelle utilizzate nello studio, preso in esame (Farina et al., 2014):

DISTANZA DA CAVA ALL'IMPIANTO DI MISCELAZIONE

Strato	Materiale	D [km]	D [mi]
usura	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
collegamento	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
base	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
fondazione	Aggregati	30	18.64

Per quanto riguarda il mezzo di trasporto "dominante", si considera il dump truck per gli aggregati ed il tanker truck per il bitume.

DISTANZA DA IMPIANTO DI MISCELAZIONE AL LUOGO DI LAVORO

Questa distanza, nello studio (Farina et al., 2014) è stata assunta pari a:

$$dist = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo di trasporto “dominante”, si considera il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	1.20	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	1.00	0.14		62.14	tanker truck	
		Cement	1.27		0	0	barge	
		Concrete Additives	0.84		0	0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0	0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0	0	dump truck	
		Water	0.84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.21	1.34			31.07	dump truck
Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck		
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0	0	dump truck		

Figura 113 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	1.44	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	1.00	0.16		62.14	tanker truck	
		Cement	1.27		0	0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0	0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0	0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	rail	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0	0	dump truck	
		Water	0.84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.21	1.6			31.07	dump truck
Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck		
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0	0	dump truck		

Figura 114 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Base Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	2.42	0	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	1.00	0.25			62.14	tanker truck	
		Cement			0		0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0		0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0		0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0		0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0		0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0		0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0		0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0		0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0		0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0		0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0		0	dump truck	
		Water	0.84		0			dump truck	
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0			0	
		Total: Asphalt mix to site	2.2065	2.67				31.07	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck		
	Waste mat'l sent to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	0	dump truck	
		RAS from site to landfill	1.12	0		0	0	dump truck	
RCM from site to landfill		1.88		0		0	dump truck		

Figura 115 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di base, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Foundation	Materials	RAP to recycling plant	1.85		0	0	0	dump truck	
		RAP from recycling plant to site	1.85		0	0	0	dump truck	
		RAS to recycling plant	1.12		0	0	0	dump truck	
		RAS from recycling plant to site	1.12		0	0	0	dump truck	
		RCM to recycling plant	1.88		0	0	0	dump truck	
		RCM from recycling plant to site	1.88		0	0	0	dump truck	
		Cement	1.27		0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20		0	0	0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00		0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72		0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50		0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92		0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93		0	0	0	dump truck	
		Rock	2.27		4.67	18.64	0	0	dump truck
		Gravel	1.35		0	0	0	0	dump truck
		Sand	1.25		0	0	0	0	dump truck
	Soil	1.63		0	0	0	0	dump truck	
	Total: Subbase 1 materials to site	2.27		4.67					
	Waste mat'l sent to landfill	RAP from site to landfill	1.85		0	0	0	0	dump truck
RAS from site to landfill		1.12		0	0	0	0	dump truck	
RCM from site to landfill		1.88		0	0	0	0	dump truck	

Figura 116 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di fondazione, tool PaLATE.

5.2.3 FASE 3: Manutenzione

Il Piano di Manutenzione, proposto da Farina et al. (2014), è stato redatto, prendendo in esame una vita utile della pavimentazione pari a diciotto anni, durante i quali, ogni cinque (anno 5, 10 e 15), si eseguirà una fresatura totale dello strato di usura (Full Depth Reclamation⁴¹), mentre nell'ultimo verrà eseguita, invece, una demolizione completa del pacchetto legato a bitume (strato di usura, di collegamento e di base). In PaLATE, si ipotizza, per il primo scenario analizzato (*Scenario 0*), di mantenere il medesimo Piano di Manutenzione analizzato nel lavoro di tesi di Tisberger Ibañez (2020), riportato nell'*Appendice VI*. In PaLATE vanno inseriti i volumi totali dei materiali in questione, relativi a ciascun intervento di manutenzione, determinati come di seguito.

La lavorazione FDR verrà applicata, per tre volte, in diciotto anni, solamente allo strato di usura.

FDR – Strato di usura

$$V_{aggregati} = 3 \cdot 0.92 = 2.75 \text{ m}^3 = 3.60 \text{ yd}^3$$

$$V_{bitume} = 3 \cdot 0.11 = 0.33 \text{ m}^3 = 0.43 \text{ yd}^3$$

Il volume totale, derivante dal processo FDR è pari a:

$$V_{FDR} = 2.75 + 0.33 = 3.08 \text{ m}^3 = 4.03 \text{ yd}^3$$

DEMOLIZIONE PACCHETTO LEGATO A BITUME

Al diciottesimo anno, si procede alla demolizione completa dei tre strati legati a bitume (usura, collegamento e base), ottenendo i volumi destinati alla discarica:

⁴¹ La Full Depth Reclamation (FDR) è una tecnica di riabilitazione della pavimentazione in cui l'intera sezione della pavimentazione flessibile, o parte di essa, viene polverizzata e miscelata, per produrre uno strato di base omogeneo e stabilizzato (Biondani, 2014).

STRATO DI USURA

$$V_{discarica} = 1.20 + 0.14 + 4.03 = 5.38 \text{ yd}^3 = 4.11 \text{ m}^3$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$V_{discarica} = V_{aggregati} + V_{bitume} = 1.23 \text{ m}^3 = 1.61 \text{ yd}^3$$

STRATO DI BASE

$$V_{discarica} = V_{aggregati} + V_{bitume} = 2.04 \text{ m}^3 = 2.67 \text{ yd}^3$$

Per quanto riguarda le distanze e le modalità di trasporto, le considerazioni sono le medesime eseguite per la fase di “Costruzione Iniziale”. Le distanze di trasporto sono ripetute ogni volta che si esegue il processo di manutenzione (tre volte per FDR) o in discarica (quattro volte in totale). Inoltre, la distanza, dal cantiere di lavoro al sito di smaltimento, è di 50 km, come indicato nello studio di Farina et al. (2014).

STRATO DI USURA

$$dist_{aggregati} = 3 \cdot 30 = 90 \text{ km} = 55.92 \text{ mi}$$

$$dist_{bitume} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ km} = 186.41 \text{ mi}$$

$$dist_{HMA \text{ to site}} = 3 \cdot 50 = 150 \text{ km} = 93.21 \text{ mi}$$

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 4 \cdot 50 = 200 \text{ km} = 124.27 \text{ mi}$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 1 \cdot 50 = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

STRATO DI BASE

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 1 \cdot 50 = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

	Material	Density [tons/(gd*3)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Reparing	Reparing	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [gd*3]	Volume [gd*3]	Reconstruction	Reconstruction				
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	3.60	0			55.92	dump truck	
		Bitumen	1.00	0.43				106.41	tanker truck	
		Cement	1.27		0				0	cement truck
		Concrete Additives	0.84		0				0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0.84	0					0	tanker truck
		RAP	1.85	0	0				0	dump truck
		FRAP	1.85	0	0				0	dump truck
		RAS	1.12	0	0				0	dump truck
		RCA	1.88	0	0				0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20	0	0				0	tanker truck
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0				0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0				0	dump truck
		Foundry Sand	1.50	0	0				0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0				0	dump truck
		Glass Cullet	1.93	0	0				0	dump truck
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.21	4.03					93.21	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Patching	2.21		0	0						
Microsurfacing	1.23		0	0						
Crack Sealing	0.84		0	0						
Whitotopping	2.03			0						
Pubbilization	1.95			0						
Full-depth Reclamation	1.83	4.03	0							
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	5.38					93.21	dump truck	
	RAS from site to landfill	1.12	0					0	dump truck	
	RCM from site to landfill	1.88		0				0	dump truck	

Figura 117 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(gd*3)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Reparing	Reparing	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [gd*3]	Volume [gd*3]	Reconstruction	Reconstruction				
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	0	0			0	dump truck	
		Bitumen	1.00	0				0	tanker truck	
		Cement	1.27		0				0	cement truck
		Concrete Additives	0.84		0				0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0.84	0					0	tanker truck
		RAP	1.85	0	0				0	dump truck
		FRAP	1.85	0	0				0	dump truck
		RAS	1.12	0	0				0	dump truck
		RCA	1.88	0	0				0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20	0	0				0	rail
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0				0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0				0	dump truck
		Foundry Sand	1.50	0	0				0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0				0	dump truck
		Glass Cullet	1.93	0	0				0	dump truck
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.2065	0					0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Pubbilization	1.95			0						
Full-depth Reclamation	1.83			0						
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	1.61					31.07	dump truck	
	RAS from site to landfill	1.12	0					0	dump truck	
	RCM from site to landfill	1.88		0				0	dump truck	

Figura 118 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(gd ³)]	Lifetime Asphalt Re paving	Lifetime Concrete Re paving	Lifetime Subbase Re construction	Lifetime Embankment Re construction	Transportation			
			Volume [gd ³]	Volume [gd ³]	Volume [gd ³]	Volume [gd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Base Course	Materials	Virgin Aggregate	2.27	0	0			0	dump truck	
		Bitumen	1.00	0				0	tanker truck	
		Cement	1.27		0				0	cement truck
		Concrete Additives	0.84		0				0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0.84	0					0	dump truck
		RAP	1.85	0	0				0	dump truck
		FRAP	1.85	0	0				0	dump truck
		RAS	1.12	0	0				0	dump truck
		RCA	1.88	0	0				0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20	0	0				0	cement truck
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0				0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0				0	dump truck
		Foundry Sand	1.50	0	0				0	rail
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0				0	dump truck
		Glass Cullet	1.93	0	0				0	dump truck
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	22065	0					0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes		HIPR	1.83	0				
CIR	1.83			0						
Pubblization	1.95				0					
Full-depth Reclamation	1.83			0	0					
Waste material to landfill		RAP from site to landfill	1.85	2.67				31.07	dump truck	
		RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck	
		RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck	

Figura 119 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di base, tool PaLATE.

5.2.4 Emissioni di Trasporto

Nel foglio “EMF Transport”, vengono riportati, tra l’altro, tutti i *Life Cycle Inventory* (LCI), dei materiali da considerare nell’analisi. Per questo studio ci si concentrerà solamente sul “bitume”, mentre per tutti gli altri materiali, verranno mantenuti i valori proposti di default, da PaLATE. Per quanto riguarda il bio-legante, nonostante nei precedenti paragrafi, si sia già discusso del suo LCI, valutato prendendo in considerazione l’Eurobitume, per quanto concerne il bitume, e studi presenti in letteratura, per quanto riguarda il sostituto, si riporta, comunque di seguito, una tabella riassuntiva dei valori da inserire, in PaLATE. Per quanto riguarda l’anidride carbonica equivalente ($CO_{2,eq}$):

$$CO_{2,eq,bio-binder} = \% B \cdot CO_{2,eq,B} + \% bio \cdot CO_{2,eq,bio}$$

$$CO_{2,eq} = 0.50 \cdot 341,230 \frac{g}{short\ ton} + 0.50 \cdot 54,068 \frac{g}{short\ ton} = 197,649 \frac{g}{short\ ton}$$

mentre, per quanto riguarda l’energia:

$$E_{bio-binder} = \% B \cdot E_B + \% bio \cdot E_{bio}$$

$$E_{bio-binder} = 0.50 \cdot 5,746 \frac{MJ}{short\ ton} + 0.50 \cdot 14,738 \frac{MJ}{short\ ton} = 10,242 \frac{MJ}{short\ ton}$$

Tabella 17 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).

$CO_{2,eq}$ [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	Energia [MJ/ton]	H ₂ O [l/ton]
197,649	983	1582	1573	363	10,242	6,694,976

Per quanto riguarda, i valori relativi alle emissioni di mercurio (Hg) e di piombo (Pb), rispettivamente pari a 0.04 g/ton e 2 g/ton (0.036 g/short ton e 1.81 g/short ton), si sono lasciati quelli di default, presenti in PaLATE, non avendone rilevati altri né in Eurobitume né in letteratura, pur essendo consaperli che le loro assunzioni possano risultare “grezze” ma comunque significative per l’analisi.

Per quanto riguarda, invece, il consumo di elettricità, assunto pari a 252 kWh/ton (229 kWh/short ton), si è fatto riferimento ad uno studio svedese (Stripple, 2001) mentre per i rifiuti pericolosi, considerato pari a 1,900 g/ton (1,724 g/short ton), si è fatto riferimento ad uno finlandese (Häkkinen & Mäkelä, 1996), essendo gli unici documenti, tra quelli consultati, a prendere in considerazione queste tipologie di output.

5.3 Analisi Scenari Alternativi

Nei due paragrafi precedenti (5.1 e 5.2) sono stati descritti, in maniera dettagliata, tutti i calcoli, dei due casi studio presi a riferimento, in modo da ricavare i valori da inserire, poi, nel tool PaLATE, riportando un esempio dei calcoli da effettuare nel caso di sostituzione parziale, al 50 % con lignina.

Uno degli scopi di questo lavoro di tesi è quello, invece, di quantificare e confrontare le emissioni e l'energia, necessaria all'interno dell'intero Ciclo di Vita, utilizzando i bio-leganti. Per far questo, si sono eseguite alcune ipotesi, prendendo in considerazione anche gli studi condotti da diversi gruppi di studiosi e disponibili in letteratura, in modo da considerarne le caratteristiche reologiche e meccaniche degli stessi.

Nello *Scenario Zero*, si è considerato il medesimo Piano di Manutenzione, valutato per il legante di riferimento, anche per quello contenente bio-leganti, ipotizzando che i due fossero dotati di caratteristiche meccaniche e reologiche, comparabili. Questo potrebbe essere uno *scenario futuro*, auspicabile da un punto di vista ambientale ed eco-sostenibile, ma ad oggi, non veritiero. Però, come si è evinto dai vari studi presenti in letteratura, riportati e commentati nel primo paragrafo, la presenza dei bio-leganti porta ad una perdita e, quindi una diminuzione, delle principali caratteristiche meccaniche, apportando comunque, alcuni benefici.

Quindi, per tener conto di questo, si sono analizzati altri *Scenari*, con lo scopo di intervenire, con una maggiore frequenza sulla pavimentazione danneggiata, andando, così, ad apportare alcune modifiche ai Piani di Manutenzione, eseguendo, per esempio, un maggior numero di interventi di patching o FDR.

In particolare, per il bio-leganti a base di bio-olio derivante da letame suino, si sono indagate le seguenti percentuali di sostituzione: 10 %, 25 % e 50 %. Negli studi presenti in letteratura sono state studiate le percentuali pari al 2 %, al 5 % ed al 10 % ma si è deciso di prendere a riferimento nei calcoli, in questo lavoro, solamente quella del 10.

Per comprendere a pieno il fenomeno, si è deciso di valutare un range di sostituzione più ampio, rispetto a quelli presenti in letteratura, considerando anche le percentuali del 25 % e 50 %, consci del fatto che trattasi di casistiche, ad oggi, poco realistiche, in quanto porterebbero ad una perdita di performance eccessiva e inaccettabile, da un punto di vista progettuale, non venendo più rispettati gli standard, imposti dalle normative vigenti. Per quanto riguarda, invece, la lignina, si sono indagate le seguenti percentuali di sostituzione, studiate in varie ricerche e pubblicate in letteratura: 10 %, 25 % e 50 %.

Nel seguente capitolo, si discuterà dell' "Analisi dei Risultati", riportando per ciascun *Scenario* e casistica di sostituzione, i risultati ottenuti, oltre ad eseguire commenti e confronti, rispetto al legante di riferimento.

6. ANALISI DEI RISULTATI

In questo sesto capitolo sono stati analizzati i risultati ottenuti tramite l'utilizzo del tool PaLATE, soffermandosi principalmente sull'effetto che la tipologia di bio-legante (bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino e lignina) e di allocazione, economica o di massa, possa avere sulle emissioni di anidride carbonica ed energia, dell'intero processo, diagrammando, di seguito, i rispettivi andamenti. Per quanto riguarda l'effetto di allocazione, è stato valutato solamente il caso di sostituzione parziale con lignina, grazie alla disponibilità dei dati di input, disponibili in letteratura. Per comprendere le variazioni degli impatti ambientali di interesse, sono state analizzate varie percentuali di sostituzione, già indicate nel precedente capitolo, oltre a differenti tipologie di Piani di Manutenzione. Di seguito si riportano, in dettaglio, tutti i rispettivi scenari analizzati.

In generale, per entrambi i casi studio, sono state seguite le varie analisi, seguendo il medesimo *modus operandi*. In particolare, si sono analizzati differenti *Scenari*:

- *Scenario 0*: si è ipotizzato di mantenere, anche per il bio-legante preso in esame, il medesimo Piano di Manutenzione, pensato per un legante convenzionale.
- *Scenario 1-2*: si è ipotizzato, per il bio-legante, un diverso Piano di Manutenzione, aumentando la frequenza delle lavorazioni, dovute al fatto che lo stesso possessa, come osservato da diversi studi, caratteristiche comunque ancora inferiori, rispetto al legante standard.

Per il primo caso studio analizzato (Viadotto "Torre del Colle"), sono stati analizzati tre differenti *Scenari* (*Scenario 0*, *Scenario 1* e *Scenario 2*) mentre per quanto concerne, invece, il secondo (strada extraurbana italiana) ne sono stati analizzati due (*Scenario 0*, *Scenario 1*). Di seguito, si riportano i Piani di Manutenzione dettagliati, per ciascun *Scenario* analizzato.

CASO STUDIO “Viadotto Torre del Colle”: SCENARI ANALIZZATI

In questo caso studio, la sezione analizzata, risulta essere quella di un viadotto, composta solamente da uno strato di usura ed uno di collegamento. Le attività prese a riferimento per effettuare la manutenzione e le rispettive analisi, sono state: la rappezzatura (*patching*) e la fresatura totale degli strati (*Full Depth Reclamation*).

SCENARIO 0:Tabella 18 Piano di Manutenzione viadotto “Torre del Colle”: *Scenario 0*.

1	P_u	6	FDR_u	11	P_u	16	P_u
2	P_u	7	P_u	12	FDR_u	17	P_u
3	FDR_u	8	P_u	13	P_u	18	FDR_u
4	P_u	9	FDR_u	14	P_u	19	P_u
5	P_u	10	P_u	15	FDR_u	20	Dismissione

In particolare, ogni anno, viene eseguito un intervento di rappezzatura dello strato di usura (P_u), mentre ogni tre, una fresatura totale, del medesimo strato (FDR_u), fino a giungere, infine, al ventesimo anno, con la dismissione totale del pacchetto legato a bitume (usura e collegamento).

SCENARIO 1:Tabella 19 Piano di Manutenzione viadotto “Torre del Colle”: *Scenario 1*.

1	P_u	6	P_u	11	P_u	16	P_u
2	P_u	7	P_u	12	P_u	17	P_u
3	FDR_u	8	FDR_u	13	FDR_u	18	FDR_u
4	P_u	9	P_u	14	P_u	19	P_u
5	FDR_u+c	10	FDR_u+c	15	FDR_u+c	20	Dismissione

In particolare, ogni anno, viene eseguito un intervento di rappezzatura dello strato di usura (P_u), ogni tre, una fresatura totale, del medesimo strato (FDR_u), mentre ogni cinque, una fresatura dell'intero pacchetto legato a bitume (FDR_{u+c}), fino a giungere, poi, al ventesimo anno, con la dismissione totale della sovrastruttura.

SCENARIO 2:

In questo *Scenario*, invece, si prende a riferimento lo *Scenario 0* ma si considera una percentuale differente di rappezzatura dello strato di usura. In particolare, si ipotizza di eseguire, non l'1.8 %, ma bensì il doppio, ovvero il 3.6 %.

CASO STUDIO “strada extraurbana italiana”: SCENARI ANALIZZATI

In questo caso studio, la sezione di analisi, risulta essere quella di una strada extraurbana italiana, composta da uno strato di usura, uno di collegamento, uno di base e, infine, uno di fondazione. Le attività prese a riferimento per effettuare la manutenzione e le rispettive analisi, sono state: la rappezzatura (*patching*) e la fresatura totale degli strati (*Full Depth Reclamation*).

SCENARIO 0:

Tabella 20 Piano di Manutenzione “strada extraurbana italiana”: *Scenario 0*.

1		6		11		16	
2		7		12		17	
3		8		13		18	Dismissione
4		9		14			
5	FDR _u	10	FDR _u	15	FDR _u		

In questo caso, ogni cinque anni, si esegue solamente un intervento di fresatura completa dello strato di usura (FRD_u) mentre, infine, al diciottesimo anno, si procede con la dismissione totale del pacchetto legato a bitume (usura, collegamento e base).

SCENARIO 1:

Tabella 21 Piano di Manutenzione “strada extraurbana italiana”: Scenario 1.

1	P_u	6	FDR_u+c	11	P_u	16	P_u
2	P_u	7	P_u	12	FDR_u+c	17	P_u
3	FDR_u	8	P_u	13	P_u	18	Dismissione
4	P_u	9	FDR_u	14	P_u		
5	P_u	10	P_u	15	FDR_u		

In questo Scenario, viene ipotizzata di effettuare, ogni anno, la rappazzatura dello strato di usura (P_u), ogni tre la fresatura totale dello stesso strato (FDR_u), mentre ogni sei, si esegue una fresatura dello strato di usura e collegamento (FDR_u+c) fino a giungere, poi, al diciottesimo anno, con la dismissione del pacchetto legato a bitume.

6.1 Effetto della tipologia del bio-legante

Per valutare l'effetto della diversa tipologia di bio-legante sugli impatti di interesse, ne sono stati presi a riferimento, due differenti: il bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino e la lignina.

6.1.1 CASO STUDIO: “Viadotto Torre del Colle”**BIO-LEGANTE DERIVANTE DA LETAME SUINO**

Tabella 22 Output tool PaLATE (Scenario 0).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	322.7	318.8	308.6
E	[GJ]	3755	3706	3633	3454
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-0.8	-2.0	-5.1
	ΔE [%]	-	-1.3	-3.3	-8.0

Di seguito, vengono riportati i grafici, sia per l'andamento delle emissioni di anidride carbonica che dell'energia, al variare delle diverse percentuali di bio-legante utilizzato.

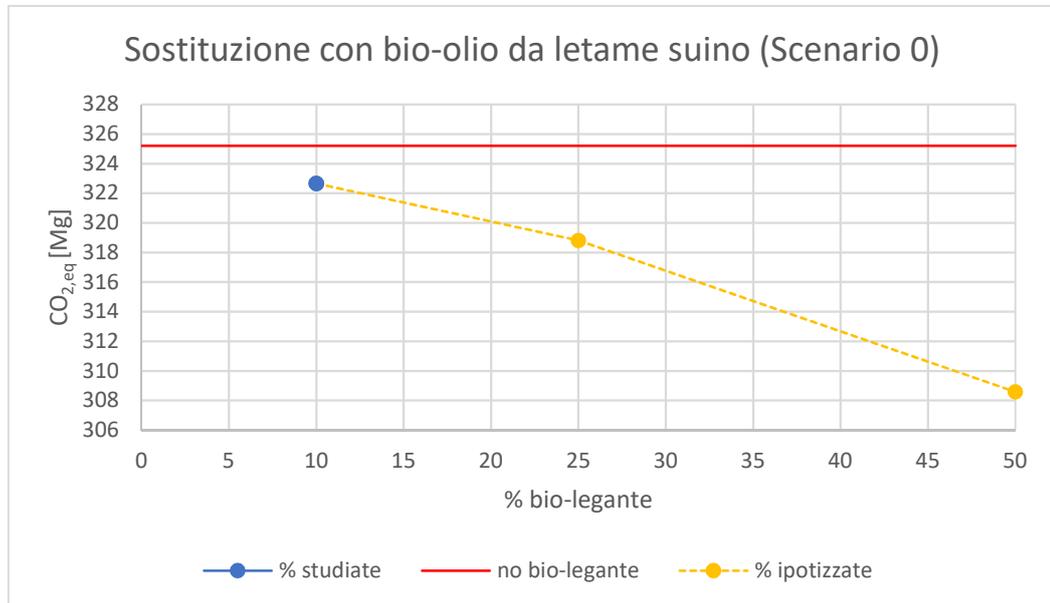


Figura 120 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legante (Scenario 0).

Come si può osservare dal grafico soprariportato, sono state evidenziate, con una retta rossa, le emissioni dovute all'uso di un legante convenzionale, da utilizzare come soglia, nella nostra analisi. Le varie percentuali analizzate, sono state, poi, differenziate, tra "studiate" e "ipotizzate". La prima fa riferimento a casi studiati, consultabili sia in letteratura che nel primo capitolo di questo lavoro, mentre le seconde sono riferite a possibili casi futuri, ad oggi ancora non studiati, utili, però, per comprendere, con maggior completezza il significato dell'analisi.

Come evidente, ipotizzando il medesimo Piano di Manutenzione scelto per il caso senza utilizzo di bio-modificanti, gli esiti risultano essere promettenti, in quanto, sempre minori rispetto al caso utilizzante un legante convenzionale.

Per comprendere meglio il fenomeno, infine, nella tabella riportata nella pagina precedente, sono state indicate anche le variazioni percentuali, prendendo a riferimento il caso di legante standard.

Si è effettuata la medesima analisi anche per l'energia, osservando comportamenti simili nell'andamento, mentre ben maggiori variazioni percentuali. Di seguito si riporta il grafico.

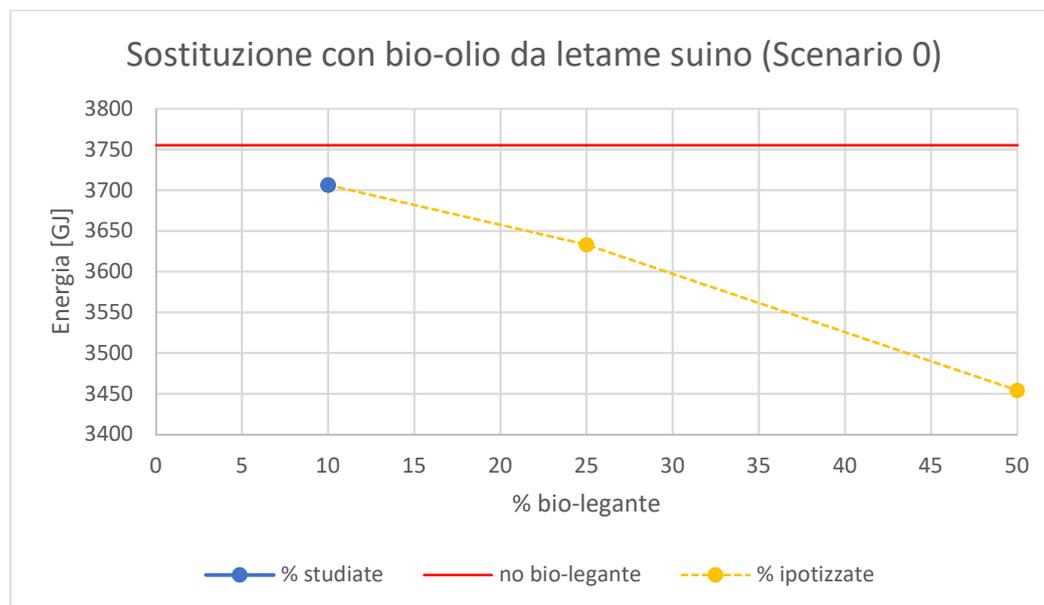


Figura 121 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 0*).

