



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Analisi strutturale e valutazione del ciclo di vita di pavimentazioni autostradali realizzate con conglomerati bituminosi nano-rinforzati

*Structural analysis and life cycle assessment of highway
pavements containing nano-reinforced bituminous mixtures*

Relatori:

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

Candidato:

Alberto Del Frari

Sessione di Laurea Luglio 2021
A.A. 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
STATO DELL'ARTE.....	3
1.1. Conglomerati bituminosi nano-rinforzati	3
1.1.1. Conglomerati bituminosi modificati con nanoargilla.....	3
1.1.2. Conglomerati bituminosi modificati con nanotubi di carbonio	5
1.2. Valutazione del ciclo di vita (LCA).....	6
1.2.1. Normativa LCA di riferimento: ISO 14040 – ISO 14044.....	8
1.2.2. Valutazione del Ciclo di Vita di pavimentazioni stradali	9
NANOMATERIALI.....	13
2.1. Nanotubi di carbonio	14
2.1.1. Tecniche di sintesi di CNTs	15
2.1.2. Processo di purificazione dei nanotubi di carbonio	17
2.2. Nanoargille	18
2.2.1. Tecniche di produzione delle nanoargille.....	19
2.3. Metodi di valutazione degli impatti ambientali.....	20
2.3.1. ReCiPe 2008.....	22
2.3.2. Metodo TRACI	25
2.3.3. Metodo USEtox.....	27
2.3.4. Categorie di impatto	28
2.4. Analisi dei dati: casi studio presenti in letteratura.....	32
2.4.1. Unità funzionale	32
2.4.2. Confini di sistema.....	32
2.4.3. Processo produttivo	33
2.4.4. Scala di produzione	33
2.4.5. Spazio-dipendenza e tempo-dipendenza	33
2.4.6. Metodi LCIA impiegati.....	34
2.4.7. Nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNTs)	35
2.4.8. Confronto tra MWCNTs e SWCNTs.....	42
2.4.9. Tempo dipendenza	50
2.4.10. Spazio dipendenza.....	51

2.4.11.	Scala di produzione	51
2.4.12.	Nanoargille	52
2.4.13.	Confronto nanotubi vs nanoargille	53
MATERIALI E MODELLAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI		55
3.1.	Materiali.....	55
3.1.1.	Bitume base	55
3.1.2.	Nano-additivi.....	56
3.1.3.	Tecniche di miscelazione dei bitumi nano-modificati	57
3.1.4.	Conglomerato bituminoso	57
3.2.	Caratteristiche meccaniche	62
3.2.1.	Curve maestre dei conglomerati.....	62
3.2.2.	Curve di fatica	65
3.3.	Modellazione del modulo dinamico	67
3.3.4.	Correzione del modello di Hirsch	71
PROGETTO STRUTTURALE DELLA PAVIMENTAZIONE AUTOSTRADALE.....		75
4.1.	Definizione del caso studio e degli scenari di progetto	75
4.1.1.	Premessa progettuale.....	76
4.2.	Caratterizzazione climatica del sito di costruzione	77
4.3.	Analisi del traffico	79
4.3.1.	Stima del tasso di crescita r	81
4.3.2.	Determinazione del traffico di progetto	84
4.3.3.	Modellazione del traffico	85
4.4.	Caratteristiche meccaniche dei materiali	87
4.4.1.	Strato di usura.....	87
4.4.2.	Strato di collegamento.....	89
4.4.3.	Strato di base	89
4.4.4.	Fondazione in misto granulare	90
4.4.5.	Sottofondo	91
4.5.	Modello di calcolo ed analisi strutturale.....	92
4.5.1.	Confronto degli output: BISAR 3.0 vs ALVA MASTER	94
4.6.	Funzioni di trasferimento.....	96
4.6.1.	Fatica	97
4.6.2.	Accumulo di deformazioni permanenti.....	99

4.7.	Progetto e verifica della pavimentazione.....	99
4.7.1.	Verifica strutturale.....	100
4.8.	Considerazioni finali sul progetto strutturale	107
VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DELLA PAVIMENTAZIONE AUTOSTRADALE		109
5.1.	Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione	109
5.2.	Analisi d'inventario	110
5.2.1.	Considerazioni generali sull'analisi d'inventario.....	110
5.2.2.	Bitume base	111
5.2.3.	Emulsione bituminosa.....	114
5.2.4.	Aggregati naturali.....	116
5.2.5.	Approvvigionamento idrico	116
5.2.6.	Produzione del gasolio	117
5.2.7.	Nanomateriali	117
5.2.8.	Inventario dei mezzi	118
5.3.	Valutazione dell'impatto ambientale.....	125
5.3.1.	Analisi dello scenario S-TAL QUALE	125
5.3.2.	Analisi dello scenario S-NC	134
5.3.3.	Analisi dello scenario S-CNTs.....	142
5.4.	Analisi dei risultati.....	148
5.4.1.	Analisi comparativa: parte 1	149
5.4.2.	Analisi comparativa: parte 2	153
CONCLUSIONI		159
ALLEGATO A		163
ALLEGATO B.....		165
ALLEGATO C.....		169
ALLEGATO D		172
BIBLIOGRAFIA		183
INDICE DELLE FIGURE		189
INDICE DELLE TABELLE.....		191

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, si è assistito ad un rapido incremento della domanda di trasporto che ha condotto ad un aumento dei volumi di traffico sulle infrastrutture stradali e ad una conseguente accelerazione dei fenomeni di