In genere si può osservare come all'aumentare della percentuale di bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino, si abbia sia una diminuzione delle emissioni di CO₂ che minori impatti in termini di energia di processo. Una volta analizzato lo *Scenario 0*, si passa, adesso all'*1*, seguendo il Piano di Manutenzione prima commentato. Di seguito si riporta la *tabella*:

Tabella 23 Output tool PaLATE (*Scenario 1*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	477.6	471.6	461.6
E	[GJ]	3755	5413	5298	5106
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	46.8	45.0	41.9
	ΔE [%]	-	44.1	41.1	36.0

Come si può evincere dalla tabella, i dati di output ottenuti dal tool PaLATE sono molto differenti rispetto al caso di riferimento (0%), in base alle variazioni percentuali.

Questo, ovviamente, era prevedibile, considerando che ad un numero maggiore di attività di manutenzione, corrisponde una quantità più elevata di rifiuti prodotti, creando, quindi, maggiori consumi, in termini di trasporto.

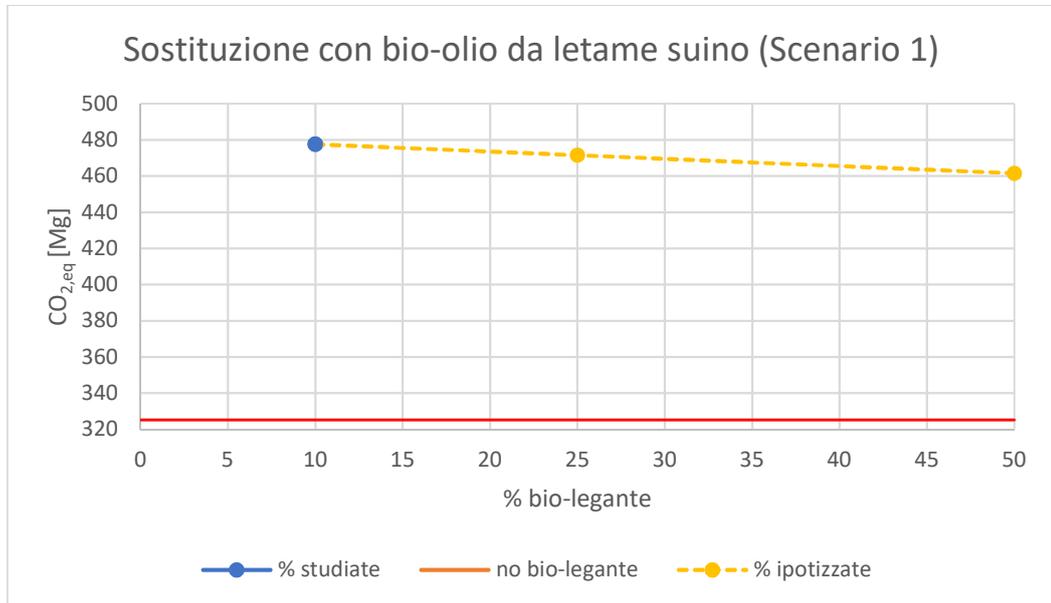


Figura 122 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legante (*Scenario 1*).

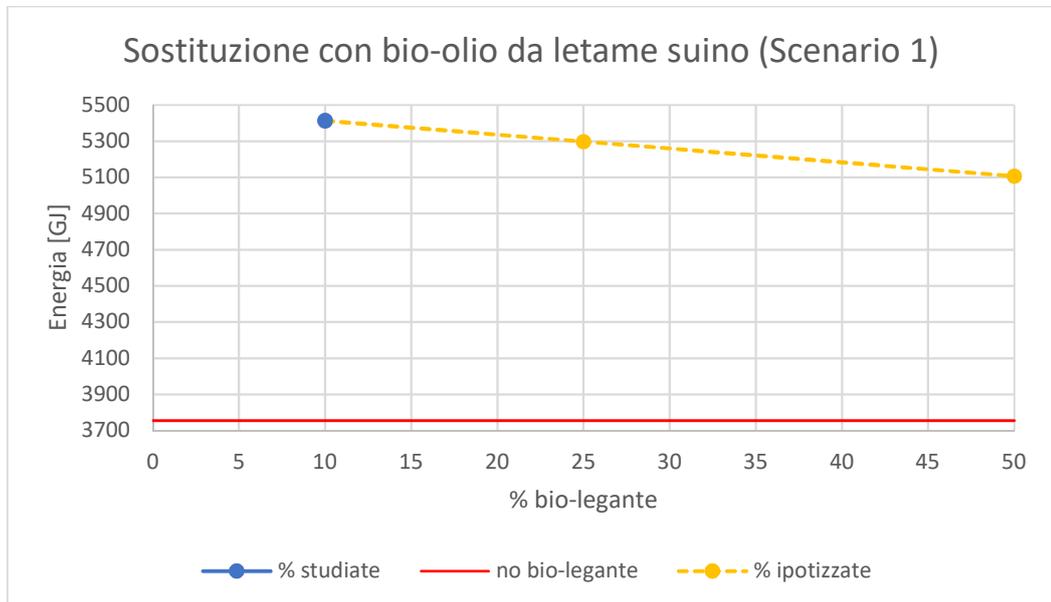


Figura 123 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legante (*Scenario 1*).

Come evidente, gli andamenti risultano essere i medesimi osservati nel precedente *Scenario*, con la differenza di essere solamente traslati in alto, superando, così, la soglia,

riferita al caso in cui si utilizzi del legante convenzionale. In questo caso non si nota il vantaggio di tipo ambientale, riscontrato, invece, nello *Scenario* precedente. Per completezza si riportano, di seguito, i grafici nei quali si mettono a confronto i due *Scenari*, appena analizzati.

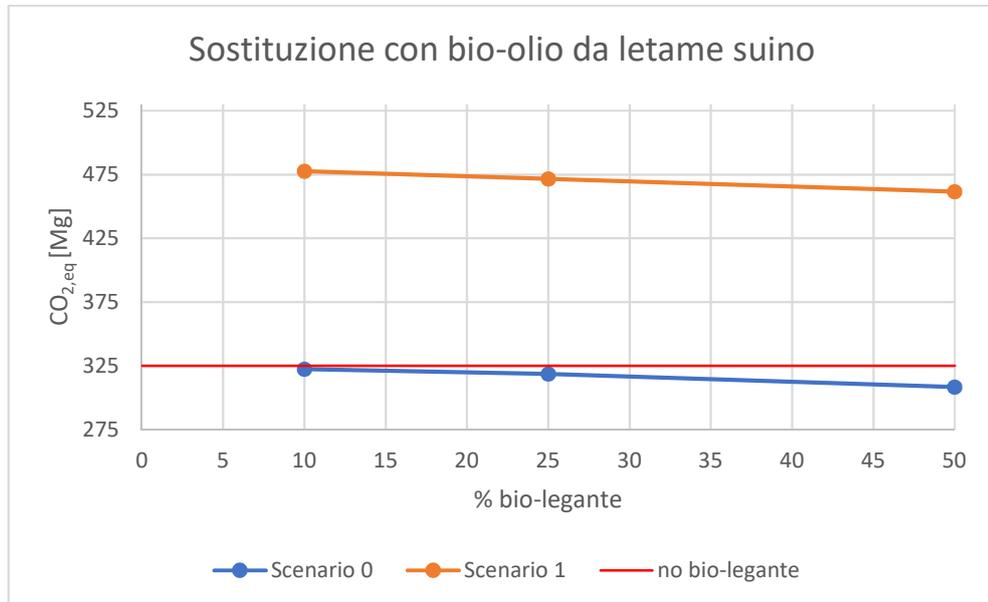


Figura 124 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

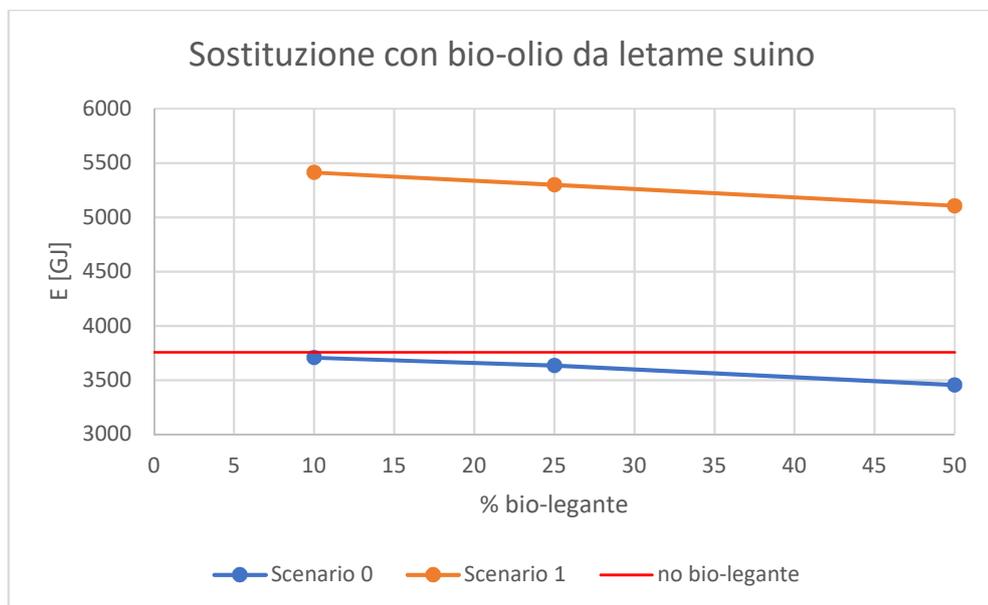
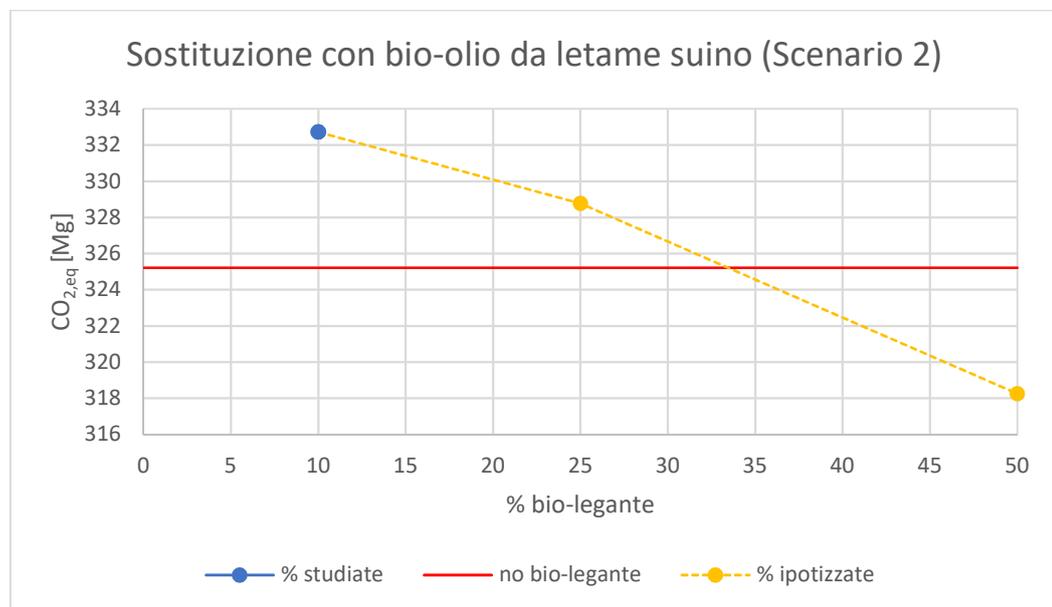


Figura 125 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

Altro *Scenario* analizzato, è stato quello nel quale è stata eseguita una maggior attività di rappazzatura, il doppio rispetto al caso con legante convenzionale, passando dall'1.8 % al 3.6 %, del volume dello strato di usura. I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 24 Output tool PaLATE (*Scenario 2*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	332.7	328.8	318.3
E	[GJ]	3755	3824	3749	3565
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	2.3	1.1	-2.1
	ΔE [%]	-	1.8	-0.2	-5.1

Figura 126 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 2*).

Dal grafico risulta evidente, come la percentuale “studiate”, il 10 %, abbia emissioni maggiori rispetto alla soglia, mentre, per percentuali maggiori del 10 %, si osservano valori di emissioni minori. Un andamento simile è stato riscontrato anche per l'energia, come di seguito riportato.

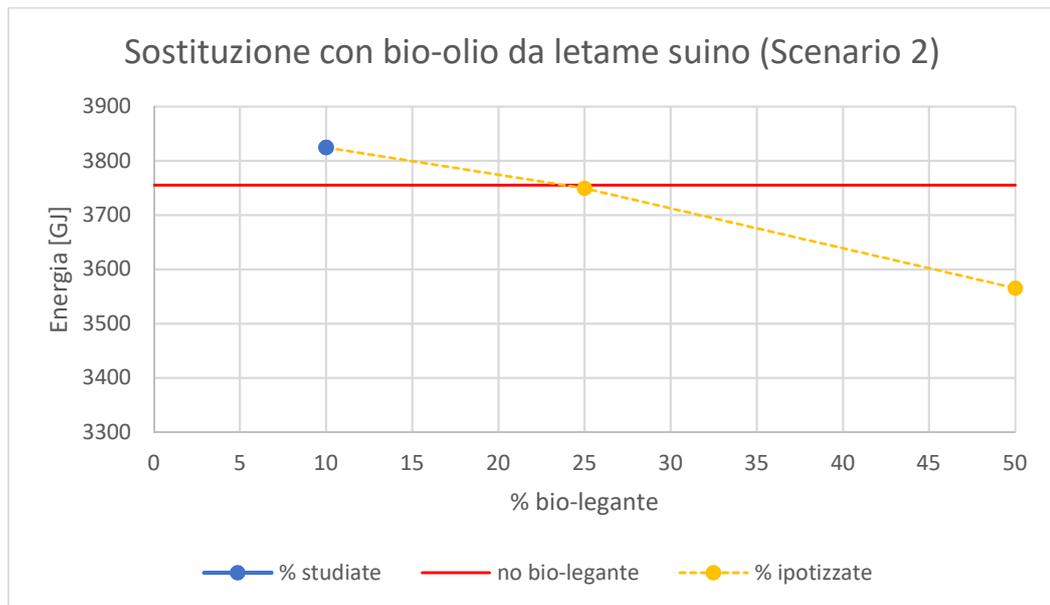


Figura 127 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 2*).

Per completezza si riportano, di seguito, i grafici nei quali si mettono a confronto lo *Scenario 0* e *2*.

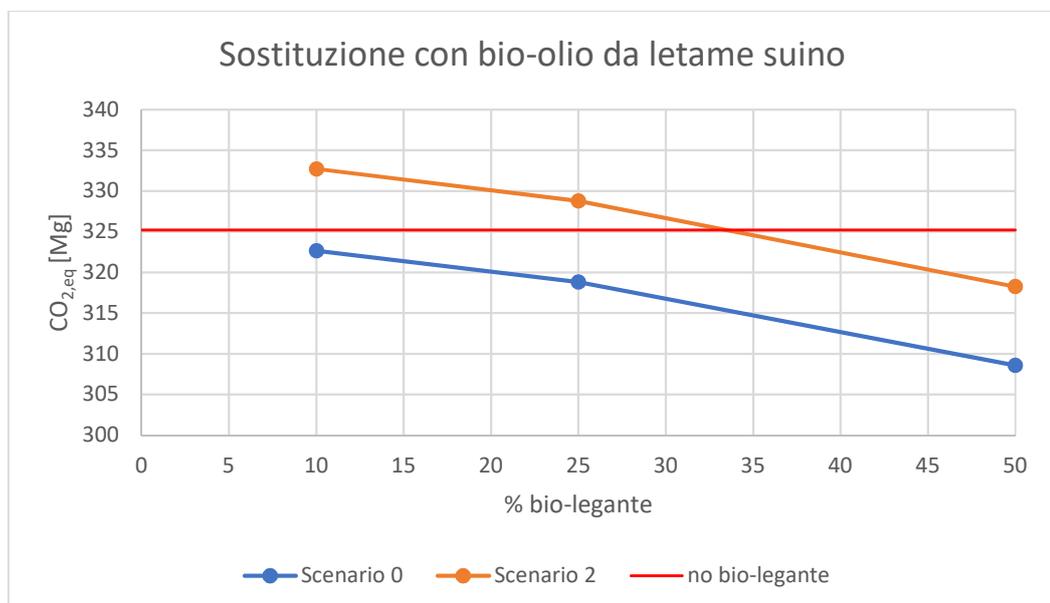


Figura 128 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 2*: Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

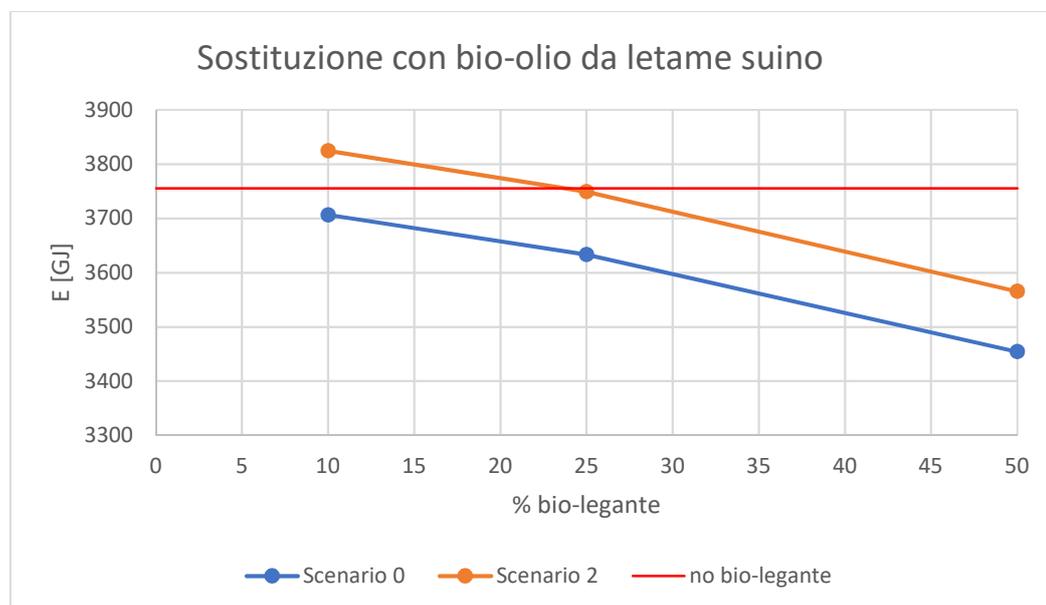


Figura 129 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 2*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

BIO-LEGANTE CONTENENTE LIGNINA

Per quanto riguarda la lignina, sono stati analizzati i medesi casi presi a riferimento per il bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino, soffermandosi su differenti percentuali di sostituzione. Partendo dall'analisi dello *Scenario 0*, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 25 Output tool PaLATE (*Scenario 0*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	324.3	321.6	317.7
E	[GJ]	3755	3892	4096	4499
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-0.3	-1.1	-2.3
	ΔE [%]	-	3.6	9.1	19.8

Come osservabile dai valori delle differenti percentuali di sostituzione, si evidenzia una maggiore variazione percentuale nell'energia rispetto all'emissione di anidride carbonica, rilevando, così, una maggiore sensibilità del tool, nei confronti della risorsa energetica.

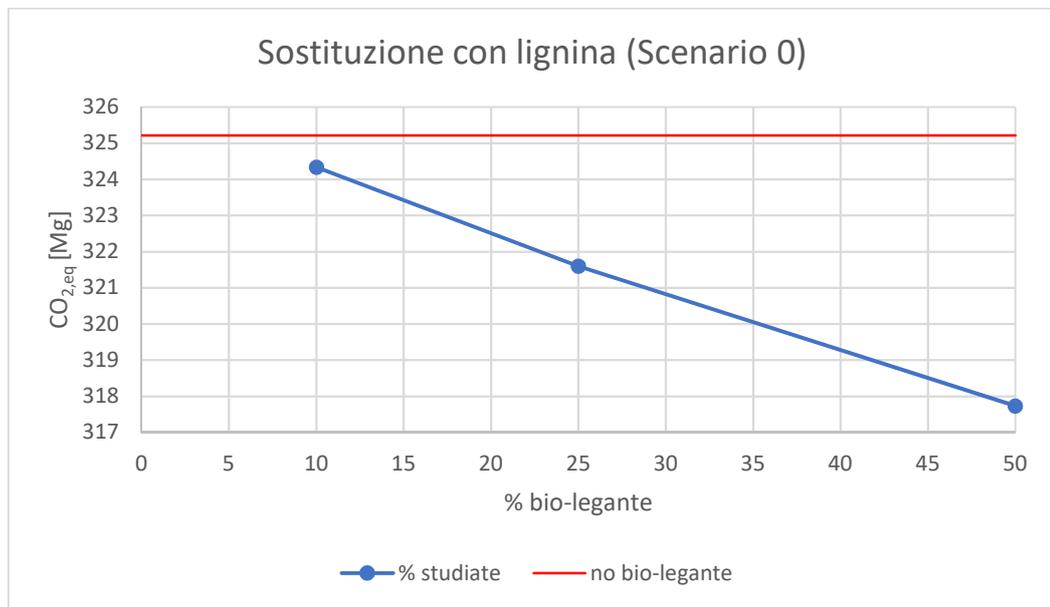


Figura 130 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 0*).

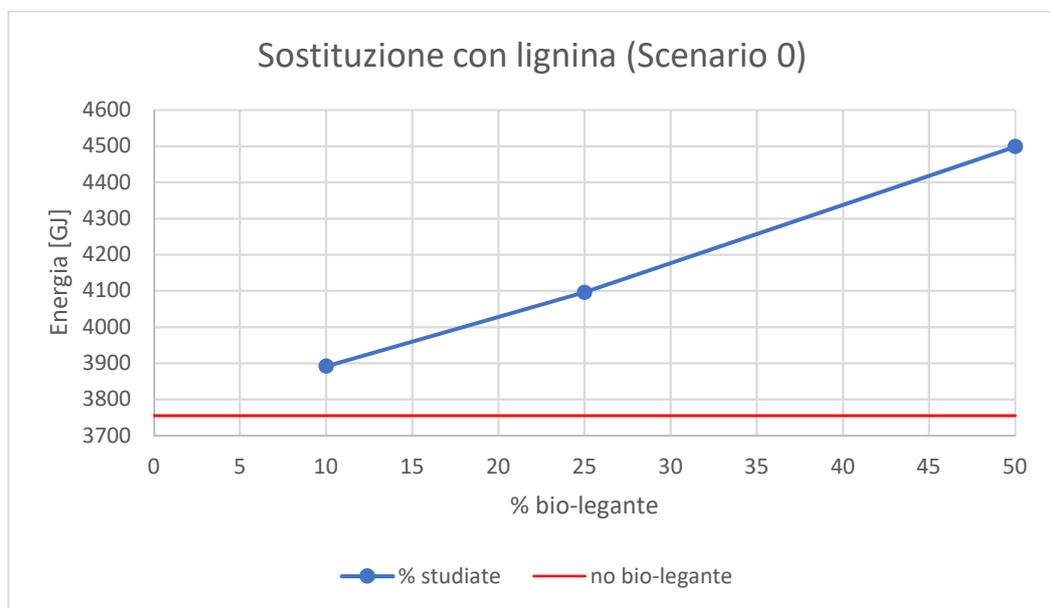


Figura 131 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 0*).

Analizzando gli andamenti dei due grafici soprariportati, si nota già una differenza tra la sostituzione con lignina e quella con bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino. In precedenza, si osservavano andamenti entrambi decrescenti all'aumentare delle percentuali dei bio-olio, mentre, adesso, per la lignina si notano andamenti opposti sia per l'anidride carbonica che per l'energia.

In particolare, si osserva, all'aumentare della percentuale di sostituzione, un andamento decrescente per quanto riguarda l'emissione di CO₂, crescente, invece, per quanto attiene l'energia e anche nello *Scenario 0*, si nota un'energia maggiore rispetto alla soglia, riferita al caso con legante standard.

Analizzando lo *Scenario 1*, invece, seguendo il Piano di Manutenzione già commentato, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 26 Output tool PaLATE (*Scenario 1*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	480.3	476.1	470.2
E	[GJ]	3755	5705	6026	6661
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	47.7	46.4	44.6
	ΔE [%]	-	51.9	60.5	77.4

Come evidente dai numeri e dalle differenze percentuali, riportate in tabella, anche per la CO₂, si ha il superamento della soglia, constatando, così, il non vantaggio ambientale. Quello che però rimane il medesimo è l'andamento: decrescente per la CO₂ e crescente per l'energia. Per una migliore comprensione si riportano i rispettivi grafici.

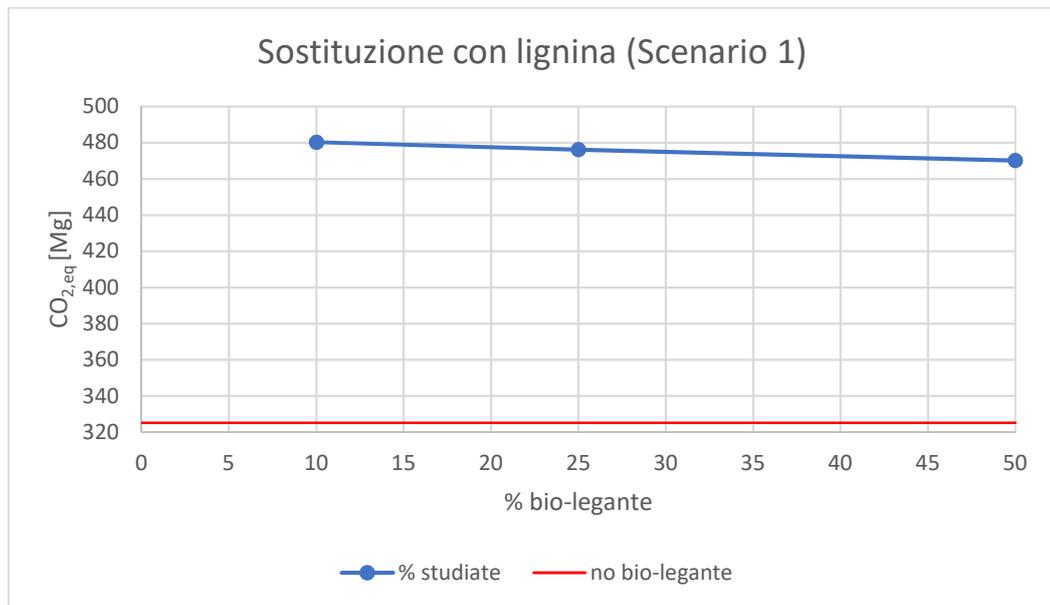


Figura 132 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).

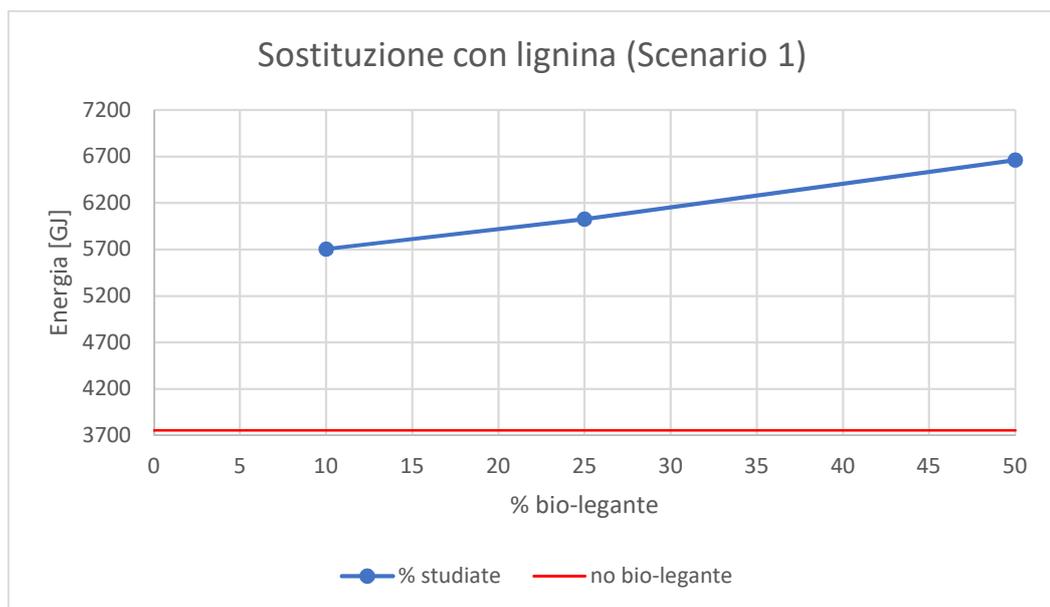


Figura 133 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).

Per completezza si riportano, di seguito, i grafici nei quali si mettono a confronto lo Scenario 0 e 1.

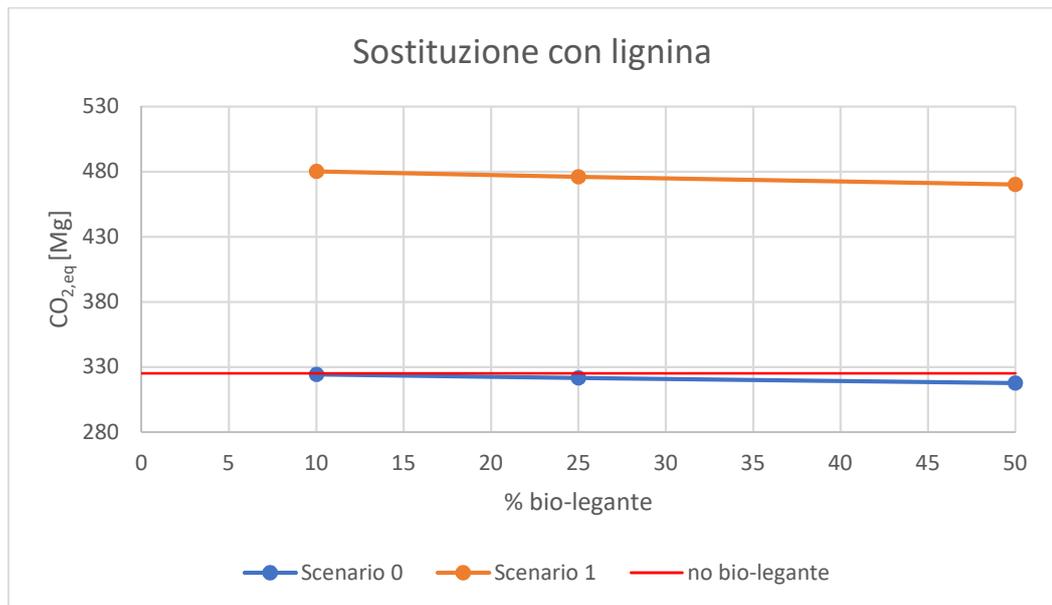


Figura 134 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

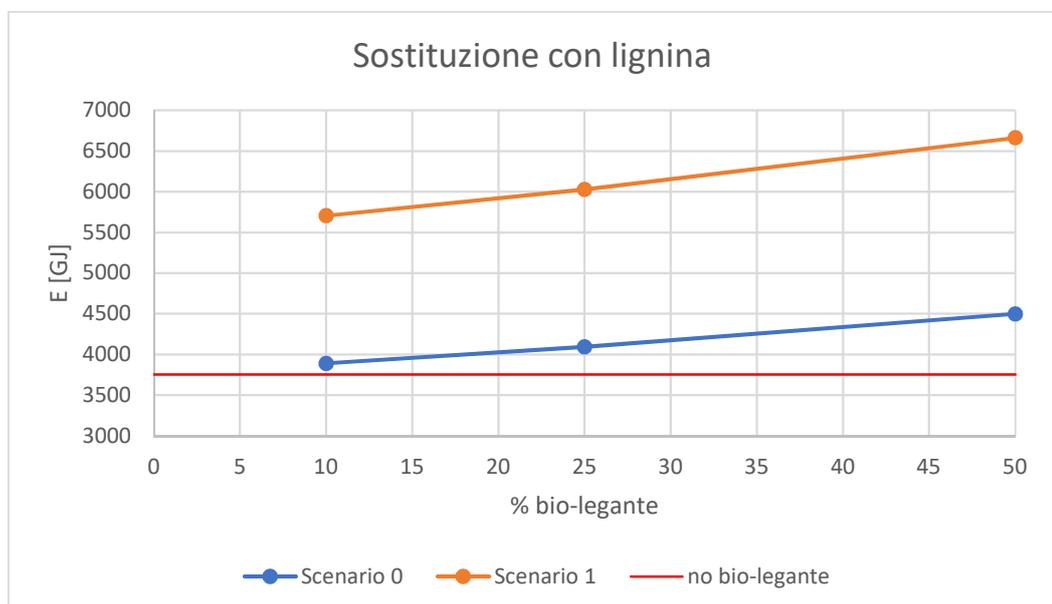


Figura 135 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

Per completezza si riportano, di seguito, i grafici, nel quale si hanno tutti gli scenari analizzati, riferiti a questo primo caso studio. Adesso, però, si diagrammerà il rapporto tra l'impatto nel caso di interesse, rispetto a quello di riferimento (0 %), al variare della percentuale di sostituzione.

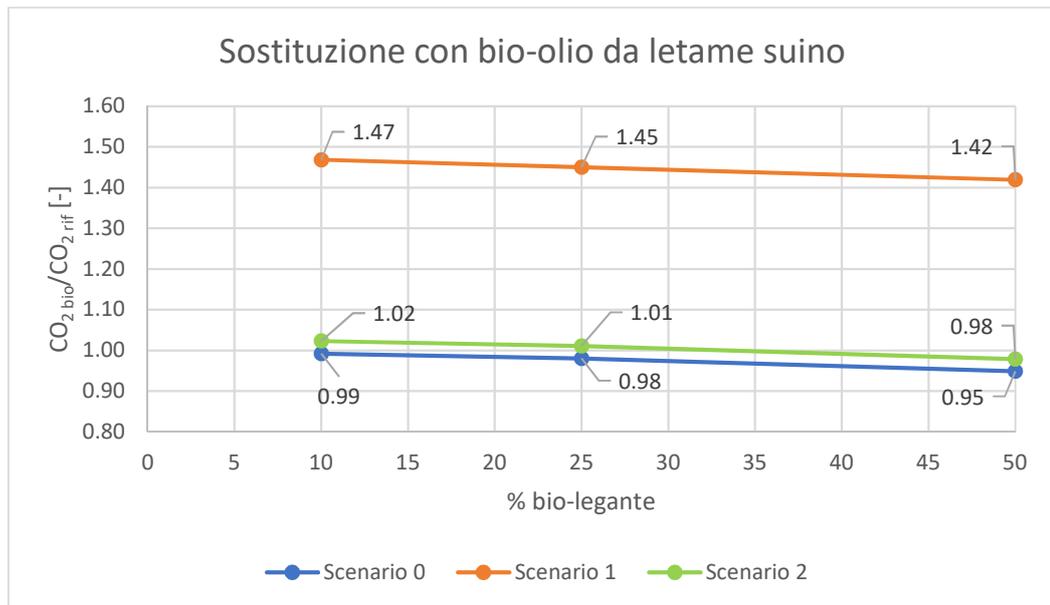


Figura 136 Confronto tra *Scenari*: Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

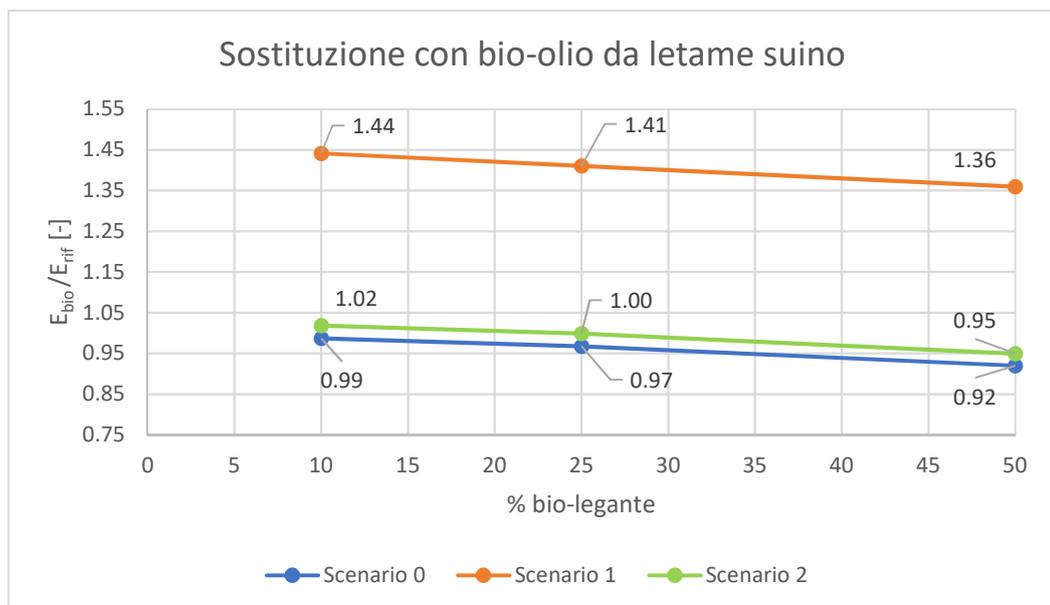


Figura 137 Confronto tra *Scenari*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

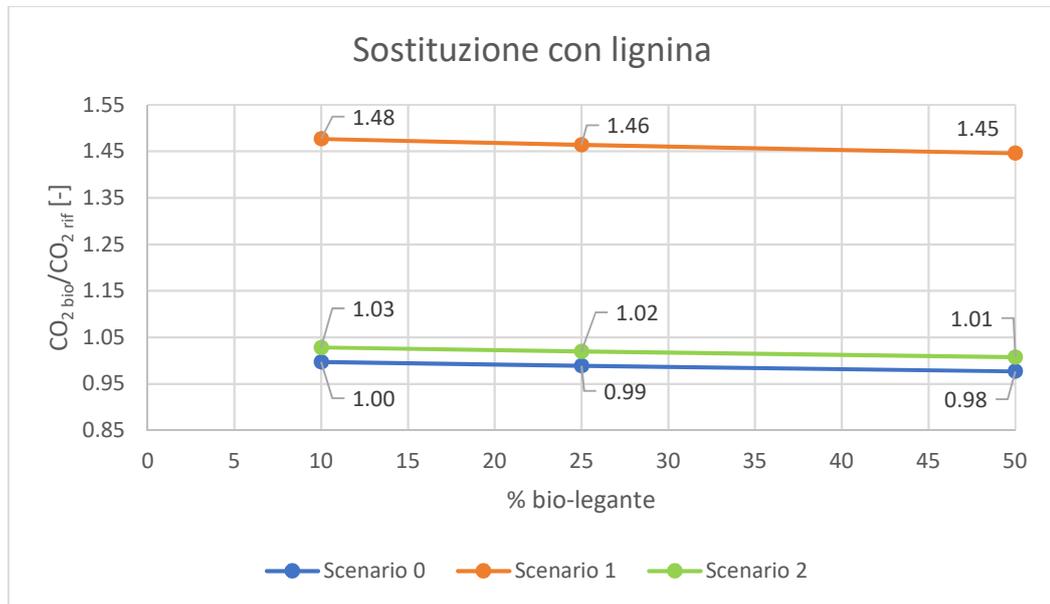


Figura 138 Confronto tra *Scenari*: Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legante.

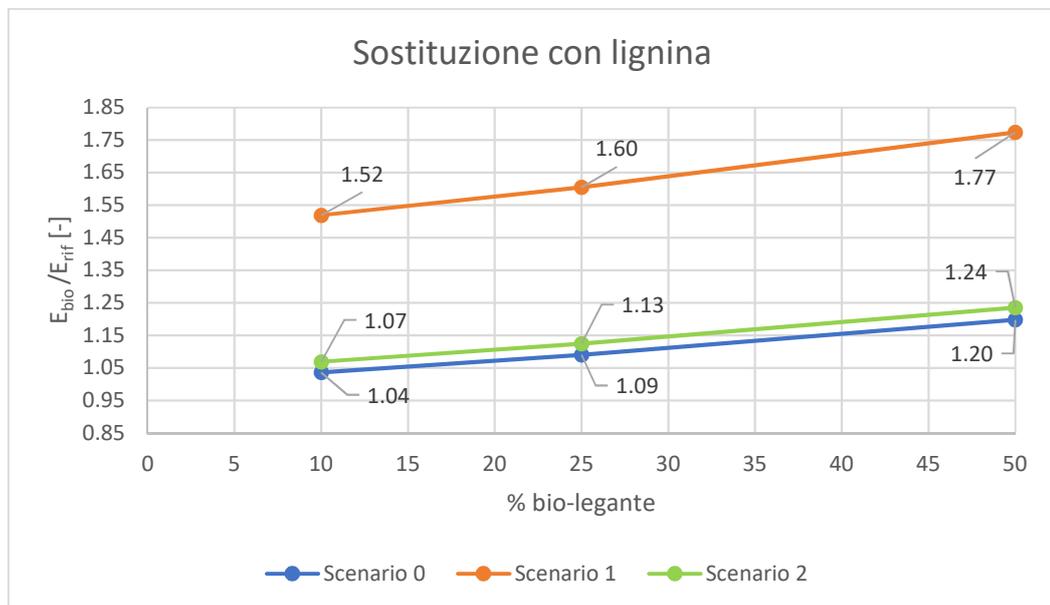


Figura 139 Confronto tra *Scenari*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legante.

6.1.2 CASO STUDIO: “strada extraurbana italiana”

Anche per il secondo caso studio, sono stati eseguiti i medesimi calcoli effettuati per il primo, al fine di constatare, per esempio, se gli andamenti fossero i medesimi riscontrati già in precedenza. In generale, si sono osservati gli stessi andamenti sia per quanto riguarda la CO₂ che per quanto concerne l’energia. Ovviamente i dati che varieranno, sono i valori numerici, in quanto riferiti a lunghezze e ad unità funzionali differenti.

Si riportano, di seguito, le tabelle e i vari grafici per una migliore comprensione, considerando, comunque, validi i commenti eseguiti, già, nelle pagine precedenti.

BIO-LEGANTE DERIVANTE DA LETAME SUINO

Tabella 27 Output tool PaLATE (Scenario 0).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	1.279	1.257	1.225	1.164
E	[GJ]	18.55	18.12	17.51	16.34
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-1.7	-4.2	-9.0
	ΔE [%]	-	-2.3	-5.6	-11.9

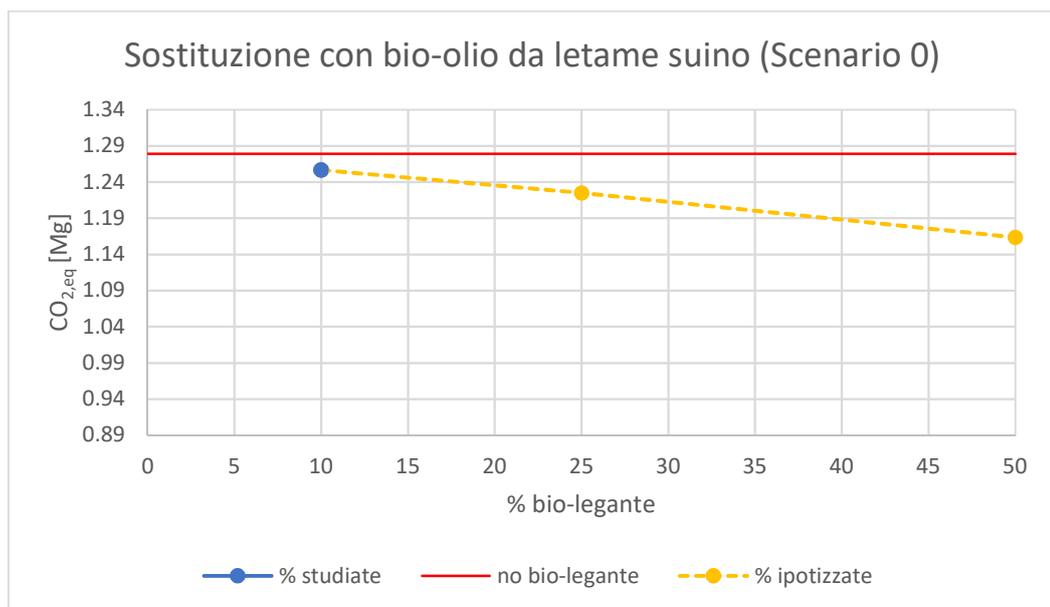


Figura 140 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).

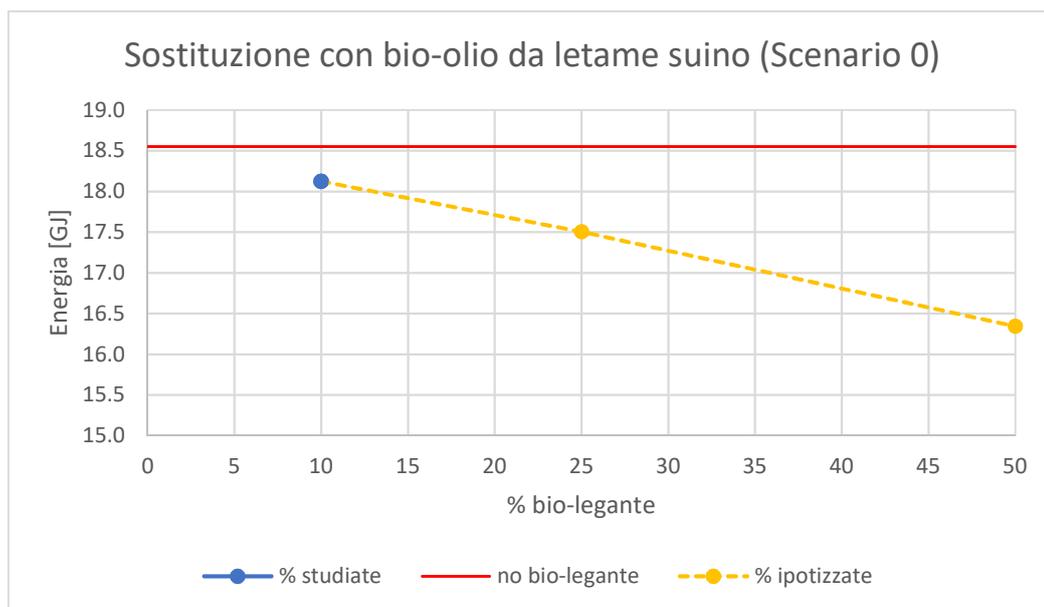


Figura 141 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).

Tabella 28 Output tool PaLATE (Scenario 1).

	[%]	0	10	25	50
CO_{2,eq}	[Mg]	1.279	3.693	3.608	3.502
E	[GJ]	18.6	51.8	50.3	48.2
	Δ CO _{2,eq} [%]	-	188.7	182.1	173.8
	Δ E [%]	-	179.3	171.1	159.9

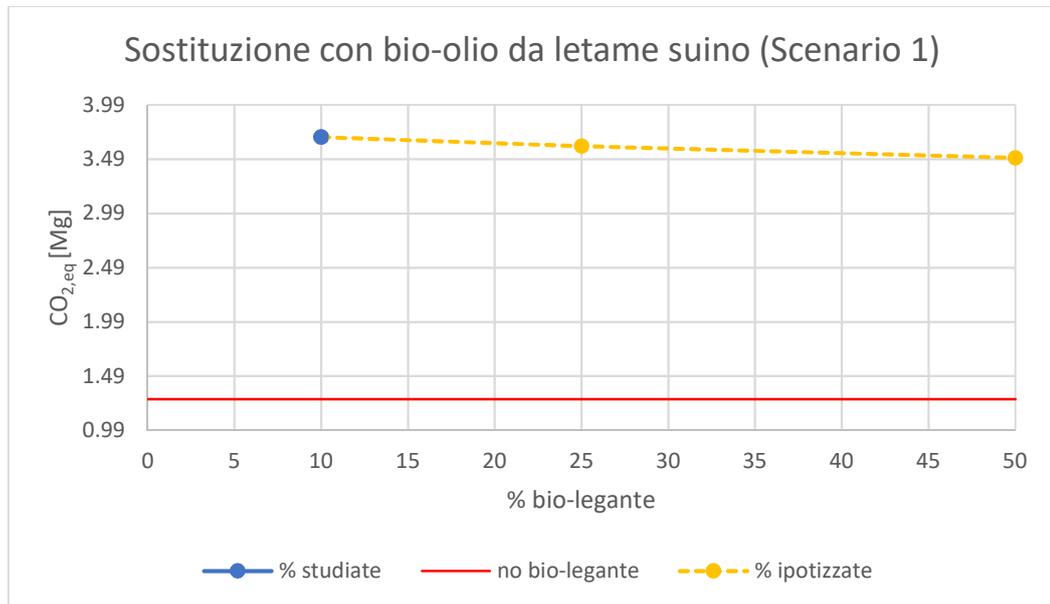


Figura 142 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).

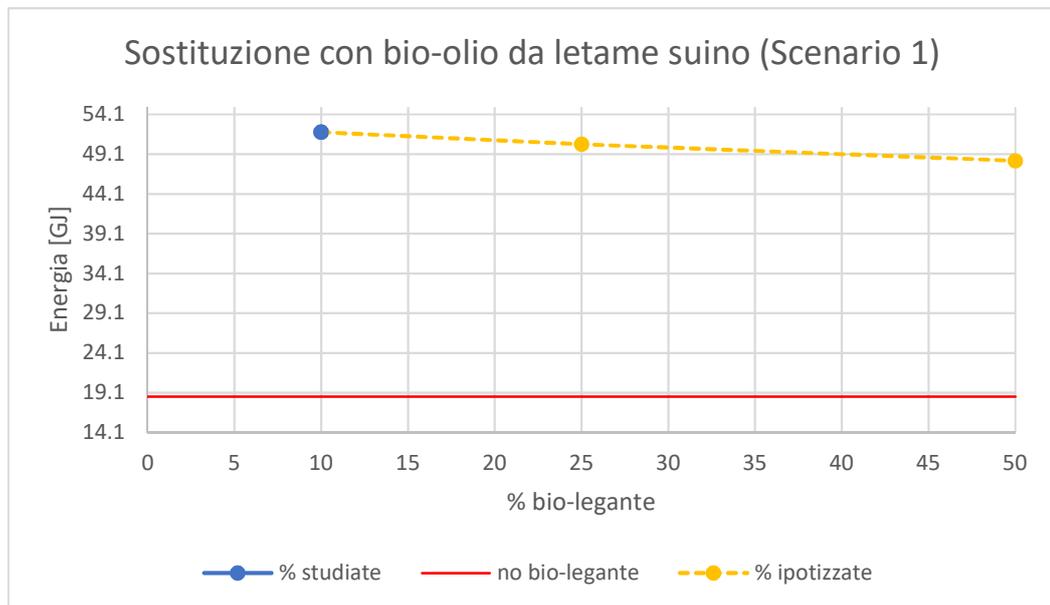


Figura 143 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).

Per completezza si riportano, di seguito, i grafici nei quali si mettono a confronto lo Scenario 0 e 1.

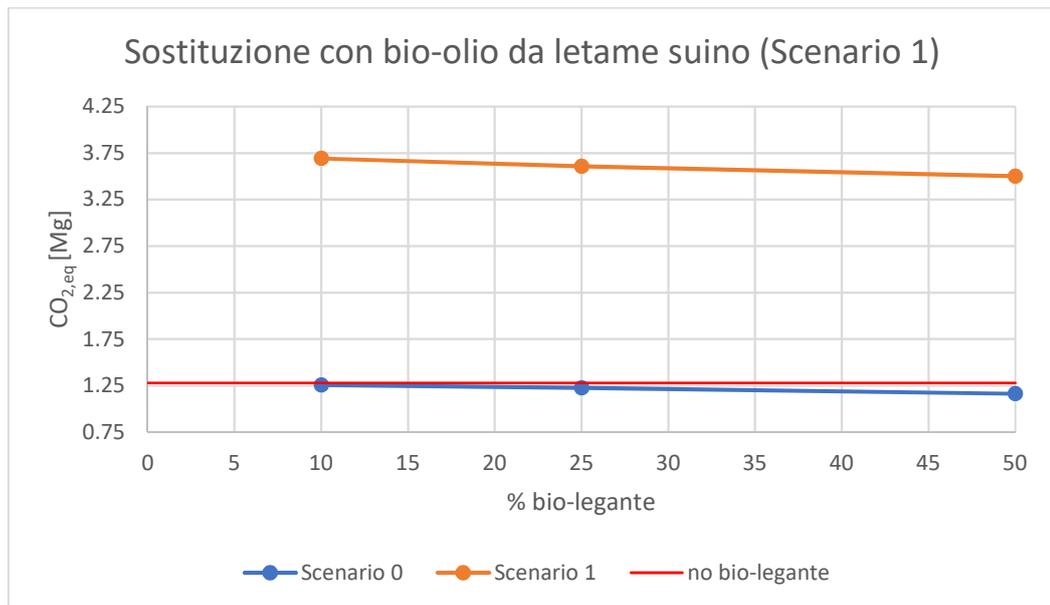


Figura 144 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

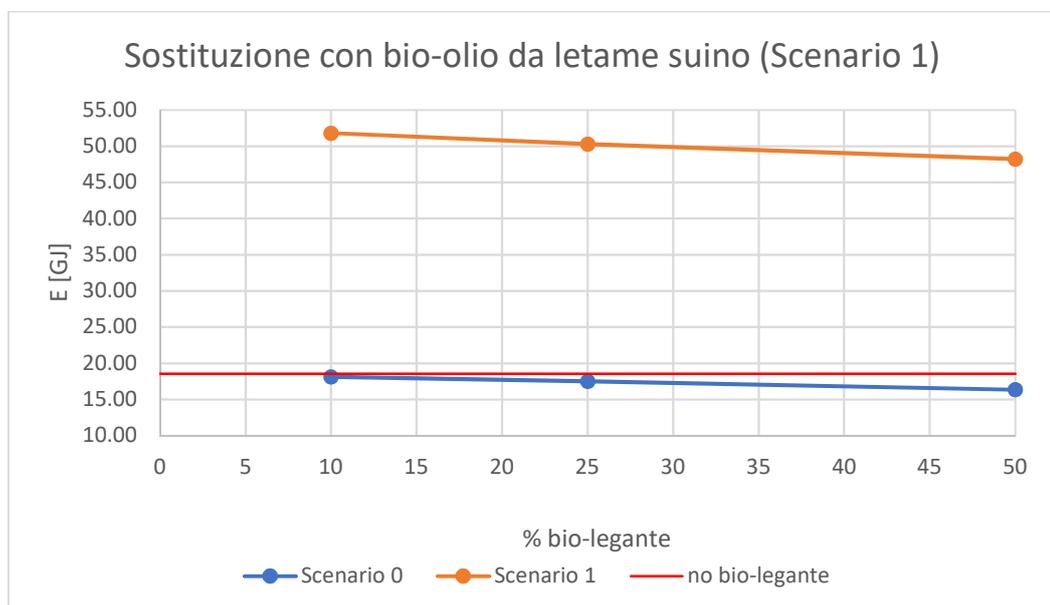


Figura 145 Confronto *Scenario 0* e *Scenario 1*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

BIO-LEGANTE CONTENENTE LIGNINATabella 29 Output tool PaLATE (*Scenario 0*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	0.99	0.98	0.96	0.94
E	[GJ]	14	14.4	14.8	15.9
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-1.0	-3.4	-5.8
	ΔE [%]	-	2.8	5.5	13.3

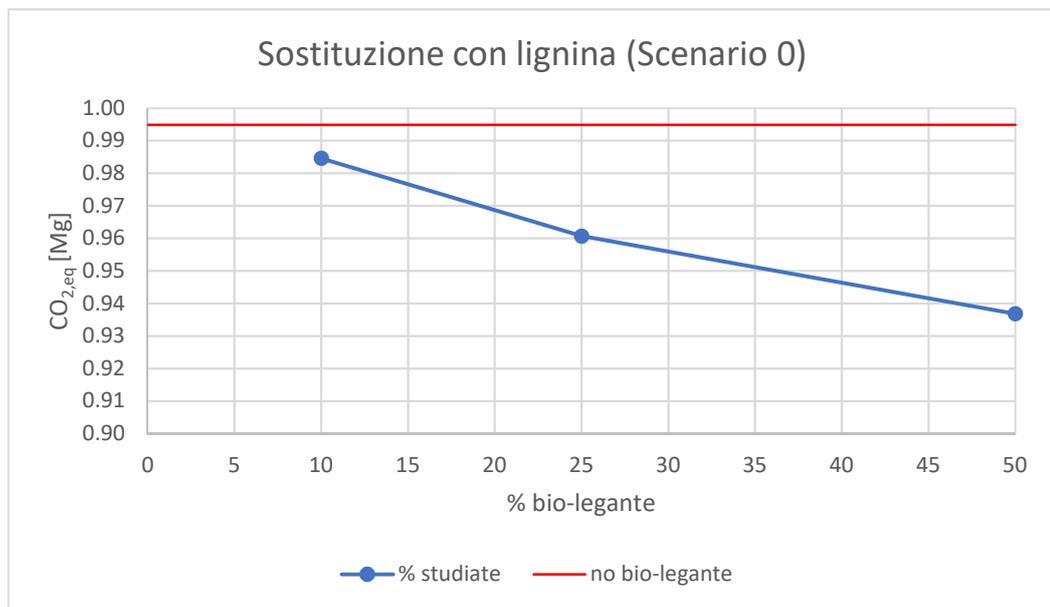
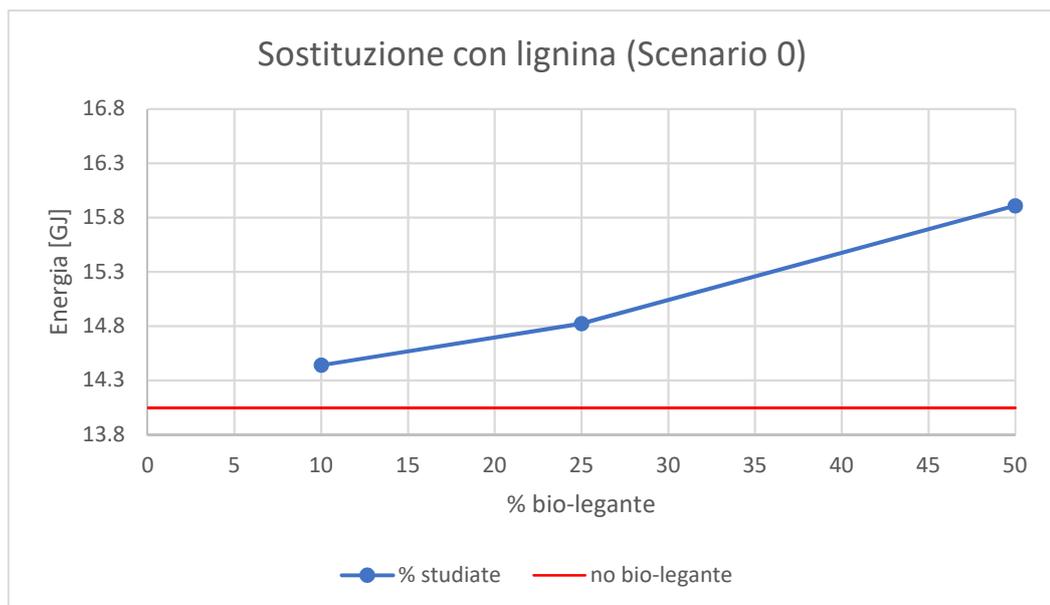
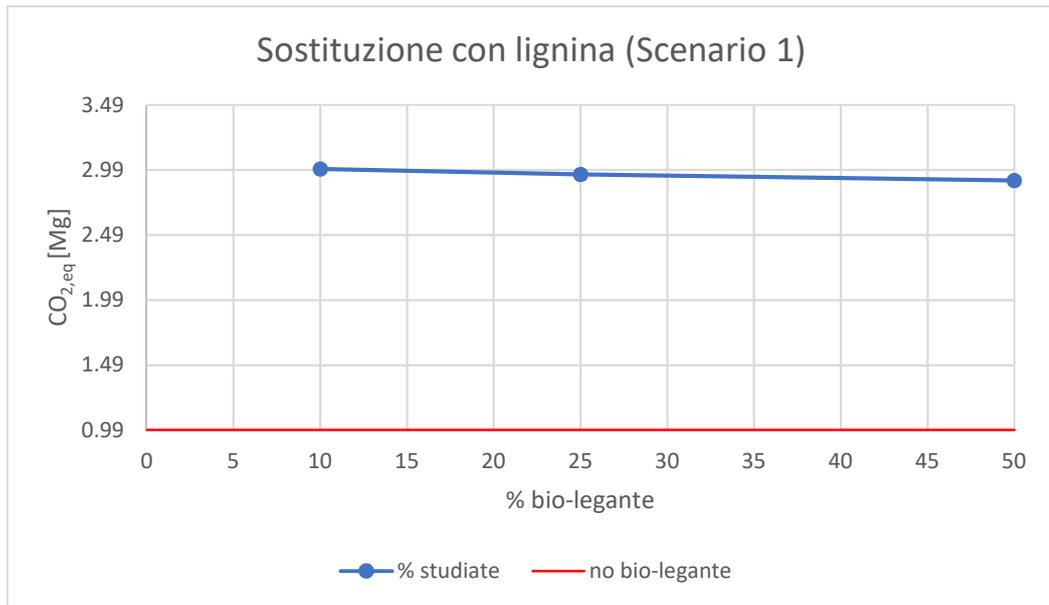
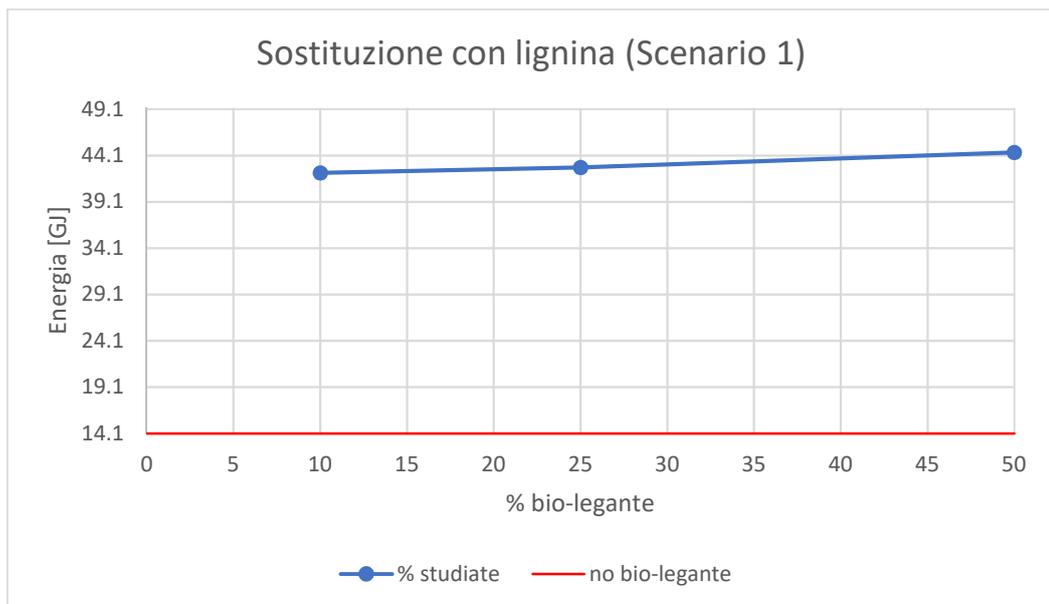
Figura 146 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legante (*Scenario 0*).Figura 147 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legante (*Scenario 0*).

Tabella 30 Output tool PaLATE (*Scenario 1*).

	[%]	0	10	25	50
CO _{2,eq}	[Mg]	0.995	3.00	2.96	2.91
E	[GJ]	14	42.2	42.8	44.4
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	201.4	197.1	192.5
	ΔE [%]	-	200.3	204.5	216.0

Figura 148 Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 1*).Figura 149 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (*Scenario 1*).

Per completezza si riportano, di seguito, i grafici, nel quale si hanno tutti gli scenari analizzati, riferiti a questo primo caso studio. Adesso, però, si diagrammerà il rapporto tra l'impatto nel caso di interesse, rispetto a quello di riferimento (0 %), al variare della percentuale di sostituzione.

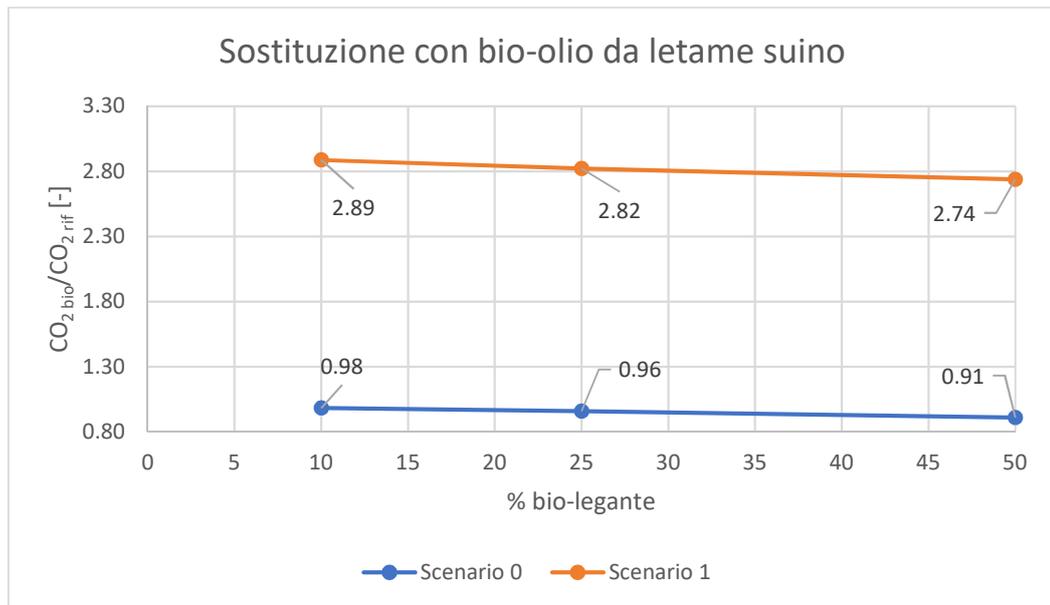


Figura 150 Confronto tra *Scenari*: Andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

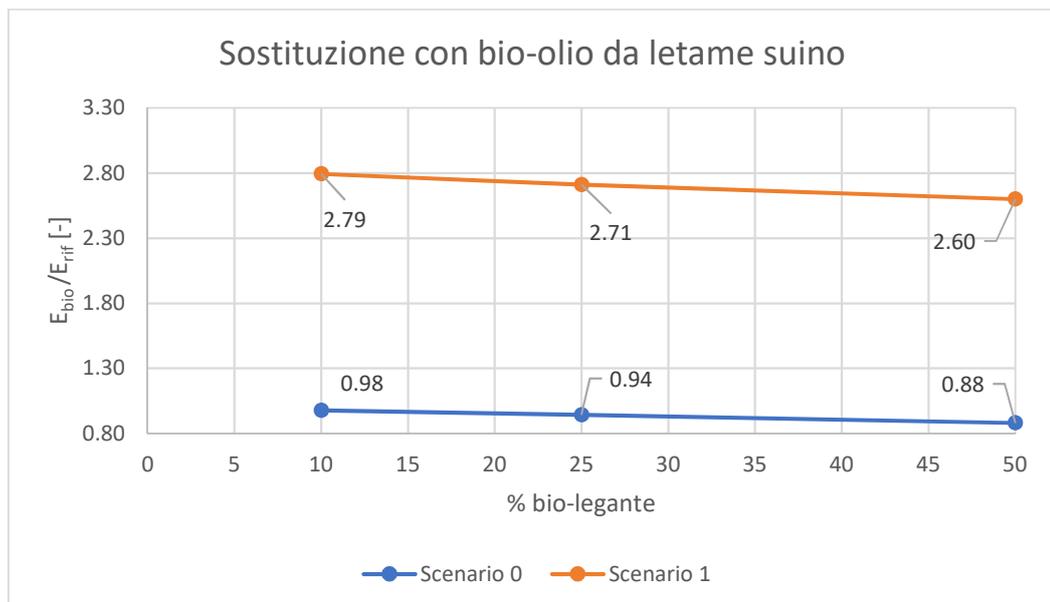
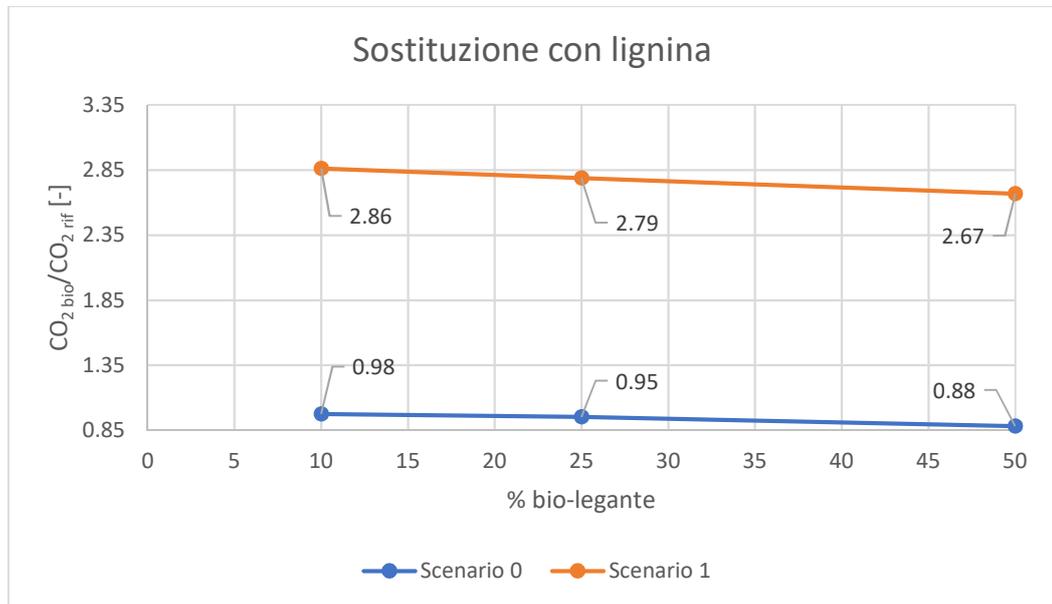
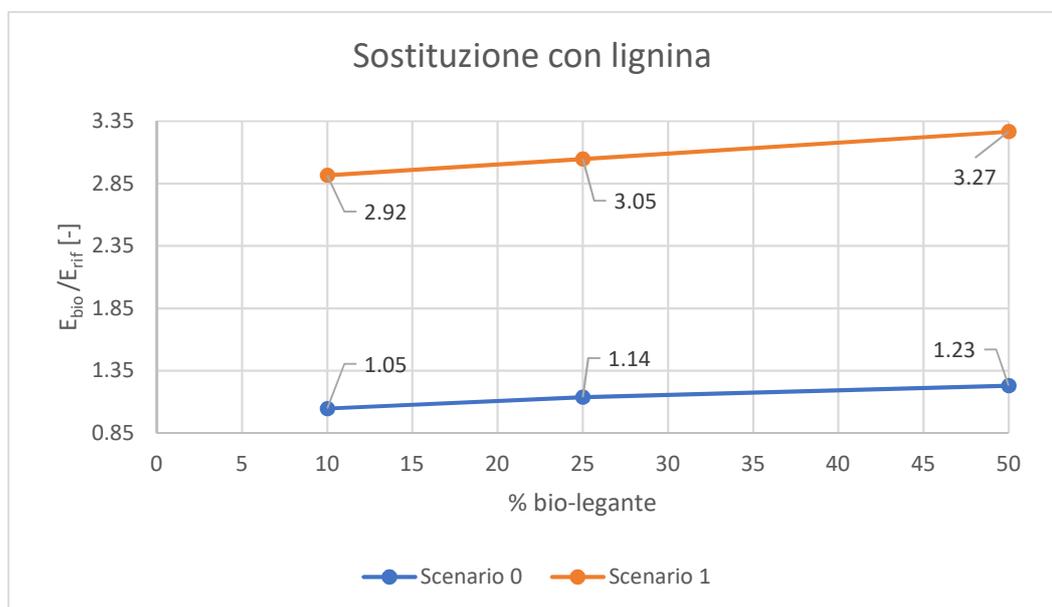


Figura 151 Confronto tra *Scenari*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

Figura 152 Confronto tra *Scenari*: Andamento della $CO_{2, \text{eq}}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.Figura 153 Confronto tra *Scenari*: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

6.2 Effetto del tipo di allocazione

Dopo aver eseguito le prime analisi, in funzione della tipologia del bio-modificante, si vuole analizzare, adesso, come la tipologia di allocazione (economica o di massa), possa influire sui risultati finali. Come già detto, per quanto riguarda la lignina si è deciso di eseguire, come prima analisi, quella basata sui dati di inventario relativi ad un'allocazione di tipo economico, mentre, di seguito, si confronteranno le analisi, di entrambe le tipologie di allocazione, cercando eventuali differenze.

Si riportano, due tabelle riassuntive con i valori di energia e anidride carbonica, ottenuti per ciascuna delle due tipologie di allocazione:

Tabella 31 Allocazione economica: valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	Energia [MJ/ton]
54,068	14,738

Tabella 32 Allocazione di massa: valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	Energia [MJ/ton]
48,353	28,576

Per l'allocazione di massa, i dati sono stati estrapolati dai lavori eseguiti da: Khandelwal (2019) e Bernier et al. (2013). Si ricorda che i valori di energia e di anidride carbonica, da inserire in PaLATE, sono stati ottenuti eseguendo una media pesata sulle percentuali relative di sostituzione.

Si è deciso di prendere a riferimento, per entrambi i casi studio, solamente lo *Scenario 0*, riportando, di seguito, i relativi commenti. Si elencano, in primis, le tabelle ed i rispettivi grafici e, infine, i commenti e le considerazioni finali.

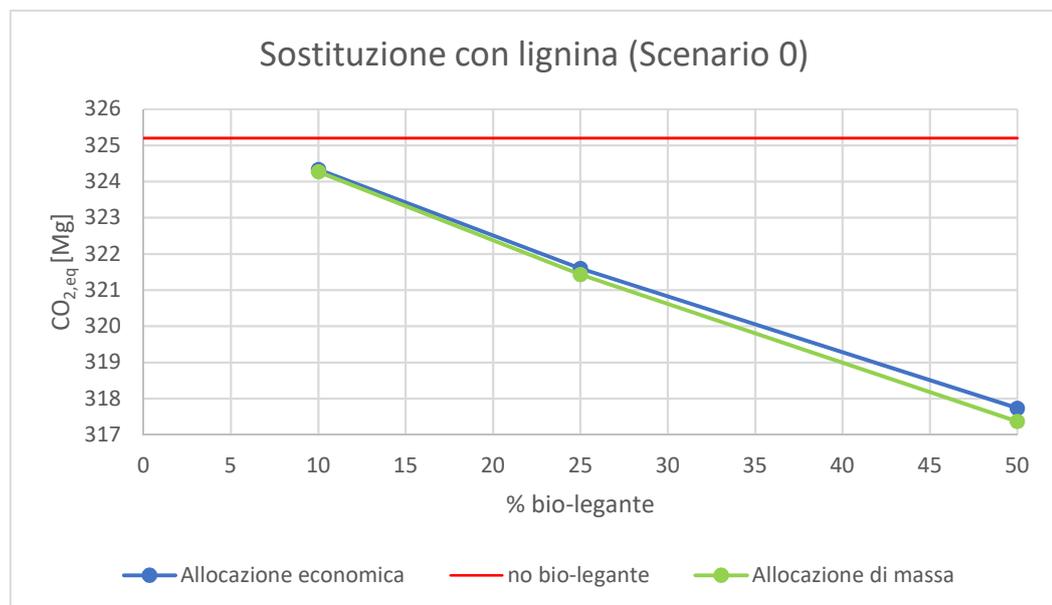
6.2.1 CASO STUDIO: "Viadotto Torre del Colle"

Tabella 33 Allocazione economica: output tool PaLATE (Scenario 0).

		ALLOCAZIONE ECONOMICA			
		0	10	25	50
	[%]				
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	324.33	321.6	317.7
E	[GJ]	3755	3892	4096	4499
	Δ CO _{2,eq} [%]	-	-0.27	-1.11	-2.29
	Δ E [%]	-	3.64	9.07	19.80

Tabella 34 Allocazione di massa: output tool PaLATE (Scenario 0).

		ALLOCAZIONE DI MASSA			
		0	10	25	50
	[%]				
CO _{2,eq}	[Mg]	325.2	324.27	321.4	317.4
E	[GJ]	3755	4048	4503	5386
	Δ CO _{2,eq} [%]	-	-0.29	-1.16	-2.41
	Δ E [%]	-	7.79	19.92	43.42

Figura 154 Confronto tra allocazioni: andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

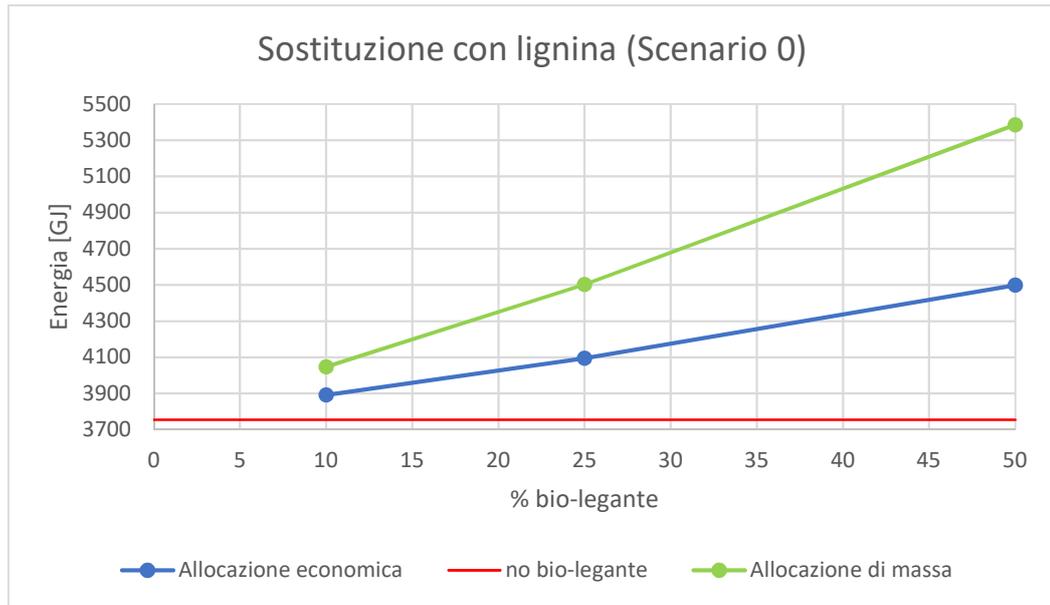


Figura 155 Confronto tra allocazioni: andamento dell'energia al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.

6.2.2 CASO STUDIO: "strada extraurbana italiana"

Tabella 35 Allocazione economica: output tool PaLATE (Scenario 0).

		ALLOCAZIONE ECONOMICA			
		0	10	25	50
	[%]				
CO _{2,eq}	[Mg]	0.99	0.985	0.961	0.937
E	[GJ]	14.05	14.44	14.82	15.91
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-0.54	-2.96	-5.37
	ΔE [%]	-	2.80	5.53	13.26

Tabella 36 Allocazione di massa: output tool PaLATE (Scenario 0).

		ALLOCAZIONE DI MASSA			
		0	10	25	50
	[%]				
CO _{2,eq}	[Mg]	0.99	0.984	0.960	0.936
E	[GJ]	14.05	15.01	16.17	18.75
	ΔCO _{2,eq} [%]	-	-0.57	-3.02	-5.49
	ΔE [%]	-	6.82	15.13	33.46

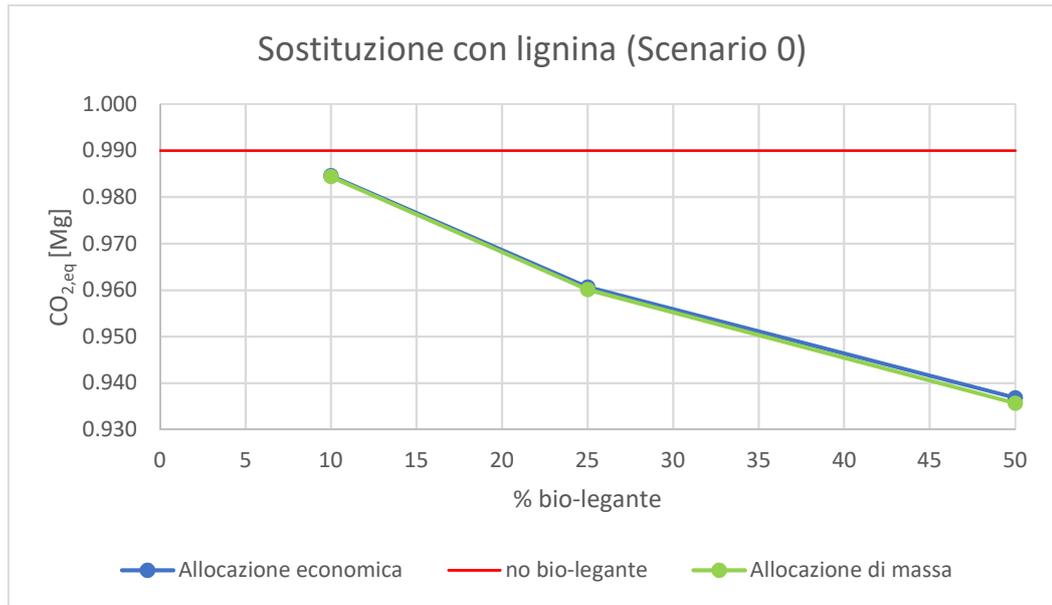


Figura 156 Confronto tra allocazioni: andamento della CO_{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legante.

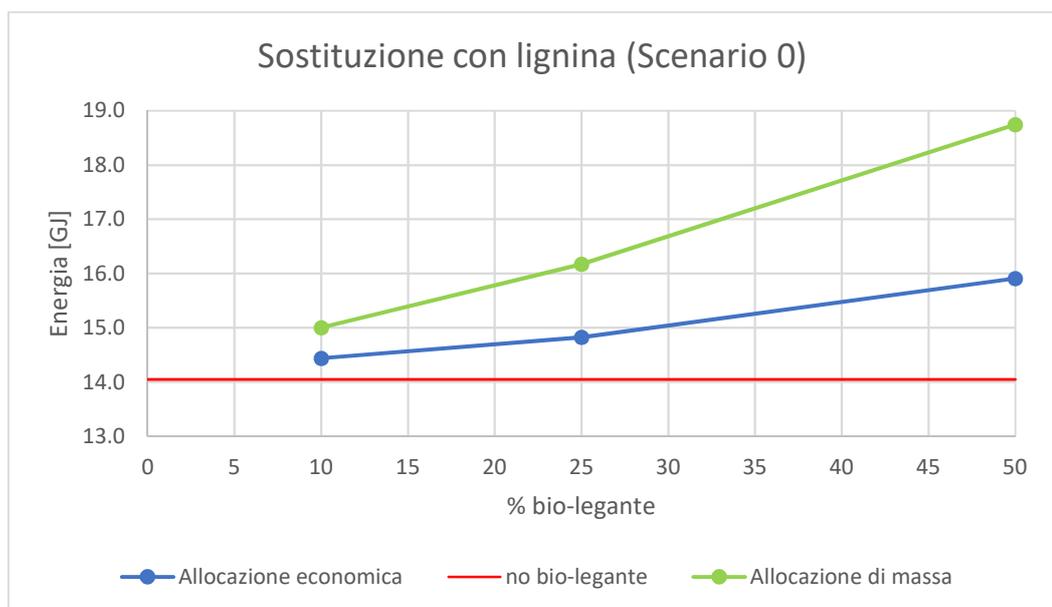


Figura 157 Confronto tra allocazioni: andamento dell'energia al variare delle differenti percentuali di bio-legante.

Come evidente dai grafici soprariportati, per entrambi i casi studi, si sono ottenuti andamenti simili ma, adesso, quello sul quale ci si vuole soffermare è l'effetto, che la diversa tipologia di allocazione selezionata, ha avuto sui diversi risultati.

Come si può osservare sia dai grafici che dalle tabelle, la variabilità in termini di anidride carbonica è molto bassa se si considerano le diverse variazioni percentuali. Infatti, si evince che l'analisi eseguita, tramite il tool PaLATE, risulta essere meno sensibile sull'output delle emissioni, in termini di CO₂, mentre risulta essere molto sensibile per quando riguarda i dati di inventario dell'energia. Analizzando le tabelle, infatti, si possono riscontrare differenze anche molto elevate, sintomo che la determinazione dei dati, da inserire nell'Inventario del Ciclo di Vita (LCI), risulti essere un parametro chiave per effettuare una buona e affidabile analisi.

In genere, però, per poter procedere alla corretta quantificazione degli impatti, il tool PaLATE richiede l'inserimento di alcuni parametri relativi all'unità di massa che, nel nostro caso, riguardano l'emissione di anidride carbonica e il consumo di energia. Essendo questi di fondamentale importanza ai fini dell'affidabilità e della robustezza dei risultati riferiti all'analisi, occorrerebbe avere la certezza sulla veridicità dei dati inseriti, non sempre, però, purtroppo, facilmente ricavabili in letteratura.

6.3 PaLATE: Diagrammi di Output

Altri risultati ricavabili dall'utilizzo del tool PaLATE, sono rilevabili dai diagrammi che lo stesso genera, nel foglio "*Env Results*", alla fine di ogni analisi. Per ciascun impatto considerato, oltre ai valori numerici collezionati in una tabella, viene realizzato un diagramma che tiene conto del medesimo, sia nella fase iniziale di costruzione sia in quella di manutenzione, considerando, infine, l'impatto cumulativo.

Si riportano di seguito, in modo rappresentativo, i diagrammi riferiti alle casistiche, già analizzate in precedenza con i vari calcoli relativi al primo e secondo caso studio, considerando la sostituzione con lignina al 50 %.

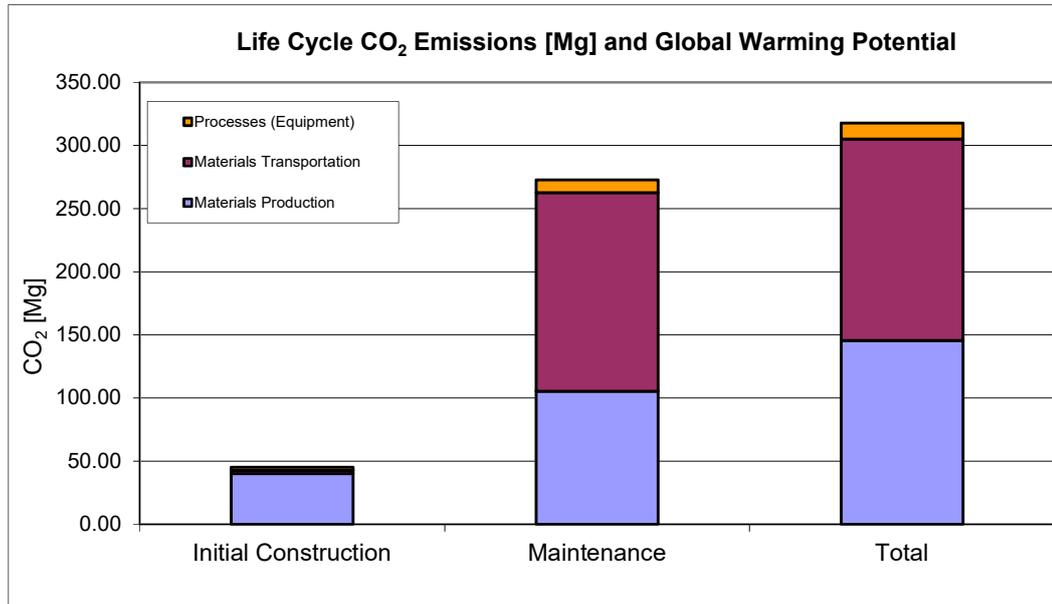


Figura 158 Primo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'emissione di CO₂ (Scenario 0).

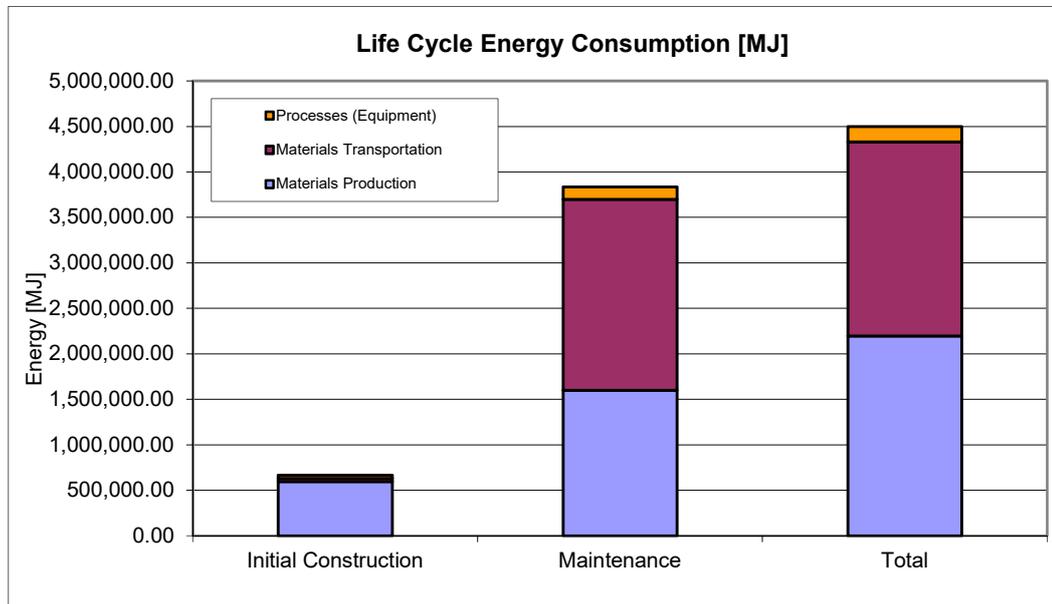


Figura 159 Primo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'energia (Scenario 0).

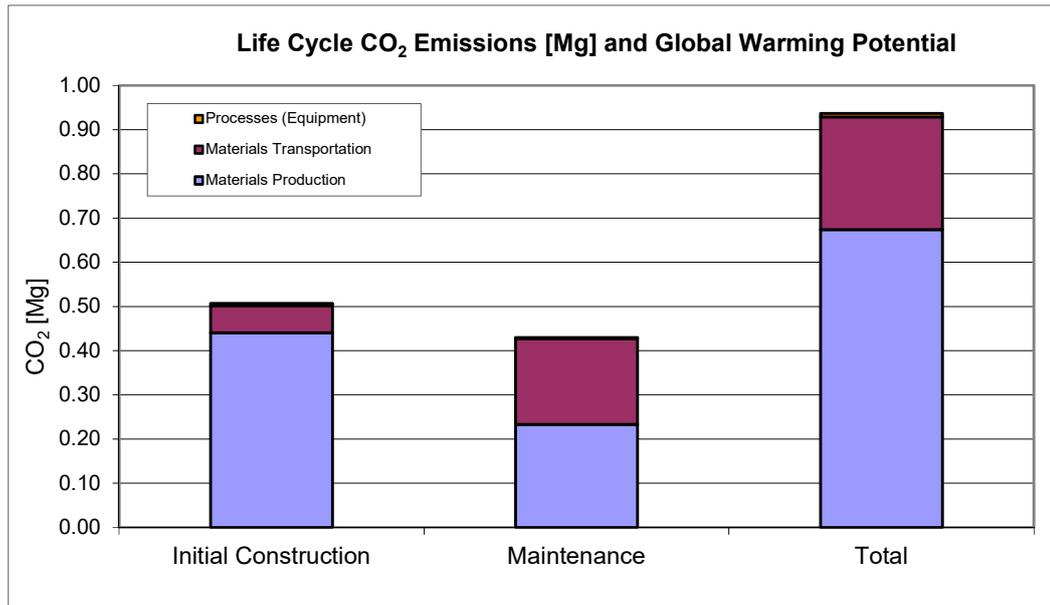


Figura 160 Secondo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'emissione di CO₂ (*Scenario 0*).

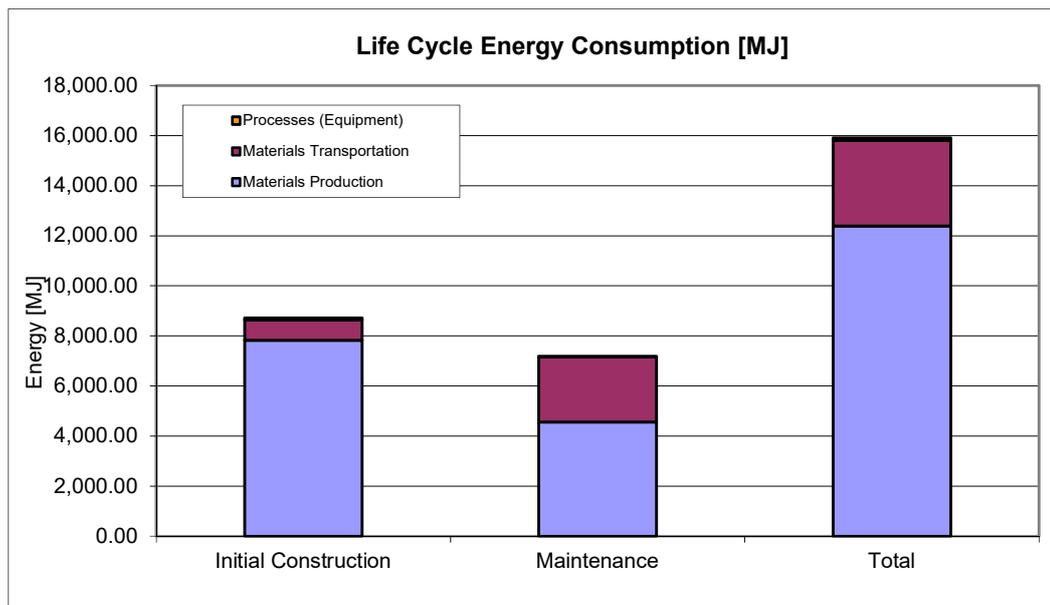


Figura 161 Secondo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'energia (*Scenario 0*).

L'utilità di questi digrammi sta nel fatto che gli stessi permettono di identificare la quota parte di impatto, associata a ciascuna fase di interesse: di trasporto dei materiali, della loro produzione, oltre a considerare la parte di impatto dovuta ai "processi", ovvero legati alle attrezzature utilizzate.

7. CONCLUSIONI

La crescente domanda di risorse esauribili, come il petrolio e suoi derivati (bitume), ha creato uno dei più grandi problemi dell'era moderna, da cui deriva la necessità di ricercare fonti alternative e rinnovabili che ne garantiscano la salvaguardia e la rigenerazione, nel tempo. Come noto, questa risorsa naturale è limitata, quindi gli studiosi hanno compreso che la vera domanda da porsi non è "se" ma "quando" terminerà la sua disponibilità, oltre a: "Esistono alternative al bitume da petrolio?" e "Cosa si conosce delle loro prestazioni?".

Nel settore delle infrastrutture di trasporto, infatti, la ricerca si sta sempre più orientando verso l'idea di sostituire parzialmente o totalmente il legante bituminoso con materiali provenienti da risorse rinnovabili, più sostenibili, anche, da un punto di vista dei costi ambientali.

A questo fine, negli ultimi decenni, vari ricercatori hanno lavorato alla formulazione di leganti alternativi, conosciuti come bio-leganti, concepiti come potenziali sostituti del bitume, poiché estratti da biomassa o da rifiuti organici. I primi bio-leganti, sviluppati per la sostituzione completa, sono stati quelli a base di oli vegetali e coprodotti del legno e quelli derivanti dall'estrazione di lipidi dalle microalghe.

Per quanto riguarda, invece, la sostituzione parziale, sono state studiate varie alternative, come: lignina, bio-oli derivanti dagli scarti di olio da cucina (WCO) oppure bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino.

Per l'utilizzo dei bio-leganti occorre, comunque, prima di eseguire un'analisi in termini di impatti ambientali, valutarne le caratteristiche di miscibilità, fisiche e di invecchiamento, oltre alle proprietà reologiche, necessariamente da confrontate con quelle del legante convenzionale. Per comprendere fino in fondo la reale fattibilità nell'utilizzo di questi nuovi leganti, è stata eseguita un'approfondita ricerca in letteratura per comprendere, anche, quali fossero le lavorazioni propedeutiche, da eseguire sulle biomasse, al fine di ottenere, poi, tramite miscelazione o meno, i rispettivi bio-leganti.

In generale, i materiali utilizzati per la sostituzione totale del legante convenzionale, ovvero quelli a base di oli vegetali e coprodotti del legno e quelli derivanti dall'estrazione di lipidi dalle microalghe, se dal punto di vista ambientale presentano innegabili vantaggi, da quello delle prestazioni, invece, si è evinto, dalle varie sperimentazioni, che questi bio-leganti presentano alcuni problemi di invecchiamento "precoce". Questi sono dovuti al processo di polimerizzazione, portando ad un eccessivo aumento del modulo di rigidità e ad una scarsa resistenza nei confronti della fatica (basse temperature), osservando la comparsa di fessure nella pavimentazione, anche dopo poco tempo dalla messa in opera. Questo sembrerebbe essere un problema, dal punto di vista funzionale e strutturale della pavimentazione, che porterebbe ad una vita utile della stessa, minore, rispetto a quelle convenzionali, traducendosi, in maniera pratica, in un aumento della frequenza delle attività di manutenzione, con conseguente lievitazione dei costi e dei relativi impatti ambientali, dovuti all'intero processo.

Per quanto riguarda, invece, i materiali utilizzati per la sostituzione parziale del legante convenzionale (lignina, bio-oli derivanti dagli scarti di olio da cucina, oppure bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino), si sono riscontrati, nel comportamento, sia similitudini che differenze.

Si è notato, per esempio, come l'incremento della quantità di lignina, comporti un effetto significativo sul comportamento reologico della miscela, mostrando un aumento della norma del modulo complesso, rispetto al legante di riferimento. Si è anche constatato, dalle varie analisi eseguite, che il metodo di estrazione, quindi la tipologia di lignina, ricopre un ruolo fondamentale sul comportamento visco-elastico della miscela e che, in generale, porti ad una minore temperatura di stesa richiesta, rispetto ad un bitume convenzionale, con conseguente riduzione di CO₂ dispersa nell'atmosfera, grande vantaggio dal punto di vista ambientale.

La presenza di WCO e di bio-olio derivante da letame suino migliora, invece, la duttilità ed il comportamento alle basse temperature, aumentando la resistenza nei confronti della comparsa di cricche e fessure nella pavimentazione, grazie ad una maggiore capacità di rilassamento.

Questo però, porta ad un peggioramento nel comportamento alle alte temperature, in quanto si ottengono leganti più propensi all'accumulo di deformazioni permanenti, con un valore di norma del modulo complesso minore, rispetto al legante di controllo, con conseguenti danni della pavimentazione.

Una volta indagate, tramite un'approfondita ricerca in letteratura, le principali caratteristiche dei singoli bio-modificanti, si è proceduto poi, tramite l'analisi di due differenti casi studio, ad effettuare la valutazione, quantitativa, tramite il tool PaLATE (analisi di Life Cycle Assessment - LCA), dei principali impatti (emissioni di anidride carbonica e quantità di energia utilizzata nell'intero processo). Questi sono stati valutati come derivanti dall'analisi di due pavimentazioni esistenti, ipotizzando la sostituzione del pacchetto bituminoso con bio-leganti, mettendoli a confronto, invece, con gli impatti di una, utilizzando un legante standard.

Si è deciso di perdere in esame, come fulcro di questo lavoro di tesi, l'argomento del Life Cycle Assessment, poiché oramai in qualsiasi progetto, la componente sostenibile e/o ambientale riveste uno dei criteri fondamentali di scelta, assumendo sempre più importanza in tutti quei campi, ingegneria civile inclusa, dove è richiesta una valutazione di sostenibilità del progetto, permettendo di valutare, così, i potenziali impatti già in fase di concezione e progettazione. In particolare, per effettuare le analisi, si sono considerate due tipologie di bio-modificanti (lignina e bio-olio derivante dalla lavorazione del letame suino), avendo come obiettivo quello di comprendere come la frequenza nelle attività di manutenzione possa influire sugli impatti ambientali. Queste sono state ipotizzate, dapprima, identiche a quelle del legante convenzionale, e poi intensificate, per tener conto delle differenti caratteristiche meccaniche e reologiche riscontrate, nei bio-leganti analizzati.

Dall'analisi dei risultati, ricavati dal tool PaLATE, si è compreso come la tipologia del bio-modificante, giochi un ruolo importante nella comprensione del fenomeno, avendo, per esempio, diagrammato gli andamenti degli impatti di anidride carbonica ed energia, al variare della percentuale di sostituzione, osservando variabilità nel comportamento. Ovviamente i risultati devono essere commentati tenendo sempre conto della difficoltà

nel reperire, in letteratura, i dati di inventario, riferiti ai vari processi che entrano in gioco nell'analisi, essendo gli stessi fortemente dipendenti dalla bontà di questi valori di input. Utilizzando il bio-olio derivante dal letame suino si sono osservati andamenti degli impatti di interesse, entrambi decrescenti all'aumentare della percentuale di sostituzione. Questi si sono dimostrati un vantaggio dal punto di vista ambientale, poiché inferiori al caso standard, anche se solamente nel caso in cui si ipotizzi un'identica pianificazione delle attività di manutenzione, ad oggi poco realistico. Questo vantaggio viene vanificato, però se si considera un'intensificazione delle anzidette attività, come riportato, graficamente, nel precedente capitolo. Per quanto attiene alla lignina, invece, si è notato un andamento, all'aumentare della percentuale di sostituzione, decrescente per quanto concerne le emissioni di anidride carbonica, crescente, però, per l'energia, quest'ultima sempre maggiore, rispetto al legante di riferimento.

Ad oggi, i bio-leganti presenterebbero un vantaggio ambientale, da noi auspicato, solamente nel caso in cui avessero anche caratteristiche prestazionali molto simili a quelle del legante convenzionale, qualità non verificate, però, sperimentalmente.

Se considerassimo le differenti caratteristiche, dovremmo, quindi, eseguire un maggior numero di interventi di manutenzione, facendo diventare, così, i bio-leganti non più vantaggiosi da un punto di vista ambientale. In un prossimo futuro, a parere della comunità scientifica, i bio-leganti risultano possedere caratteristiche molto promettenti, per giungere alla sostituzione di quelli convenzionali. Nonostante tutto, comunque, saranno necessari ulteriori studi e sperimentazioni, al fine di trovare la giusta combinazione tra il miglioramento delle prestazioni e la riduzione degli impatti ambientali. Per una migliore caratterizzazione di questi materiali, si potrebbe in futuro pensare ad un'implementazione di questo lavoro di tesi effettuando, ad esempio, una sperimentazione in laboratorio, per testare e validare i risultati ottenuti dai vari studi e provare a determinare, così, le condizioni ottimali, nei confronti della miscibilità o addirittura della sostituzione completa, situazione auspicabile. In futuro, si potrebbe inoltre sviluppare un'implementazione del tool PaLATE, che permetta di poter considerare in maniera diretta, la presenza di questi bio-modificanti, non dovendoli, così, più inserire in modo indiretto, come avvenuto in questo lavoro.

APPENDICI

APPENDICE I: L'estrattore Soxhlet

L'estrattore Soxhlet è un apparecchio capace di separare, a partire da una miscela solida, in modo continuo, i componenti poco solubili da quelli insolubili, usando un solvente volatile. Ancora oggi, questa attrezzatura, viene utilizzata per estrarre i lipidi, in quanto permette un'estrazione quantitativa, utilizzando una quantità limitata di solvente, riciclato automaticamente.

L'estrattore è costituito da 3 parti: il pallone contenente il solvente (a), l'estrattore vero e proprio (b) ed infine, il condensatore (c), raffreddato ad acqua.

Inoltre, nell'estrattore (b), un braccio laterale (1) permette il passaggio dei vapori di solvente al condensatore, mentre il sifone (2) permette il periodico svuotamento dell'estrattore. Il materiale solido contenente il composto da estrarre, viene posto in un ditale (3), inserito nella camera principale dell'estrattore.

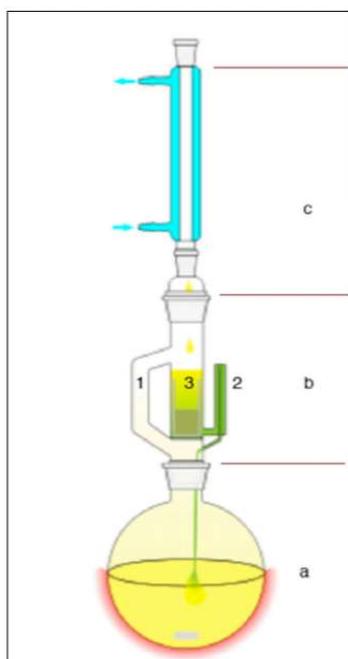


Figura 162 Schema dell'estrattore Soxhlet.

Il funzionamento è il seguente: il solvente viene riscaldato, i vapori dello stesso raggiungono il condensatore i quali rifluiscono nel ditale, che lentamente si riempie del solvente caldo. Quando la camera del ditale è quasi piena, questa è automaticamente vuotata dal sifone laterale ed il solvente, arricchito del composto da separare, ricade nel pallone sottostante. Questo ciclo viene ripetuto per numerose volte, anche ore o giorni ed alla fine, le sostanze estratte (olio con sembianze viscosi, bio-legante), si concentrano nel pallone di distillazione.

APPENDICE II: La liquefazione idrotermale (HTL)

La Liquefazione Idrotermale (*Hydro Thermal Liquefaction* - HTL) (Kiran Kumar et al., 2018) è una particolare tipologia di Trattamento Idrotermale (*Hydro Thermal Processing* - HTP), attraverso la quale, la biomassa viene convertita in un bio-olio, utilizzando acqua a temperature e pressioni sub- e supercritiche⁴². Generalmente il range di temperatura e di pressione, riferite ad una generica HTL, sono rispettivamente 250-400 °C e 7-30 MPa, sufficienti a mantenere l'acqua allo stato liquido. Il prodotto primario dell'HTL consiste in un liquido organico nero, detto bio-oil (BO), mentre i principali sottoprodotti sono: o residui solidi e prodotti acquosi, oppure prodotti e gas solubili in acqua.

Il principale vantaggio della liquefazione idrotermale sta nel fatto che la stessa, consenta di trattare sia biomassa secca che umida, senza eseguire, così, una pre-essiccazione della stessa. Infatti, possedendo la biomassa algale, un alto contenuto di umidità, il processo di essiccazione richiederebbe una grande quantità di energia termica, a causa dell'elevato calore di vaporizzazione dell'acqua (Saqib Sohail et al., 2011) ed inoltre, rispetto ad altri metodi, la produzione di BOs da parte dell'HTL provoca emissioni di SO_x prossime allo zero, a vantaggio del beneficio ambientale (Douglas et al., 2015). Molti studi di HTL sono stati condotti utilizzando solventi chimici al posto dell'acqua, come mezzo di reazione, in quanto l'utilizzo di quest'ultima, presenta diversi vantaggi rispetto alle sostanze chimiche, essendo: ecologicamente sicura, non tossica, economica, facilmente disponibile e rispettosa dell'ambiente.

⁴² Un fluido si dice essere in uno stato supercritico quando si trova in condizioni di temperatura e di pressione superiori a quelle critiche. In queste condizioni le proprietà del fluido sono in parte analoghe a quelle di un liquido (ad esempio la densità) ed in parte simili a quelle di un gas (ad esempio la viscosità). L'acqua supercritica è acqua, ma in uno stato fisico particolare. Tutti conosciamo l'acqua in tre stati fisici ma lo stato supercritico, invece, è quella particolare condizione che si crea quando l'acqua viene portata alla temperatura di 374 °C e alla pressione di 22.1 MPa. Allo stato supercritico qualunque composto modifica notevolmente le sue caratteristiche. L'acqua, in particolare, vede aumentare esponenzialmente la solubilità dei composti organici, ovvero composti che contengono carbonio, e quest'ultima caratteristica permette di sciogliere in acqua qualsiasi tipo di composto organico.

<http://5rzerosprechi.blogspot.com/2017/03/cosa-e-lacqua-supercritica.html>

In condizioni normali, come noto, l'acqua non reagisce con qualsiasi composto organico ma, nel processo HTL, le proprietà di reazione di quest'ultima variano con l'aumento della temperatura che, risulta quindi essere, la forza trainante in questo processo, fungendo sia da catalizzatore che da reagente. La pressione, il tempo di reazione ed il rapporto biomassa/acqua sono, invece, i parametri più efficaci in un processo di liquefazione idrotermale, in quanto svolgono ruoli chiave nel determinare la quantità e la qualità dei prodotti ottenuti.

Pertanto, l'obiettivo delle ricerche in questo campo è quello di valutare ed esplorare, sperimentalmente, l'effetto della liquefazione idrotermale sulle microalghe, con diversi range di temperatura e pressione. Affinché il processo HTL sia energeticamente efficiente dal punto di vista economico, non è raccomandabile l'utilizzo di un'elevata quantità di acqua, in quanto richiederebbe il consumo di più energia con la conseguente lievitazione dei costi, relativi al trattamento delle acque reflue. In letteratura, sono presenti molti articoli riguardanti l'HTL delle microalghe, ma questi ultimi, sono per lo più focalizzati sulle potenzialità di questo processo per la produzione di bio-carburanti.

Invece, un gruppo di studiosi francesi (Audo et al., 2013; Audo et al., 2014; Chailleux et al., 2012; Chailleux et al., 2015) ha evidenziato l'elevato potenziale dell'HTL, anche, ai fini della produzione di bio-leganti stradali, dimostrando che il comportamento reologico del materiale idrofobico isolato, è fortemente influenzato dalle condizioni operative di input dell'HTL, osservando, per esempio, proprietà viscoelastiche simili a quelle del bitume.

APPENDICE III: Risultati caso studio eseguito da Gosselink et al. (2019)

Results of binder compositions in Stone Mastic asphalt (1)

Lignin type name	Bitumen penetration range + percentages by weight with respect to binder composition	Lynpave oil + percentage in binder composition	Dry Strength (MPa)	Wet Strength (MPa)	Ratio ITRS (%)
Soda mixed straw / Sarkanda grass (P1000)	40/60 pen grade 47,2 (w/w) % bitumen 51.3 (w/w) % Lignin	1.5 (w/w) %	1.78	1.51	85
Kraft softwood (Indulin AT)	40/60 pen grade 47,2 (w/w) % bitumen 51.3 (w/w) % Lignin	1.5 (w/w) %	1.40	1.22	87
Hydrolysis straw 1	40/60 pen grade 47,2 (w/w) % bitumen 51.3 (w/w) % Lignin	1.5 (w/w) %	1.31	1.13	86
Hydrolysis straw 2	40/60 pen grade 47,2 (w/w) % bitumen 51.3 (w/w) % Lignin	1.5 (w/w) %	1.70	1.41	83
Hydrolysis poplar	40/60 pen grade 47,2 (w/w) % bitumen 51.3 (w/w) % Lignin	1.5 (w/w) %	1.26	0.48	38
Bitumen (control)	70/100 pen grade 100 (w/w) %	0 (w/w) %	1.27	1.21	95

Results of binder compositions in Porous asphalt

Lignin type name	Bitumen penetration range + percentages by weight with respect to binder composition	Lynpave oil + percentage in binder composition	Dry Strength (MPa)	Wet Strength (MPa)	Ratio ITRS (%)
Soda mixed straw / Sarkanda grass (P1000)	70/100 pen grade 58 (w/w) % bitumen 42 (w/w) % Lignin	0 (w/w) %	1.34	1.09	81
Kraft softwood (Indulin AT)	70/100 pen grade 58 (w/w) % bitumen 42 (w/w) % Lignin	0 (w/w) %	1.06	0.94	89
Hydrolysis straw 1	70/100 pen grade 58 (w/w) % bitumen 42 (w/w) % Lignin	0 (w/w) %	0.73	0.45	62
Hydrolysis straw 2	70/100 pen grade 58 (w/w) % bitumen 42 (w/w) % Lignin	0 (w/w) %	0.92	0.72	78
Hydrolysis poplar	70/100 pen grade 58 (w/w) % bitumen 42 (w/w) % Lignin	0 (w/w) %	0.62	0.34	54
Bitumen (control)	70/100 pen grade 100 (w/w) %	0 (w/w) %	1.06	0.85	80

APPENDICE IV: La transesterificazione

La transesterificazione (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016) è un tipo di reazione chimica, mediante la quale l'olio di scarto da cucina (WCO) viene fatto reagire con del metanolo (CH_3OH) e catalizzato con dell'idrossido di sodio (NaOH), comunemente usato come catalizzatore alcalino, possedendo lo stesso, numerosi vantaggi, come:

- 1) una bassa temperatura di reazione;
- 2) una buona disponibilità in commercio ed un basso costo;
- 3) assicura una produzione ad alto rendimento in tempi, relativamente, bassi.

In questa reazione, invece, il metanolo è usato, più frequentemente, come fonte di alcool, essendo caratterizzato da un basso costo, dalla veloce reazione con i trigliceridi e dalla sua facile dissoluzione in presenza di catalizzatori alcalini.

Nella transesterificazione, devono essere determinati diversi parametri, come il tempo di reazione, il rapporto di volume tra metanolo e olio (CH_3OH :olio) ed infine la concentrazione del catalizzatore di NaOH (%). Questi fattori, infatti, influenzano la produzione e l'efficienza di conversione del prodotto finale. Ricerche precedenti hanno stabilito che i parametri ottimali sono: un rapporto di volume (CH_3OH :olio) di 6:1, tempo di reazione pari ad un'ora, temperatura variabile dai 60 °C ai 70 °C e una concentrazione del catalizzatore pari all'1 % del volume di olio utilizzato.

Nello studio preso a riferimento (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016), sono stati misurati e miscelati insieme, 600 mL di metanolo ed 1 mL di idrossido di sodio. Alla soluzione ottenuta, sono stati aggiunti, poi, 100 mL di WCO e successivamente riscaldata ad una temperatura di 65 °C, per una durata di circa un'ora. La reazione, durata complessivamente 24 ore, è stata considerata conclusa quando si è ottenuta la separazione tra i due principali prodotti finali, ovvero:

- olio di scarto trattato, utilizzato, poi, come modificatore del bitume di base;
- glicerolo ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$).

APPENDICE V: Caso Studio: Viadotto “Torre del Colle” (Tisberger Ibañez, 2020)

FASE 1: Design

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
Wearing Course	15.25	0.24	1.97	117
Binder Course	15.25	0.24	2.76	165
Wearing Course 3				
Subbase 1				
Subbase 2				
Subbase 3				
Subbase 4				
Total			4.73	282

Embankment and Shoulder Volume [yd³]:

Period of Analysis [yrs] (40 yrs or less)	20
--	----

Figura 163 Dati di Input del foglio “Design” di PaLATE (Sistema di misura USC).

FASE 2: Costruzione InizialeSTRATO DI USURA (wearing course)

	SETACCI [mm]	0,075	0,18	0,4	2	-	-	-	-	-	-	-	% CURVA
	CRIVELLI [mm]					5	10	15	20	25	30	40	
Aggregati		<i>passante in %</i>											
Sabbione		2,6	7,5	16,5	55,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	42
3/8		0,0	0,0	1,0	8,2	49,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	18
8/18		0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	27,0	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	33
18/30		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	31,0	99,0	100,0	100,0	0
-		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
filler		90,2	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7

Figura 164 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di usura.

- Percentuale di bitume⁴³ nel conglomerato (senza polimero): 5.21 %;
- Densità del bitume: 1.025 g/cm³;
- Densità del polimero: 0.50 g/cm³;
- Percentuale di polimero utilizzata: 0.30 %;
- Massa volumica del campione (MV): 2.360 ton/m³;
- Percentuale dei vuoti (v): 5.39 %;
- P_b: percentuale di bitume nel conglomerato (con polimero)⁴⁴: 5.51 %.

Per prima cosa si calcola un valore medio di densità, considerando sia il bitume che il polimero, come:

$$\gamma_b = \frac{94.56 \%}{100} \cdot 1.025 + \frac{5.44 \%}{100} \cdot 0.50 = 0.996 \frac{g}{cm^3} = 0.84 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

Si procede, adesso, al calcolo dei volumi, partendo da quello del bitume V_b(%):

$$V_b(\%) = \frac{P_b \cdot MV}{\gamma_b} = \frac{5.51 \cdot 2360 \text{ kg/m}^3}{996 \text{ kg/m}^3} = 13.05 \%$$

Una volta nota la percentuale di bitume si ricava, per differenza, quella degli aggregati V_G(%), come:

$$V_G(\%) = 100 \% - V_b(\%) - v(\%) = 100 \% - 13.05 \% - 5.39 \% = 81.56 \%$$

Si procede, poi, alla valutazione della densità degli aggregati γ_G:

$$V_G(\%) = \frac{100 - P_b}{\gamma_G} \cdot MV \quad \rightarrow \quad \gamma_G = \frac{100 - P_b}{V_G(\%)} \cdot MV$$

ottenendo:

$$\gamma_G = \frac{100 - 5.51}{81.56} \cdot 2360 \frac{kg}{m^3} = 2734.15 \frac{kg}{m^3} = 2.30 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

⁴³ Per bitume modificato si considera "polimero + bitume". Sitalfa S.p.A. non utilizza un bitume modificato tradizionale, ma il polimero viene inserito nell'impasto contemporaneamente agli aggregati ed il bitume utilizzato è 50/70.

⁴⁴ Il valore di 5.21 % rappresenta il 94.56 %, rispetto al 5.51 %.

Infine, per valutare i volumi, si calcolano le masse, degli aggregati M_G e del bitume M_b , considerando però anche la massa M , in condizioni compattate:

$$V_{usura} = 4.65 \text{ m} \cdot 382 \text{ m} \cdot 0.05 \text{ m} = 89 \text{ m}^3 = 117 \text{ yd}^3$$

$$M = V_{usura} \cdot MV = 89 \text{ m}^3 \cdot 2360 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 210040 \text{ kg}$$

$$M_G = \frac{100 - P_b}{100} \cdot M = \frac{100 - 5.51}{100} \cdot 210040 = 198467 \text{ kg} = 219 \text{ short ton}$$

$$M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M = \frac{5.51}{100} \cdot 210040 = 11573 \text{ kg} = 13 \text{ short ton}$$

Si valutano, infine, i volumi di aggregati e di bitume che vanno inseriti all'interno di PaLATE:

$$V_{aggregati} = \frac{M_G}{\gamma_G} = \frac{198467}{2734.15} = 72.59 \text{ m}^3 = 94.94 \text{ yd}^3$$

$$V_{bitume} = \frac{M_b}{\gamma_b} = \frac{11573}{996} = 11.61 \text{ m}^3 = 15.19 \text{ yd}^3$$

Si può osservare come la somma di questi due volumi non sia pari al volume dello strato di usura (89 m^3) ma risulta essere inferiore (84.20 m^3), in quanto va tenuto in conto, anche, la presenza dei vuoti, all'interno del conglomerato. In PaLATE si sono modificati i valori di densità sia degli aggregati che del bitume, nel foglio "Densities".

STRATO DI COLLEGAMENTO (binder course)

SETACCI [mm]	0,075	0,18	0,4	2	-	-	-	-	-	-	-	%
CRIVELLI [mm]					5	10	15	25	30	40	50	CURVA
Aggregati	passante in %											
Sabbione	2,6	7,5	16,5	55,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	37
3/8	0,0	0,0	1,0	8,2	49,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	20
8/18	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	27,0	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	38
18/30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	83,0	99,0	100,0	100,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
filler	90,2	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5

Figura 165 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di collegamento.

- Percentuale di bitume⁴⁵ nel conglomerato (senza polimero): 4.76 %;
- Densità del bitume: 1.025 g/cm³;
- Densità del polimero: 0.50 g/cm³;
- Percentuale di polimero utilizzata: 0.30 %;
- Massa volumica del campione (MV): 2.373 ton/m³;
- Percentuale dei vuoti (v): 6.10 %;
- P_b: percentuale di bitume nel conglomerato (con polimero)⁴⁶: 5.06 %.

Per prima cosa si calcola un valore medio di densità, considerando sia il bitume che il polimero, come:

$$\gamma_b = \frac{94.07\%}{100} \cdot 1.025 + \frac{5.93\%}{100} \cdot 0.50 = 0.994 \frac{g}{cm^3} = 0.84 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

Si procede, adesso, al calcolo dei volumi, partendo da quello del bitume V_b(%):

$$V_b(\%) = \frac{P_b \cdot MV}{\gamma_b} = \frac{5.06 \cdot 2373\ kg/m^3}{994\ kg/m^3} = 12.08\%$$

Una volta nota la percentuale di bitume, si ricava per differenza quella degli aggregati V_G(%), come:

$$V_G(\%) = 100\% - V_b(\%) - v(\%) = 100\% - 12.08\% - 6.10\% = 81.82\%$$

Si procede, poi, alla valutazione della densità degli aggregati γ_G:

$$V_G(\%) = \frac{100 - P_b}{\gamma_G} \cdot MV \quad \rightarrow \quad \gamma_G = \frac{100 - P_b}{V_G(\%)} \cdot MV$$

ottenendo:

$$\gamma_G = \frac{100 - 5.06}{81.82} \cdot 2373 \frac{kg}{m^3} = 2753.56 \frac{kg}{m^3} = 2.32 \frac{short\ ton}{yd^3}$$

⁴⁵ Per bitume modificato si considera "polimero + bitume". Sitalfa S.p.A. non utilizza un bitume modificato tradizionale, ma il polimero viene inserito nell'impasto contemporaneamente agli aggregati ed il bitume utilizzato è 50/70.

⁴⁶ Il valore di 4.76 % rappresenta il 94.07 %, rispetto al 5.06 %.

Infine, per valutare i volumi, si calcolano le masse, degli aggregati M_G e del bitume M_b , valutando però anche la massa M , in condizioni compattate:

$$V_{collegamento} = 4.65 \text{ m} \cdot 382 \text{ m} \cdot 0.07 \text{ m} = 124 \text{ m}^3 = 165 \text{ yd}^3$$

$$M = V_{collegamento} \cdot MV = 124 \text{ m}^3 \cdot 2373 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 294252 \text{ kg}$$

$$M_G = \frac{100 - P_b}{100} \cdot M = \frac{100 - 5.06}{100} \cdot 294252 = 279363 \text{ kg} = 308 \text{ short ton}$$

$$M_b = \frac{P_b}{100} \cdot M = \frac{5.06}{100} \cdot 294252 = 14889 \text{ kg} = 16 \text{ short ton}$$

Si valutano di seguito, i volumi di aggregati e di bitume che vanno inseriti all'interno di PaLATE:

$$V_{aggregati} = \frac{M_G}{\gamma_G} = \frac{279363}{2753.56} = 101.46 \text{ m}^3 = 132.70 \text{ yd}^3$$

$$V_{bitume} = \frac{M_b}{\gamma_b} = \frac{14889}{994} = 14.98 \text{ m}^3 = 19.59 \text{ yd}^3$$

Si può osservare come la somma di questi due volumi non sia pari al volume dello strato di collegamento (124 m^3) ma risulta essere inferiore (116.44 m^3), in quanto va tenuto in conto, anche, la presenza dei vuoti, all'interno del conglomerato. In PaLATE si sono modificati i valori di densità sia degli aggregati che del bitume, nel foglio "Densities".

DISTANZA DA CAVA ALL'IMPIANTO DI MISCELAZIONE

- Aggregati

Gli aggregati vengono estratti dal fiume Dora Riparia, distante 3 km dallo stabilimento Sitalfa, dove è situato l'impianto di miscelazione, mentre il filler è fornito da una cava, NICEM S.r.l. di Bergamo, che dista 280 km dallo stabilimento. In questo caso, la distanza di trasporto unidirezionale è stata individuata eseguendo una proporzione, in base alle percentuali di materiali utilizzati, per la preparazione del conglomerato:

STRATO DI USURA

Nello strato di usura, dalla curva granulometrica, si osserva la presenza del filler per il 7 %, quindi:

$$dist = 0.93 \cdot 3 \text{ km} + 0.07 \cdot 28 \text{ km} = 22.39 \text{ km} = 13.92 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il dump truck.

STRATO DI COLLEGAMENTO

Nello strato di collegamento, dalla curva granulometrica, si osserva la presenza del filler per il 5 % e quindi:

$$dist = 0.95 \cdot 3 \text{ km} + 0.05 \cdot 28 \text{ km} = 16.85 \text{ km} = 10.47 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il dump truck.

- Bitume

Il bitume è fornito dalla raffineria Iplom S.p.A. di Genova, distante 230 km dallo stabilimento Sitalfa, mentre il polimero è fornito dalla Iterchimica S.r.l. di Bergamo, che dista 250 km.

STRATO DI USURA

La miscela bituminosa, come già detto, contiene il 5.21 % di bitume e lo 0.30 % di polimero e riferendosi al 100 % si ottiene circa il 95 % di bitume e il 5 % di polimero.

$$dist = 0.95 \cdot 230 \text{ km} + 0.05 \cdot 250 \text{ km} = 231 \text{ km} = 143.57 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il tanker truck.

STRATO DI COLLEGAMENTO

La miscela bituminosa, come già detto, contiene il 4.76 % di bitume e lo 0.3 % di polimero e riferendosi al 100 % si ottiene circa il 94 % di bitume e il 6 % di polimero.

$$dist = 0.94 \cdot 230 \text{ km} + 0.06 \cdot 250 \text{ km} = 231.2 \text{ km} = 143.69 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, nel caso in cui vengano considerati differenti materiali, in PaLATE va inserito quello “predominante”, che in questo caso corrisponde a quello riferito al trasporto degli aggregati, ovvero il tanker truck.

DISTANZA DA IMPIANTO DI MISCELAZIONE AL LUOGO DI LAVORO

Questa distanza prende in considerazione il trasporto della miscela dall’impianto Sitalfa fino al sito di lavorazione e prendendo a riferimento i dati, forniti dall’azienda, si sono valutate le seguenti distanze:

- Distanza dallo stabilimento Sitalfa al sito di lavorazione:

$$dist = 57 \text{ km} = 35.42 \text{ mi}$$

- Distanza dal sito di lavorazione allo stabilimento Sitalfa:

$$dist = 52 \text{ km} = 32.31 \text{ mi}$$

La differenza di distanza sta nel fatto che quando un mezzo lascia lo stabilimento, questo deve eseguire il cambio di direzione, attraverso un loop, mentre quando il mezzo rientra, questo non è più necessario.

Per l’analisi si è deciso di eseguire, quindi, una media:

$$dist = \frac{57 + 52}{2} = 54.5 \text{ km} = 33.87 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo, come già detto, va preso in esame quello “predominante”, che in questo caso risulta essere il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	94.94	0		13.92	dump truck		
		Bitumen	15.19			143.57	tanker truck		
		Cement		0		0	barge		
		Concrete Additives		0		0	0	tanker truck	
		RAP	0	0		0	0	dump truck	
		FRAP	0	0		0	0	dump truck	
		RAS	0	0		0	0	dump truck	
		RCA	0	0		0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	0	0		0	0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	0	0		0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	0	0		0	0	dump truck	
		Foundry Sand	0	0		0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	0	0		0	0	dump truck	
		Glass Cullet	0	0		0	0	dump truck	
		Water	0.84			0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24			0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.24	110.13				33.87	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03			0		0	mixing truck
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0			0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0		0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0		0	dump truck		

Figura 166 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation			
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	132.70	0		10.47	dump truck		
		Bitumen	19.59			143.69	tanker truck		
		Cement		0		0	0	cement truck	
		Concrete Additives		0		0	0	tanker truck	
		RAP	0	0		0	0	dump truck	
		FRAP	0	0		0	0	dump truck	
		RAS	0	0		0	0	dump truck	
		RCA	0	0		0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	0	0		0	0	rail	
		Coal Bottom Ash	0	0		0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	0	0		0	0	dump truck	
		Foundry Sand	0	0		0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	0	0		0	0	dump truck	
		Glass Cullet	0	0		0	0	dump truck	
		Water	0.84			0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24			0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	2.24	152.29				33.87	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03			0		0	mixing truck
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0			0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0		0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0		0	dump truck		

Figura 167 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

FASE 3: Manutenzione

STRATO DI USURA: FDR

$$V_{aggregati} = 6 \cdot 72.59 \text{ m}^3 = 435.53 \text{ m}^3 = 569.65 \text{ yd}^3$$

$$V_{bitume} = 6 \cdot 11.61 \text{ m}^3 = 69.69 \text{ m}^3 = 91.15 \text{ yd}^3$$

Il volume totale, derivante dal processo FDR è pari a:

$$V_{FDR} = 569.65 + 91.15 = 660.80 \text{ m}^3 = 660.80 \text{ yd}^3$$

PATCHING

Come specificato da Sitalfa S.p.A., ogni anno viene eseguita la “rattoppatura” su l’1.8 % dello strato di usura. Considerando, quindi, il volume dello strato di usura, pari a 89 m³, questo si valuta in circa 1.6 m³. Eseguendo, poi, una semplice equivalenza si possono ricavare i valori, in termini di volumi, sia degli aggregati che del bitume, necessari per l’esecuzione dei lavori:

Aggregati

$$x : 1.6 \text{ m}^3 = 72.59 \text{ m}^3 : 89 \text{ m}^3$$

ottenendo un volume di aggregati, pari a:

$$V_{aggr_path} = 1.31 \text{ m}^3 = 1.71 \text{ yd}^3$$

Bitume

$$x : 1.6 \text{ m}^3 = 11.61 \text{ m}^3 : 89 \text{ m}^3$$

ottenendo un volume di bitume, pari a:

$$V_{bit_path} = 0.21 \text{ m}^3 = 0.27 \text{ yd}^3$$

Questo è riferito ad un'unica lavorazione, durante l'intero periodo di analisi, però, di queste ne verranno eseguite tredici, ottenendo:

$$V_{tot_aggr_path} = 13 \cdot 1.31 \text{ m}^3 = 16.99 \text{ m}^3 = 22.22 \text{ yd}^3$$

$$V_{tot_bit_path} = 13 \cdot 0.21 \text{ m}^3 = 2.72 \text{ m}^3 = 3.55 \text{ yd}^3$$

$$V_{tot_path} = 22.22 \text{ yd}^3 + 3.55 \text{ yd}^3 = 25.77 \text{ yd}^3$$

Considerando entrambe le lavorazioni, si ottengono i seguenti valori di volume riferiti agli aggregati e al bitume utilizzati:

$$V_{aggr} = 569.65 \text{ yd}^3 + 22.22 \text{ yd}^3 = 591.87 \text{ yd}^3$$

$$V_{bit} = 91.15 \text{ yd}^3 + 3.55 \text{ yd}^3 = 94.70 \text{ yd}^3$$

Nell'ultimo anno, il ventesimo, andranno valutati i volumi di materiale che dovranno essere trasportati in discarica, ottenendo:

STRATO DI USURA

$$V_{land_fill} = V_{FDR} + V_{tot_pat} + V_{demol} = 660.80 + 25.77 + 117 = 803.57 \text{ yd}^3$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$V_{landfill} = V_{demol} = 165 \text{ yd}^3$$

Per quanto riguarda le distanze e le modalità di trasporto, si eseguono le medesime considerazioni effettuate, in precedenza, per i materiali. Il calcolo delle distanze di trasporto viene ripetuto ogni volta che si esegue un intervento, quindi tredici volte per il patching e sei volte per l'FDR, oppure, nel caso di trasporto in discarica, venti volte, considerando il patching e l'FDR. Inoltre, la distanza dal cantiere allo stabilimento nel quale avverrà lo smaltimento finale, sito speciale che l'azienda Sitalfa possiede a Bruzolo, è pari a 16 km.

STRATO DI USURA

$$dist_{aggr} = (6 + 13) \cdot 22.39 \text{ km} = 425.41 \text{ km} = 264.48 \text{ mi}$$

$$dist_{bit} = (6 + 13) \cdot 231 \text{ km} = 4389 \text{ km} = 2727.83 \text{ mi}$$

$$dist_{asphalt \text{ mix to site}} = (6 + 13) \cdot 54.5 \text{ km} = 1035.5 \text{ km} = 643.53 \text{ mi}$$

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 20 \cdot 16 \text{ km} = 320 \text{ km} = 198.88 \text{ mi}$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 1 \cdot 16 \text{ km} = 16 \text{ km} = 9.94 \text{ mi}$$

Il mezzo di trasporto considerato è stato sempre il medesimo, il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Repaving	Repaving	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Reconstruction	Reconstruction				
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	2.30	591.87	0			264.48	dump truck	
		Bitumen	0.84	94.70				2727.83	tanker truck	
		Cement	1.27		0			0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck	
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	tanker truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck	
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.24	686.57					643.53	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Patching	2.24		25.77	0						
Microsurfacing	1.23		0	0						
Crack Sealing	0.84		0	0						
Whitetopping	2.03			0						
Rubblization	1.95			0						
Full-depth Reclamation	1.83	660.80	0							
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	803.57				196.88	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck		

Figura 168 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Repaving	Repaving	Subbase	Embankment	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Reconstruction	Reconstruction				
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	2.32	0	0			0	dump truck	
		Bitumen	0.84	0				0	tanker truck	
		Cement	1.27		0			0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck	
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	rail	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck	
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0				0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	2.2365	0					0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0				0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0					
CIR	1.83		0							
Rubblization	1.95			0						
Full-depth Reclamation	1.83			0						
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	165				9.94	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck		

Figura 169 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

FASE 4: Attrezzature

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Concrete Paving	Slipform paver	Wirtgen SP 250	106 hp	564 tons/h	19.7 l/h	diesel
	Texture curing machine	Gomaco TIC 400	70 hp	187 tons/h	20.2 l/h	diesel
Asphalt Paving	Paver	other	173 hp	30 tons/h	46.0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	none	0 hp	1 tons/h	0.0 l/h	diesel
	Tandem roller	other	82 hp	341 tons/h	18.0 l/h	diesel
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Wirtgen 2200 CR	800 hp	1,713 tons/h	150.00 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersolrand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	other	550 hp	2,000 tons/h	110.0 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	other	82 hp	341 tons/h	18.0 l/h	diesel
Hot In Place Recycling	Heating machine	Wirtgen HM4500	49 hp	256 tons/h	9.1 l/h	diesel
	Asphalt mixer	Wirtgen 4500	295 hp	208 tons/h	55.0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersolrand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Rubbilization	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1,832 tons/h	37.6 l/h	diesel
Milling	Milling machine	Wirtgen W2200	875 hp	1,100 tons/h	156.2 l/h	diesel
Grinding	Grinding machine	CBI Magnum Force Shingle	1050 hp	115 tons/h	161.1 l/h	diesel
Concrete Demolition	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 644E	160 hp	490 tons/h	40.1 l/h	diesel
Crushing Plant	Excavator	John Deere 690E	131 hp	225 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 624E	135 hp	225 tons/h	35.3 l/h	diesel
	Dozer	Caterpillar D6N	285 hp	225 tons/h	71.4 l/h	diesel
	Generator	Caterpillar 3406C TA	519 hp	225 tons/h	98.4 l/h	diesel
Excavation, placing and compaction	Excavator	John Deere 690E	131 hp	315 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	174 hp	1,832 tons/h	27.6 l/h	diesel
Tire Recycling	Shredder + Granulator + Classifier + Aspirator System	Wendt Corporation	630 hp	3.00 tons/h	104.73 kWh/ton	105 hp
Glass Recycling	Hopper + Conveyor + Shredder System	Andela GP-05 Pulverizer	10 hp	1.00 tons/h	7.46 kWh/ton	17 hp
HMA Production	asphalt mixer	other		278.00 tons/h		oil

Figura 170 Tabella delle attrezzature utilizzate – foglio “Attrezzature” del tool PaLATE.

Dettagli Attrezzatura

type	brand/model	engine model	hp	Productivity (non-standard units)	Conversion Factors	Productivity	fuel consumption
Asphalt Paver	Blaw-knox PF-5610	Cummins 6BTA	184 hp			?	46.1 l/h
	Cedarapids CR451		172 hp			?	43.1 l/h
	Dynapec F25C	Cummins 6BTA 5,9	126 hp			1,700 tons/h	31.6 l/h
	Dynapec F30C	Cummins 6BTA 5,10	196 hp			2,400 tons/h	49.1 l/h
	none		0			1	0
	other	Cummins QSB 6.7-C173	173			30	46

Figura 171 Caratteristiche dell'Asphalt Paver.

type	brand/model	engine model	hp	Productivity (non-standard units)	Conversion Factors	Productivity	fuel consumption
Tandem Roller	Ingersol rand DD130	Cummins 6BTA 5.9	174 hp			?	27.6 l/h
	Ingersol rand DD110	Cummins 4BTA 3.9	125 hp			285 tons/h	32.7 l/h
	Ingersol rand DD90	Cummins 4BTA 3.9	110 hp			?	27.6 l/h
	Ingersol rand DD90HF	Cummins B3.9C	110 hp			395 tons/h	27.6 l/h
	Hypac C778B		125 hp			?	31.3 l/h
	none	0	0			1	0
other	Deutz BF4L 1011F	82			341	18	

Figura 172 caratteristiche del Tandem Roller.

type	brand/model	engine model	hp	Productivity (non-standard units)	Conversion Factors	Productivity	fuel consumption
Asphalt Road Reclaimer	Wirtgen WR 2500 S	Mercedes Benz OM 444 LA	670 hp	15000 m ³ /shift	0.32	4.800 tons/h	120.0 l/h
	Caterpillar RR 250 B	Cat 3406C	335 hp			?	?
	Caterpillar RM 350 B	Cat 3406 Dita	500 hp			?	109.3 l/h
	CMI RS 425	Cat 3406 Dita	425 hp			?	106.5 l/h
	CMI RS 500 B	Cat 3408 Dita	525 hp			?	?
	none		0			1	0
	other	Cummins QSX15	550			2000	110

Figura 173 Caratteristiche dell'Asphalt Road Reclaimer.

		energy	
HMA Production	Uncontrolled Batch-mix	214 tons/h	227 MJ/ton
	Fabric Filter-Controlled Batch-mix	214 tons/h	227 MJ/ton
	Uncontrolled Drum-mix	272 tons/h	202 MJ/ton
	Fabric Filter-controlled Drum-mix	272 tons/h	202 MJ/ton
	none	0	0
	other	272	278

PM10	CO	CO ₂	NOx	SO ₂
2.043 kg/ton	0.18 kg/ton	16.798 kg/ton	0.054 kg/ton	0.040 kg/ton
0.004 kg/ton	0.18 kg/ton	16.798 kg/ton	0.054 kg/ton	0.040 kg/ton
2.951 kg/ton	0.06 kg/ton	14.982 kg/ton	0.025 kg/ton	0.026 kg/ton
0.010 kg/ton	0.06 kg/ton	14.982 kg/ton	0.025 kg/ton	0.026 kg/ton
0	0	0	0	0
0.010	0.030	46.77	0.060	0.022

Figura 174 Caratteristiche dell'Asphalt mixer.

FASE 5: Emissioni di Trasporto

Tabella 37 Valori di Input da inserire nel foglio "Emissioni di Trasporto" nel tool PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	Energia [MJ/ton]	H ₂ O [l/ton]
341,230	983	1582	1573	363	5,746	6,694,976

Per quanto riguarda, i valori relativi alle emissioni di mercurio (Hg) e di piombo (Pb), rispettivamente pari a 0.04 g/ton e 2 g/ton, si sono lasciati quelli di default, presenti in PaLATE, non avendone rilevati altri né in Eurobitume né in letteratura, pur essendo consaperli che le loro assunzioni possano risultare "grezze" ma comunque significative per l'analisi.

Per quanto riguarda, invece, il consumo di elettricità, assunto pari a 252 kWh/ton, si è fatto riferimento ad uno studio svedese (Stripple, 2001) mentre per i rifiuti pericolosi, considerato pari a 1,900 g/ton, si è fatto riferimento ad uno finlandese (Häkkinen & Mäkelä, 1996), essendo gli unici documenti, tra quelli consultati, a prendere in considerazione queste tipologie di output.

APPENDICE VI: Caso Studio: Strada extra-urbana italiana (Tisberger Ibañez, 2020)

FASE 1: Design

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
Wearing Course	71.85	0.0006	1.97	1.38
Binder Course	71.85	0.0006	2.36	1.66
Base Course	71.85	0.0006	3.92	2.75
Foundation	71.85	0.0006	7.87	5.53
Total			16.12	11.32

Embankment and Shoulder Volume [yd ³]:	
--	--

Period of Analysis [yrs] (40 yrs or less)	18
---	----

Figura 175 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura USC).

FASE 2: Costruzione InizialeDISTANZA DA CAVA ALL'IMPIANTO DI MISCELAZIONE

Strato	Materiale	D [km]	D [mi]
usura	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
collegamento	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
base	Bitume	100	62.14
	Aggregati	30	18.64
fondazione	Aggregati	30	18.64

Per quanto riguarda il mezzo di trasporto "dominante", si considera il dump truck per gli aggregati ed il tanker truck per il bitume.

DISTANZA DA IMPIANTO DI MISCELAZIONE AL LUOGO DI LAVORO

Questa distanza, nello studio (Farina et al., 2014) è stata assunta pari a:

$$dist = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

Per quanto riguarda il mezzo di trasporto “dominante”, si considera il dump truck.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	1.30	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	0.86	0.07		62.14	tanker truck	
		Cement	1.27		0	0	barge	
		Concrete Additives	0.84		0	0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0	0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0	0	dump truck	
		Water	0.84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1.89	1.37			31.07	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0	0	dump truck		

Figura 176 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	1.55	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	0.86	0.08		62.14	tanker truck	
		Cement	1.27		0	0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0	0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0	0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	rail	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0	0	dump truck	
		Water	0.84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1.89	1.63			31.07	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0	0	0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0	0	dump truck		

Figura 177 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Base Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	2.59	0	18.64	dump truck	
		Bitumen	0.85	0.11		62.14	tanker truck	
		Cement	1.27		0	0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0	0	tanker truck	
		RAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0	0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0	0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0	0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0	0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0	0	dump truck	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0	0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0	0	dump truck	
		Water	0.84		0		dump truck	
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0		0	
		Total: Asphalt mix to site	1.886	2.7			31.07	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck
	Waste mat'l sent to landfill	RAP from site to landfill	1.85	0		0	dump truck	
		RAS from site to landfill	1.12	0		0	dump truck	
RCM from site to landfill		1.88		0	0	dump truck		

Figura 178 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di base, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Foundation	Materials	RAP to recycling plant	1.85		0	0	dump truck
		RAP from recycling plant to site	1.85		0	0	dump truck
		RAS to recycling plant	1.12		0	0	dump truck
		RAS from recycling plant to site	1.12		0	0	dump truck
		RCM to recycling plant	1.88		0	0	dump truck
		RCM from recycling plant to site	1.88		0	0	dump truck
		Cement	1.27		0	0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20		0	0	cement truck
		Coal Bottom Ash	2.00		0	0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72		0	0	dump truck
		Foundry Sand	1.50		0	0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92		0	0	dump truck
		Glass Cullet	1.93		0	0	dump truck
		Rock	2.00		5.43	18.64	dump truck
		Gravel	1.35		0	0	dump truck
		Sand	1.25		0	0	dump truck
		Soil	1.63		0	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	2.00		5.43		
	Waste mat'l sent to landfill	RAP from site to landfill	1.85		0	0	dump truck
		RAS from site to landfill	1.12		0	0	dump truck
RCM from site to landfill		1.88		0	0	dump truck	

Figura 179 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di fondazione, tool PaLATE.

FASE 3: Manutenzione

Per quanto riguarda le distanze e le modalità di trasporto, le considerazioni sono le medesime eseguite per la fase di “Costruzione Iniziale”. Le distanze di trasporto sono ripetute ogni volta che si esegue il processo di manutenzione (tre volte per FDR) o in discarica (quattro volte in totale). Inoltre, la distanza, dal cantiere di lavoro al sito di smaltimento, è di 50 km, come indicato nello studio di Farina et al. (2014).

STRATO DI USURA

$$dist_{aggregati} = 3 \cdot 30 = 90 \text{ km} = 55.92 \text{ mi}$$

$$dist_{bitume} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ km} = 186.41 \text{ mi}$$

$$dist_{HMA \text{ to site}} = 3 \cdot 50 = 150 \text{ km} = 93.21 \text{ mi}$$

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 4 \cdot 50 = 200 \text{ km} = 124.27 \text{ mi}$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 1 \cdot 50 = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

STRATO DI BASE

$$dist_{site \text{ to landfill}} = 1 \cdot 50 = 50 \text{ km} = 31.07 \text{ mi}$$

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt Repaving	Lifetime Concrete Repaving	Lifetime Subbase Reconstruction	Lifetime Embankment Reconstruction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Wearing Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	3.89	0			55.92	dump truck
		Bitumen	0.86	0.21				186.41	tanker truck
		Cement	1.27		0			0	cement truck
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	tanker truck
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck
		Water	0.84		0				
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0			0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	1.89	4.10				93.21	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0			0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0				
CIR	1.83		0						
Patching	1.89		0	0					
Microsurfacing	1.23		0	0					
Crack Sealing	0.84		0	0					
Whitotopping	2.03			0					
Rubblization	1.95			0					
Full-depth Reclamation	1.83	4.10	0						
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	5.46				93.21	dump truck	
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck	
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck	

Figura 180 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di usura, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt Repaving	Lifetime Concrete Repaving	Lifetime Subbase Reconstruction	Lifetime Embankment Reconstruction	Transportation		
			Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode	
Binder Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	0	0			0	dump truck
		Bitumen	0.86	0				0	tanker truck
		Cement	1.27		0			0	cement truck
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	tanker truck
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	rail
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck
		Water	0.84		0				
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0			0	dump truck
		Total: Hot-mix Asphalt to site	1.886	0				0	dump truck
		Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0			0	mixing truck
		Processes	HIPR	1.83	0				
CIR	1.83		0						
Rubblization	1.95			0					
Full-depth Reclamation	1.83			0					
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	1.63				31.07	dump truck	
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck	
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck	

Figura 181 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.

	Material	Density [tons/(yd ³)]	Lifetime Asphalt	Lifetime Concrete	Lifetime	Lifetime	Transportation			
			Repaving	Repaving	Subbase Reconstruction	Embankment Reconstruction	One-way transport distance [mi]	Transportation mode		
			Volume [yd ³]							
Base Course	Materials	Virgin Aggregate	1.94	0	0			0	dump truck	
		Bitumen	0.85	0				0	tanker truck	
		Cement	1.27		0			0	cement truck	
		Concrete Additives	0.84		0			0	tanker truck	
		Asphalt Emulsion	0.84	0				0	dump truck	
		RAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		FRAP	1.85	0	0			0	dump truck	
		RAS	1.12	0	0			0	dump truck	
		RCA	1.88	0	0			0	dump truck	
		Coal Fly Ash	2.20	0	0			0	cement truck	
		Coal Bottom Ash	2.00	0	0			0	dump truck	
		Blast Furnace Slag	1.72	0	0			0	dump truck	
		Foundry Sand	1.50	0	0			0	rail	
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1.92	0	0			0	dump truck	
		Glass Cullet	1.93	0	0			0	dump truck	
		Water	0.84		0					
		Steel Reinforcing Bars	0.24		0			0	dump truck	
	Total: Hot-mix Asphalt to site	1.886	0			0	dump truck			
	Total: Ready-mix Concrete mix to site	2.03		0		0	mixing truck			
Processes	HIPR	1.83	0							
	CIR	1.83	0							
	Flubbization	1.95		0						
	Full-depth Reclamation	1.83	0	0						
Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1.85	2.70				31.07	dump truck		
	RAS from site to landfill	1.12	0				0	dump truck		
	RCM from site to landfill	1.88		0			0	dump truck		

Figura 182 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di base, tool PaLATE.

FASE 4: Attrezzature: Per quanto riguarda le attrezzature, le attività prese a riferimento sono: la pavimentazione in conglomerato bituminoso, FDR e la produzione di HMA. Poiché PaLATE offre una lista di macchinari utilizzati negli USA, e lo studio non fornisce in dettaglio i macchinari utilizzati, sono state eseguite alcune ipotesi (Tisberger Ibañez, 2020). Le informazioni sulle attrezzature fornite dallo studio sono semplicemente relative al consumo di carburante di una finitrice e dei rulli utilizzati, rispettivamente di 30 l/h e 17 l/h.

Asphalt Paving: Si è deciso di selezionare nel foglio "Macchinari" il *Paver*, in quanto si è notata una somiglianza nel consumo di carburante, tra il macchinario presente il PaLATE e quello utilizzato per il caso studio. Nell'articolo si parla di 30 l/h mentre quello selezionato, nel tool, ne consuma 31.6 l/h. Per quanto riguarda, invece, il rullo si è deciso di utilizzarne un *Tandem Roller*, non gommato.

FDR: Per questa attività, in mancanza di informazioni, si è deciso di utilizzare i modelli di macchinari suggeriti da PaLATE, ovvero: l'*Asphalt Road Reclaimer* (Wirtgen WR 2500 S) ed il *Vibratory Soil Compactor* (Dynapac CA262 D).

HMA production: Per questa attività, invece, si è deciso di utilizzare un *Asphalt Mixer* e, trovandosi in Italia, si è supposto di utilizzare gli stessi dati forniti nel precedente caso studio (Sitalfa S.p.A.), utilizzando un Fabric Filter-controlled Drum mix.

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Concrete Paving	Slipform paver	Wirtgen SP 250	106 hp	564 tons/h	19.7 l/h	diesel
	Texture curing machine	Gomaco TIC 400	70 hp	187 tons/h	20.2 l/h	diesel
Asphalt Paving	Paver	Dynapac F25C	126 hp	1,700 tons/h	31.6 l/h	diesel
	Pneumatic roller	none	0 hp	1 tons/h	0.0 l/h	diesel
	Tandem roller	other	110 hp	395 tons/h	17.0 l/h	diesel
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Wirtgen 2200 CR	800 hp	1,713 tons/h	150.00 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	Wirtgen WR2500 S	670 hp	4,800 tons/h	120.0 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1,832 tons/h	37.6 l/h	diesel
Hot In Place Recycling	Heating machine	Wirtgen HM4500	49 hp	256 tons/h	9.1 l/h	diesel
	Asphalt remixer	Wirtgen 4500	295 hp	208 tons/h	55.0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26.1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32.7 l/h	diesel
Rubblization	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	150 hp	1,832 tons/h	37.6 l/h	diesel
Milling	Milling machine	Wirtgen W2200	875 hp	1,100 tons/h	156.2 l/h	diesel
Grinding	Grinding machine	CBI Magnum Force Shingle f	1050 hp	115 tons/h	161.1 l/h	diesel
Concrete Demolition	Multi head breaker	Badger MHB Breaker	350 hp	520 tons/h	76.5 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 644E	160 hp	490 tons/h	40.1 l/h	diesel
Crushing Plant	Excavator	John Deere 690E	131 hp	225 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 624E	135 hp	225 tons/h	35.3 l/h	diesel
	Dozer	Caterpillar D8N	285 hp	225 tons/h	71.4 l/h	diesel
	Generator	Caterpillar 3406C TA	519 hp	225 tons/h	98.4 l/h	diesel
Excavation, placing and compaction	Excavator	John Deere 690E	131 hp	315 tons/h	34.2 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D	174 hp	1,832 tons/h	27.6 l/h	diesel
Tire Recycling	Shredder + Granulator + Classifier + Aspirator System	Wendt Corporation	630 hp	3.00 tons/h	104.73 kWh/ton	105 hp
Glass Recycling	Hopper + Conveyor + Shredder System	Andela GP-05 Pulverizer	10 hp	1.00 tons/h	7.46 kWh/ton	17 hp
HMA Production	asphalt mixer	Fabric Filter-controlled Drum		202.28 tons/h		oil

Figura 183 Tabella delle attrezzature utilizzate – foglio “Attrezzature” del tool PaLATE.

FASE 5: Emissioni di Trasporto

Tabella 38 Valori di Input da inserire nel foglio "Emissioni di Trasporto" nel tool PaLATE (ton = short ton).

CO _{2,eq} [g/ton]	CO [g/ton]	SO ₂ [g/ton]	NO _x [g/ton]	PM ₁₀ [g/ton]	Energia [MJ/ton]	H ₂ O [l/ton]
341,230	983	1582	1573	363	5,746	6,694,976

Per quanto attiene, ai valori relativi alle emissioni di mercurio (Hg) e di piombo (Pb), rispettivamente pari a 0.04 g/ton e 2 g/ton, si sono lasciati quelli di default, presenti in PaLATE, non avendone rilevati altri né in Eurobitume né in letteratura, pur essendo consaperli che le loro assunzioni possano risultare "grezze" ma comunque significative, per l'analisi.

Per quanto concerne, invece, il consumo di elettricità, assunto pari a 252 kWh/ton, si è fatto riferimento ad uno studio svedese (Stripple, 2001) mentre per i rifiuti pericolosi, considerato pari a 1,900 g/ton, se ne è considerato uno finlandese (Häkkinen & Mäkelä, 1996), essendo gli unici documenti, tra quelli consultati, a prendere in considerazione, queste tipologie di output.

BIBLIOGRAFIA

Airey, G.D., Mohammed, M.H., (2008), Rheological properties of polyacrylates used as synthetic road binders, *Rheol. Acta* 47, (7), 751–763.

Asli, H., Ahmadiania, E., Zargar, M., Rehan Karim, M., (2012), Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder, *Construction and Building Materials* 37, 398–405.

Audo, M., Chailleux, E., Bujoli, B., Queffelec. C., Legrand, J., Lépine, O., (2013), Relationship between microalgae lipid extracts composition and rheological properties, 2nd International Symposium on Asphalt Pavements et Environnement, Transportation Research Board of The National Academies, France. 8p, ill., graphiques, tabl., bibliogr.

Audo, M., Paraschiv, M., Queffélec, C., Louvet, I., Hémez, J., Fayon, F., Lépine, O., Legrand, J., Tazerout, M., Chaileux, E., Bujoli, B., (2014), Subcritical Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Residues as a Green Route to Alternative Road Binders, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*.

Barlassina, A., (2015), Studio della lignina nel campo dei trattamenti superficiali di substrati metallici, Politecnico di Milano.

Bernier, E., Lavigne, C., Robidoux, P. Y., (2013), Life cycle assessment of kraft lignin for polymer applications, *Int J Life Cycle Assess*, 18, 520–528.

Biondani, M., (2014), LCA – Life Cycle Assessment applicato alla realizzazione di opere stradali, Tesi di Laura Magistrale, Università degli Studi di Padova.

Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., Virgili, A., (2012), Clear Asphalt Mixture for Wearing Course in Tunnels: Experimental - Application in the Province of Bolzano, SIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53,115 – 124.

Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2015). Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 41–51.

Chailleux, E., Bujoli, B., Legrand, J., Lépine, O., (2012), Alternative Binder from Micro-Algae: Algoroute Project, Conference: Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements.

Chailleux, E., Audo, M., Goyer, S., Queffelec, C., Marzouk, O., (2015), Advances in the development of alternative binders from biomass for the production of biosourced road binders, *Advances in Asphalt Materials – Road and Pavement Construction*, Elsevier, 347-362.

Chen, M., Leng, B., Wu, S., Sang, Y., (2014), Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders, *Construction and Building Materials* 66, 286–298.

Dalmazzo, D., Jiménez Del Barco Carrión, A., Tsantilis, L., Lo Presti, D., Santagata, E. (2020), Non-petroleum-Based Binders for Paving Applications: Rheological and Chemical Investigation on Ageing Effects, Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE), *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 48. Springer, Cham.

Demirbas, M., Balat, M., (2006), Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: a global perspective, *Energy Convers Manage*, 47(15): 2371–81.

Dorchies, P.T., (2008), The Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions, *Transportation Association of Canada*.

Douglas, C.E., Patrick, B., Andrew, B., Ross, A.J., Schmidt, Susanne, B., Jones, (2015), Hydrothermal liquefaction of biomass: developments from batch to continuous process. *Bioresources Technology* 178, 147–156.

European Bitumen Association, (2012), Life Cycle Inventory: Bitumen, 2nd edition, ISBN 2-930160-26-8, pg. 31.

Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., Blengini, G. A., Lanotte, M. A., (2014), Life Cycle Assessment of road pavements containing crumb rubber from end-of-life tires, *International Symposium on Pavement Life Cycle Assessment*, 2, 119–132.

Ferraris, S., (2015), First Bio-Asphalt Road section tests in Zeeland, *Bio-Plastic Magazine.com*, <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20151002-Bio-asphalt-trial-in-Zeeland.php>.

Fini, E.H., Kalberer, E.W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H., et al., (2011), Chemical characterization of biobinder from swine manure: sustainable modifier for asphalt binder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 23(11), 1506–1513.

Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B., J. Mills-Beale, (2012), Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 13, No. 6, 515–522.

Gosselink, R.J.A., (2014), Bioasphalt with lignin in Zeeland, *Wageningen University&Reserch*, <https://web.archive.org/web/20161126061206/http://www.wur.nl/en/newsarticle/Bioasphalt-with-lignin-in-Zeeland.htm>.

Gosselink, R.J.A., Landa, P.A., (2019), Lignin-based bio-asphalt, *World International Property Organization – PCT*, Patent N°: WO2019/092278 A1.

Gosselink, R.J.A., (2019), Lignin use in bio-asphalt, Circular and Biobased Performance Materials Symposium, *Using biobased sources for new chemicals and materials*, Wageningen, The Netherlands.

Green Building Council Italia, (2019), Life Cycle Assessment in edilizia.

Haifang, W., Sushanta, B., Ben, W., (2013), Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(10), 1432-1437.

Häkkinen, T., & Mäkelä, K. (1996). Environmental impact of concrete and asphalt pavements. In *Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements*, *Technical Research Centre of Finland*, Espoo.

Hui, M., Zhigang, Z., Xia, Z., Shuang, W., (2019), A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Warm Mix Asphalt (WMA) and Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement: A Case Study in China, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2019, Article ID 9391857, 12 pages.

Iso. (2004), Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (ISO 14040:2006). *Environmental Management System Requirements*, 44(0). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>.

Khandelwal, M., (2019), Carbon footprint of lignin modified asphalt mix - A tree to gate LCA Assessment, Utrecht University (Master Energy Science), 3-71.

Kiran Kumar, P., Vijaya Krishna, S., Kavita, V., Pooja, K., Bhagawan, D., Srilatha, K., Himabindu, V., (2018), Bio oil production from microalgae via hydrothermal liquefaction

technology under subcritical water conditions, *Journal of Microbiological Methods* 153, 108–117.

Kuhlman, T., Farrington, J., (2010), What is sustainability?, *Sustainability*; 2(11): 3436-48.

Kumar, A., Anushree, Kumar, J., Bhaskar, T., (2020), Utilization of lignin: A sustainable and eco-friendly approach, *Journal of the Energy Institute* 93, 235-271.

Lecomte, M., Nadjar, H., Poncelet, K., (2009), Développement d'un nouveau liant clair issu de ressources végétales renouvelables pour enrobés colorés, Congrès belge de la Route, Gand (Belgique).

Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amirkhanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 233, pp. 1182–1206).

MacDonald, J.M., McBride, W.D., (2009), The transformation of U.S. livestock agriculture: Scale, efficiency, and risks, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service EIB-43, Washington, DC.

Md Maniruzzaman, A.A., Md Tareq, R., Mohd, R.H., Wan Abu Bakar, W.A., (2015), An overview on alternative binders for flexible pavement, *Construction and Building Materials* 84, 315–319.

Mohab Yaser Alamawi, Faridah Hanim Khairuddin, Nur Izzi Md. Yusoff, Khairiah Badri, Halil Ceylan, (2019), Investigation on physical, thermal and chemical properties of palm kernel oil polyol bio-based binder as a replacement for bituminous binder, *Construction and Building Materials* 204, 122-131.

Ocfemia, K., Zhang, Y., Funk, T., (2006), Hydrothermal processing of swine manure to oil using a continuous reactor system: effects of operating parameters on oil yield and quality, American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001–2351, Trans ASABE 2006, 49(6), 1897–1904.

Pasetto, M., Pasquini, E., Giacomello, G., Baliello, A., (2017), Life-Cycle Assessment of road pavements containing marginal materials: comparative analysis based on a real case study, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padua, Padua (PD), Italy.

Piérard, N., De Visscher, J., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A., (2015), Coloured Asphalt Pavements: Mix Design and Laboratory Performance Testing, 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, *RILEM Bookseries* 11, Springer, 283-294.

Pinomaa, O., (1991), Dyeable pavement material.

Poulomi, S., Pu, Y., Ragauskas, A., (2010), Cellulosic biorefineries—unleashing lignin opportunities, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2:383–393.

Riverra Armenta, J. L., Salazar-Cruz, B. A., (2018), Modified Asphalt, InthechOpen, Chapter 1 – pg.4.

Rondini, I., (2014) Applicazione della metodologia LCA ai cereali: il caso della cooperativa agricola Capa Cologna, Tesi di Laura Magistrale, Università di Bologna.

Samieadel, A., Schimmel, K., Fini, E., (2018), Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 191–200.

Santagata, F. et al., (2016), *Strade: Teoria e Tecnica delle Costruzioni Stradali*, Vol.1–Progettazione, Pearson, Vol.1, 492-493.

Santero, N., Masanet, E., Horvath, A., (2010), *Life-Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*, SN3119a, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2010, 81 pages.

Saqib Sohail, T., Rosendahl, L., Andreas, R., (2011), Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies. *Energy* 36, 2328–2342.

Secchi, M., Castellani, V., Orlandi, M., Collina, E., (2019), LCA of lignin as fuel or co-product, *Bio-Resources* 14(2), 4832-4865.

Shih-Hsien, Y., Suciptan, T., (2016), Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder, *Construction and Building Materials* 114, 127–133.

Smalley, R., (2003), Top ten problems of humanity for next 50 years, *Energy & Nano-Technology Conference*, Rice University.

Spagnolo, M., (2019), In Olanda si costruiscono strade e piste ciclabili con asfalto a base di lignina, *Rinnovabili.it Il quotidiano sulla sostenibilità ambientale*, <http://www.rinnovabili.it/mobilita/bitume-asfalto-base-lignina/>.

Stripple, H. (2001). *Life Cycle Assessment of Road A Pilot Study for Inventory Analysis Second Revised Edition for the Swedish National Road Administration Life Cycle Assessment of Road A Pilot Study for Inventory Analysis Second Revised Edition*, IVL *Swedish Environmental Research Institute*, March.

Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., Guo, C., (2016), Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil, *Construction and Building Materials* 102, 496–504.

Tisberger Ibañez, T.E., (2020), Life Cycle Assessment of Pavements through PaLATE, Tesi di Laura Magistrale, Politecnico di Torino.

Trigallez, J., Ballie, M., Delcroix, T., (2009), Liant innovant d’origine végétale pour enrobés routiers et revêtements de voirie, Congrès belge de la Route, Gand (Belgique).

U.S. Department of Transportation, (2005), National transportation statistics 2004, (<http://www.transtats.bts.gov>).

Vliet, D., Slaghek, T., Giezen, C., Haaksman, I., (2016), Lignin as a green alternative for bitumen, 6th *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague, Czech Republic.

Wan Nur Aifa Wan Azahar, Mastura Bujang, Ramadhansyah Putra Jaya, Mohd Rosli Hainin, Azman Mohamed, Norzita Ngadi, Dewi Sri Jayanti, (2015), The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – an overview, *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 78: 4, 111–116.

Wan Nur Aifa Wan Azahar, Ramadhansyah Putra Jaya, Mohd Rosli Hainin, Mastura Bujang, Norzita Ngadi, (2016), Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder, *Construction and Building Materials* 126, 218–226.

Wang, C., Xue, L., Xie, W., You, Z., Yang, X., (2018), Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bioasphalt binders incorporating waste cooking oil, *Construction and Building Materials* 167, 348–358.

Watkins, D., Md. Nuruddin, Hosur, M., Tcherbi-Narteh, A., Jeelani, S., (2015), Extraction and characterization of lignin from different biomass resources, *J Mater Res Technol*, 4(1), 26–32.

Xiu, S., Shahbazi, A., (2012), Bio-oil production and upgrading research: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4406–4414.

You, Z., Mills-Beale, J., Yang, X., Dai, Q., (2012), Alternative Materials for Sustainable Transportation, *Michigan Department of Transportation Construction Paving Unit – C&T*.

Zimbardi, P., Cardinale, G., Demichele, M., Nanna, F., Viaggiano, D., Bonini, C., D'Alessio, L., D'Aura, M., Teghil, R., Tofani, D., (1998), La Lignina: una risorsa da valorizzare, *Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente* (ENEA).

SITOGRAFIA

[1] Recycled Materials Resources Center (University of New Hampshire), sezione "Tools" > "PaLATE": <https://rmrc.wisc.edu/palate/>

[2] University of California Berkeley (last updated: June 5, 2007): http://faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html#_What_is_PaLATE?

[3] Poteri caloriferi: Gas Naturale e Carbone: <http://cngeurope.com/fuel-calorific-values/>
Petrolio greggio e Uranio: <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>

[4] CIRCABC (Communication and Information Resource Centre for Administrations, Businesses and Citizens): <https://circabc.europa.eu/sd/a/de30047e-2c22-4f23-90dc56fbb8cb1b45/Pulp%20and%20Paper%20IT.pdf>

[5] Index Mundi: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=wood-pulp&months=240¤cy=eur>

INDICE FIGURE

Figura 1 Produzione di un bio-legante con miscelazione ad alta temperatura di resina e olio (Chailleux et al., 2015).	9
Figura 2 Composizione di alcuni bio-leganti industriali (le percentuali sono indicate per il peso totale di legante) (Chailleux et al., 2015).	9
Figura 3 Proprietà di un bitume 50/70 e di tre bio-leganti in commercio (Trigallez et al., 2009; Lecomte et al., 2009).	11
Figura 4 Confronto visivo tra un campione di bitume ed un bio-legante Vegecol.	12
Figura 5 Confronto visivo tra un campione di bitume ed un bio-legante Floraphalte (Lecomte et al., 2009).	12
Figura 6 Floraphalte: evoluzione della penetrazione e della temperatura di rammollimento, in funzione del tempo di esposizione in forno (Lecomte et al., 2009). 13	
Figura 7 Evoluzione nel tempo di proprietà meccaniche e reologiche di tre bio-leganti (Chailleux et al., 2015).	14
Figura 8 Produttività di olio da diverse biomasse (Chailleux et al., 2015).	18
Figura 9 Estratto di Soxhlet da microalghe (Chailleux et al., 2012).	21
Figura 10 Piano di Black: evoluzione in funzione del contenuto di alghe (Chailleux et al., 2012).	22
Figura 11 Confronto tra estratti di microalghe e bitume (Chailleux et al., 2012).	22
Figura 12 Procedimento di HTL con residui di micro-alghe (Audo et al., 2014).	23
Figura 13 Dati sperimentali relativi all'HTL dei residui di <i>Scenedesmus</i> sp. nell'autoclave da 1 L (Audo et al., 2014).	24
Figura 14 Processo HTL (riadattato) della biomassa algale (Kiran Kumar et al., 2018). ..	25
Figura 15 Variazione della norma del modulo complesso in funzione della temperatura tra le frazioni insolubili (IF260, IF280, IF300) ed un bitume standard (Audo et al., 2014).	26

Figura 16 Variazione dell'angolo di fase in funzione della norma del modulo complesso tra le frazioni insolubili (IF260, IF280, IF300) ed un bitume standard (Audo et al., 2014).	27
Figura 17 Norma del modulo complesso, a 15 °C e 1 Hz, misurato su miscele SMA composta da un bitume convenzionale e da un legante di alghe (Chaillux et al., 2015).	28
Figura 18 Angolo di fase a, 15 °C e 1 Hz, misurato su miscele SMA composta da un bitume convenzionale e da un legante di alghe (Chaillux et al., 2015).....	28
Figura 19 Distribuzione e struttura della cellulosa, emicellulosa e lignina nella biomassa (Kumar et al., 2020).....	34
Figura 20 Organizzazione della struttura: cellulosa, emicellulosa e lignina (Poulomi et al., 2010).	35
Figura 21 Processi di estrazione della lignina (Barlassina, 2015).....	36
Figura 22 Come ottenere lignina dalla biomassa lignocellulosica? (Gosselink, 2019).....	38
Figura 23 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) dei bitumi 10/20, 70/100 e 160/220 con e senza aggiunta del 10 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).....	40
Figura 24 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) dei bitumi 10/20, 70/100 e 160/220 con e senza aggiunta del 10 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).	40
Figura 25 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con e senza aggiunta del 10 % o del 25 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).....	41
Figura 26 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con e senza aggiunta del 10 % o del 25 % in peso di lignina Organosolv (Vliet et al., 2016).	41
Figura 27 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso delle quattro tipologie di lignine testate (Vliet et al., 2016).....	42
Figura 28 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso delle quattro tipologie di lignine testate (Vliet et al., 2016).....	42
Figura 29 Gruppi idrossilici (-OH) presenti nella lignina (Vliet et al., 2016).....	43
Figura 30 Curve Maestre ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso di lignina Organosolv al naturale o modificata chimicamente (Vliet et al., 2016).....	44

Figura 31 Andamento dell'angolo di fase ($T_{ref} = 20\text{ °C}$) del bitume 70/100 con l'aggiunta del 25 % in peso di lignina Organosolv al naturale o modificata chimicamente (Vliet et al., 2016).	44
Figura 32 Analisi su conglomerati bituminosi ZOAB e SMA (Gosselink, 2019).	46
Figura 33 Prove meccaniche eseguite sui provini (Gosselink, 2019).	47
Figura 34 Test pilota, prima del campo prova in vera grandezza (Gosselink, 2019).	47
Figura 35 Tronco stradale in Zelanda costituito da bitume modificato con lignina soda (Paesi Bassi) (Gosselink, 2019)	48
Figura 36 Maggiori produttori di WCO a livello di Stati (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2015).	51
Figura 37 Proprietà fisiche del bitume 60/80 (Wang et al., 2018).	54
Figura 38 Residuo del processo di raffinazione del WCO (Wang et al., 2018).	54
Figura 39 Analisi effettuate nel CS-2 (Wang et al., 2018).	55
Figura 40 Proprietà fisiche del bitume 60/80 (Asli et al., 2012).	55
Figura 41 Campione di WCO non filtrato (a sinistra) e di WCO dopo il processo di filtraggio (a destra) (Asli et al., 2012).	55
Figura 42 Proprietà chimiche del WCO utilizzato nel CS-4 (Asli et al., 2012).	56
Figura 43 Proprietà fisiche dei leganti di controllo A0, B0 e CO nel CS-5 (Chen et al., 2014).	57
Figura 44 Processo sperimentale seguito nel CS-5 (Chen et al., 2014).	58
Figura 45 Proprietà fisiche del bitume 40/60 usato nel CS-6 (Sun et al., 2016).	59
Figura 46 Processo di trasformazione del WCO in bio-olio (Sun et al., 2016).	59
Figura 47 Risultati dell'analisi S.A.R.A (Sun et al., 2016).	60
Figura 48 ID dei composti analizzati nel CS-6 (Sun et al., 2016).	60
Figura 49 Processo sperimentale seguito nel CS-6 (Sun et al., 2016).	61
Figura 50 Risultati dell'Acid Value Test sul WCO utilizzato nel CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	63
Figura 51 WCO non trattato (a sinistra) e WCO trattato (a destra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	64

Figura 52 Risultati della prova di penetrazione CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).....	66
Figura 53 Risultati della prova di rammollimento CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).....	66
Figura 54 Risultati della prova di viscosità CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	68
Figura 55 Resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti con WCO trattato (a destra) e WCO non trattato (a sinistra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).....	69
Figura 56 Temperatura di rottura per leganti con WCO trattati e WCO non trattati (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).....	70
Figura 57 Indice di invecchiamento con WCO non trattato (a sinistra) e un WCO trattato (a destra) (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	71
Figura 58 Risultati prova di penetrazione CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).	73
Figura 59 Risultati prova di penetrazione CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).	73
Figura 60 Risultati prova di penetrazione CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).	73
Figura 61 Risultati prova di rammollimento CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).....	75
Figura 62 Risultati prova di rammollimento CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).	75
Figura 63 Risultati prova di rammollimento CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).....	75
Figura 64 Risultati prova di viscosità CS-4 – caso aged (Asli et al., 2012).....	77
Figura 65 Risultati prova di viscosità CS-6 (60 °C) – caso unaged (Sun et al., 2016).	78
Figura 66 Risultati prova di viscosità CS-5 (135 °C) – caso aged (Chen et al., 2014).	78
Figura 67 Risultati prova di duttilità CS-6 (15 °C) – caso unaged (Sun et al., 2016).	80
Figura 68 Risultati prova di duttilità CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).....	80
Figura 69 Norma del modulo complesso e angolo di fase (T_{ref} 20 °C) CS-6 - caso unaged (Sun et al., 2016).	81
Figura 70 Curva Maestra (T_{ref} 20 °C) CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).....	81
Figura 71 Norma del modulo complesso e angolo di fase CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).....	82
Figura 72 Curva Maestra CS-2 – caso unaged (Haifang et al., 2013).....	83
Figura 73 Modulo di rigidezza CS-6 – caso unaged (Sun et al., 2016).	85

Figura 74 Andamento della resistenza nei confronti dell'ormaiamento CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).....	87
Figura 75 Risultati MSCR Test CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).	88
Figura 76 Risultati Time Sweep Test CS-5 – caso aged (Chen et al., 2014).	89
Figura 77 Rette di fatica CS-3 – caso unaged (Wang et al., 2018).....	90
Figura 78 Risultati dell'analisi chimica elementare (Fini et al., 2012).	97
Figura 79 Risultati dell'analisi SARA (figura riadattata) (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).	97
Figura 80 Variazione della viscosità in funzione della percentuale di bio-legante aggiunta (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).	98
Figura 81 Curva Maestra e andamento dell'm-value con la temperatura (Fini et al., 2012).	98
Figura 82 Risultati analisi BBR (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).	99
Figura 83 Curva Maestra bio-legante con bio-olio derivante da letame suino (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).....	100
Figura 84 Variazione del parametro $ G^* /\sin(\delta)$ con la temperatura e percentuale di bio-legante (Fini et al., 2012).....	100
Figura 85 Curva Maestra con e senza la presenza di PPA per le percentuali di bio-legante analizzate (2 % primo grafico, 5 % secondo grafico e 10 % terzo grafico) (Fini et al., 2012).	101
Figura 86 Risultati dell'Hamburg Rut Test (Fini et al., 2011; Fini et al., 2012).....	102
Figura 87 Life Cycle Assessment: schema generale (Green Building Council Italia, 2019).	105
Figura 88 Fasi del LCA (Biondani, 2014).	109
Figura 89 Tipologie di analisi LCA (Li et al., 2019).....	110
Figura 90 LCA generico di una pavimentazione (Li et al., 2019).....	111
Figura 91 LCA di una pavimentazione (Hui et al., 2019).....	112
Figura 92 Logo di PaLATE (Biondani, 2014).	113
Figura 93 Schema degli Input e Output di PaLATE (Biondani, 2014).....	115
Figura 94 Processo logico seguito da PaLATE (Santero et al., 2010).	115

Figura 95 Processo di produzione del bio-olio derivante da letame suino tramite HTL (Samieadel et al., 2018).....	127
Figura 96 LCI del bio-olio derivante da letame suino (Samieadel et al., 2018).	128
Figura 97 Processo Kraft e sottoprodotti ottenuti (riadattato) (Khandelwal, 2019))....	130
Figura 98 Confine del sistema per l’LCI della lignina Kraft (Bernier et al., 2013).....	132
Figura 99 Processi Ecoinvent, utilizzati per modellare l’LCI della lignina Kraft (Bernier et al., 2013).....	132
Figura 100 Localizzazione geografica A32 (Wikipedia).....	136
Figura 101 Dati di Input del foglio “Design” di PaLATE (Sistema di misura USC).....	137
Figura 102 Dati di Input del foglio “Design” di PaLATE (Sistema di misura SI).	138
Figura 103 Sezione Viadotto “Torre del Colle”.....	138
Figura 104 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di usura.	139
Figura 105 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di collegamento.....	141
Figura 106 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di usura, tool PaLATE.	146
Figura 107 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.....	146
Figura 108 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di usura, tool PaLATE. ...	150
Figura 109 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.	150
Figura 110 Dati di Input del foglio “Design” di PaLATE (Sistema di misura USC).....	154
Figura 111 Dati di Input del foglio “Design” di PaLATE (Sistema di misura S.I.).	154
Figura 112 Sezione strada extra-urbana italiana – CS-2.	155
Figura 113 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di usura, tool PaLATE.	161
Figura 114 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.....	161

Figura 115 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di base, tool PaLATE.	162
Figura 116 Dati di Input foglio “Costruzione Iniziale” per lo strato di fondazione, tool PaLATE.....	162
Figura 117 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di usura, tool PaLATE. ...	165
Figura 118 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.	165
Figura 119 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di base, tool PaLATE.....	166
Figura 120 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	175
Figura 121 Andamento dell’energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	176
Figura 122 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	177
Figura 123 Andamento dell’energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	177
Figura 124 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	178
Figura 125 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento dell’energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	178
Figura 126 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 2).	179
Figura 127 Andamento dell’energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 2).	180
Figura 128 Confronto Scenario 0 e Scenario 2: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	180
Figura 129 Confronto Scenario 0 e Scenario 2: Andamento dell’energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	181
Figura 130 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	182

Figura 131 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	182
Figura 132 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	184
Figura 133 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	184
Figura 134 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	185
Figura 135 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	185
Figura 136 Confronto tra Scenari: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	186
Figura 137 Confronto tra Scenari: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	186
Figura 138 Confronto tra Scenari: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	187
Figura 139 Confronto tra Scenari: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	187
Figura 140 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	188
Figura 141 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	189
Figura 142 Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	190
Figura 143 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	190
Figura 144 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento della CO _{2,eq} al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	191
Figura 145 Confronto Scenario 0 e Scenario 1: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	191

Figura 146 Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	192
Figura 147 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 0).	192
Figura 148 Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	193
Figura 149 Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate (Scenario 1).	193
Figura 150 Confronto tra Scenari: Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	194
Figura 151 Confronto tra Scenari: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	194
Figura 152 Confronto tra Scenari: Andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	195
Figura 153 Confronto tra Scenari: Andamento dell'energia, al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	195
Figura 154 Confronto tra allocazioni: andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	197
Figura 155 Confronto tra allocazioni: andamento dell'energia al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	198
Figura 156 Confronto tra allocazioni: andamento della $CO_{2,eq}$ al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	199
Figura 157 Confronto tra allocazioni: andamento dell'energia al variare delle differenti percentuali di bio-legnate.	199
Figura 158 Primo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'emissione di CO_2 (Scenario 0).	201
Figura 159 Primo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'energia (Scenario 0).	201
Figura 160 Secondo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'emissione di CO_2 (Scenario 0).	202

Figura 161 Secondo caso studio (50 % di lignina): diagramma di output dell'energia (Scenario 0).	202
Figura 162 Schema dell'estrattore Soxhlet.	207
Figura 163 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura USC).....	214
Figura 164 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di usura.	214
Figura 165 Curva granulometrica dello scheletro litico della miscela per lo strato di collegamento.....	216
Figura 166 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di usura, tool PaLATE.	221
Figura 167 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.....	221
Figura 168 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di usura, tool PaLATE. ...	224
Figura 169 Dati di Input foglio "Manutenzione" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.	224
Figura 170 Tabella delle attrezzature utilizzate – foglio "Attrezzature" del tool PaLATE.	225
Figura 171 Caratteristiche dell'Asphalt Paver.	226
Figura 172 caratteristiche del Tandem Roller.	226
Figura 173 Caratteristiche dell'Asphalt Road Reclaimer.	226
Figura 174 Caratteristiche dell'Asphalt mixer.	226
Figura 175 Dati di Input del foglio "Design" di PaLATE (Sistema di misura USC).....	228
Figura 176 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di usura, tool PaLATE.	229
Figura 177 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di collegamento, tool PaLATE.....	229
Figura 178 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di base, tool PaLATE.	230
Figura 179 Dati di Input foglio "Costruzione Iniziale" per lo strato di fondazione, tool PaLATE.....	230

Figura 180 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di usura, tool PaLATE. ... 232

Figura 181 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di collegamento, tool PaLATE.
..... 232

Figura 182 Dati di Input foglio “Manutenzione” per lo strato di base, tool PaLATE..... 233

Figura 183 Tabella delle attrezzature utilizzate – foglio “Attrezzature” del tool PaLATE.
..... 234

INDICE TABELLE

Tabella 1 Caratteristiche di alcuni bio-leganti commerciali.....	15
Tabella 2 Riassunto delle principali caratteristiche contenute nei vari casi studio.	62
Tabella 3 Risultati della prova di penetrazione di un campione non invecchiato CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	65
Tabella 4 Risultati della prova di rammollimento di un campione non invecchiato CS-1 (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	67
Tabella 5 Risultati della prova di viscosità (Wan Nur Aifa Wan Azahar et al., 2016).	68
Tabella 6 “Fatigue life” per leganti unaged, aged e modificati con WCO – CS-5 (Chen et al., 2014).....	90
Tabella 7 Caratteristiche bio-olio derivante da letame suino (Xiu et al., 2012).	121
Tabella 8 Emissioni e consumo di acqua per bitume PMB (European Bitumen Association, 2012).	125
Tabella 9 Risorse energetiche per la produzione di una tonnellata di bitume (European Bitumen Association, 2012).	126
Tabella 10 Poteri caloriferi delle risorse energetiche per la produzione di una tonnellata di bitume.	126
Tabella 11 LCI “finale” per bitume PMB, da inserire in PaLATE (ton = short ton).	127
Tabella 12 Valori LCI per bio-olio da letame suino, da inserire in PaLATE (Samieadel et al., 2018) (ton = short ton).....	128
Tabella 13 Valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).	134
Tabella 14 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).....	151
Tabella 15 Mix Design di ciascuno strato costituente la pavimentazione.	156
Tabella 16 Quantità di materiale necessario per ciascuno strato.	156
Tabella 17 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).....	167

Tabella 18 Piano di Manutenzione viadotto “Torre del Colle”: Scenario 0.	172
Tabella 19 Piano di Manutenzione viadotto “Torre del Colle”: Scenario 1.	172
Tabella 20 Piano di Manutenzione “strada extraurbana italiana”: Scenario 0.	173
Tabella 21 Piano di Manutenzione “strada extraurbana italiana”: Scenario 1.	174
Tabella 22 Output tool PaLATE (Scenario 0).	174
Tabella 23 Output tool PaLATE (Scenario 1).	176
Tabella 24 Output tool PaLATE (Scenario 2).	179
Tabella 25 Output tool PaLATE (Scenario 0).	181
Tabella 26 Output tool PaLATE (Scenario 1).	183
Tabella 27 Output tool PaLATE (Scenario 0).	188
Tabella 28 Output tool PaLATE (Scenario 1).	189
Tabella 29 Output tool PaLATE (Scenario 0).	192
Tabella 30 Output tool PaLATE (Scenario 1).	193
Tabella 31 Allocazione economica: valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).	196
Tabella 32 Allocazione di massa: valori LCI di interesse per la lignina, da inserire in PaLATE (ton = short ton).	196
Tabella 33 Allocazione economica: output tool PaLATE (Scenario 0).	197
Tabella 34 Allocazione di massa: output tool PaLATE (Scenario 0).	197
Tabella 35 Allocazione economica: output tool PaLATE (Scenario 0).	198
Tabella 36 Allocazione di massa: output tool PaLATE (Scenario 0).	198
Tabella 37 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).	227
Tabella 38 Valori di Input da inserire nel foglio “Emissioni di Trasporto” nel tool PaLATE (ton = short ton).	235

RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo percorso di studi, mi sembra opportuno e doveroso fare alcuni sinceri ringraziamenti.

In primis, vorrei ringraziare i professori Santagata e Dalmazzo e la prof.ssa Tsantilis che mi hanno accompagnato e supportato nella stesura di questo lavoro, durante il quale ho capito di aver ancora molto da imparare, sotto molteplici aspetti, ma soprattutto li voglio ringraziare per avermi insegnato ad affrontare tutti i problemi che sono sorti, durante questi nove mesi di lavoro, in maniera metodica e puntuale.

Un immenso “grazie” va poi alla mia famiglia: a mio padre Mario e mia madre Mina che mi hanno insegnato l’importanza dell’istruzione, della correttezza e dell’onestà, prima di tutto, fin da quando ero piccolo, permettendomi di poter concludere il percorso di studi serenamente, aiutandomi a loro modo a superare i tanti “ostacoli” che si sono presentati sul mio cammino. Un grazie particolare mi sento di rivolgerlo alla mia mamma che mi ha sempre sostenuto e supportato in tutto, gioendo e soffrendo con me per ogni vittoria e sconfitta, come solo una madre sa fare. Un pensiero affettuoso lo rivolgo alle mie due sorelle: Alessandra ed Eleonora, che sono state per me sempre un esempio in tutto, fin da quando ero piccolo. Spero che questo traguardo sia, per tutti loro, una grande soddisfazione e un risultato per il quale andare fieri e spero, anche, che possano perdonarmi per aver dovuto ascoltare per troppo tempo, in questi anni, la frase: “no, non posso. Devo studiare”.

Un ringraziamento sincero mi sento di rivolgerlo a tutti i miei “compagni di avventura”, o meglio, “colleghi” che ho incontrato in questo periodo universitario, sia qui a Torino che anche durante la mia esperienza di studio a Barcellona: Manuel, Salvo, Mario, Giorgia, Roberta, Chiara, Sara, Marta e Riccardo, e in generale a tutte quelle persone che sono state anche solo di passaggio, che mi hanno aiutato a superare momenti più o meno difficili e che hanno condiviso con me alcuni dei miei traguardi personali e non solo.

Alla mia professoressa delle superiori, la prof.ssa Camurati, che mi ha trasmesso l'immensa passione, il metodo, la costanza e la fermezza che aveva in quello che faceva. Un sincero e sentito "grazie" per avermi avvicinato a questo "mondo" e "grazie" per l'appoggio ricevuto negli anni, anche quando ormai ero solamente un "ex allievo".

Un ringraziamento particolare lo vorrei anche dedicare al mio compagno di banco delle superiori, Alberto. Anche se le nostre strade accademiche si sono divise, subito dopo il diploma, mi ricordo ancora della nostra idea di aprire uno studio insieme e le fantasie che facevamo sul nostro futuro, che in parte si sono già realizzate.

A Stefania, anche se il Politecnico ci ha fatto incontrare verso la fine di questo percorso, ne abbiamo condiviso, forse, la parte più "matura", condividendo insieme ansie (tante) e vittorie, sorreggendoci sempre a vicenda.

A Diana, la mia amica "quasi per caso" che ho avuto l'onore di poter incontrare lungo il mio cammino, dico "grazie" perché con la tua tenacia, la tua caparbia e la tua fermezza, mi hai insegnato che se una cosa la si vuole, bisogna scendere in campo e andarsela a prendere con tutte le proprie forze.

A Claudia, collega, ma soprattutto grande amica, "grazie" per aver fatto parte di questo mio viaggio, superando insieme difficoltà e vittorie. Ringrazio il Politecnico per avermi fatto conoscere una persona come te: capace, diligente, sempre con la parola giusta da dire e, soprattutto, al momento giusto e sempre pronta ad ascoltarmi e a confortarmi, nonostante i molti chilometri che ci dividono.

Rivolgo, poi, un ringraziamento sentito ad Angelo, "carissimo amico di famiglia", sempre pronto a darmi il suo sostegno informatico e tecnologico, tra una carbonara ed una amatriciana.

Infine, vorrei fare un ringraziamento a me stesso, a Marco. “Grazie” per non aver mai gettato la spugna davanti ai tanti “ostacoli” che questo percorso ti ha messo davanti, “grazie” perché hai cercato sempre di dare il meglio di te stesso, anche se poche volte sei stato orgoglioso dei tuoi successi, pensando che si sarebbe potuto fare sempre meglio ma penso che, adesso, sia giunto il momento per essere orgoglioso del traguardo che hai raggiunto.

Per ultimo, un pensiero affettuoso ad una persona che ancora non c'è ma che presto farà parte della mia vita, mio nipote.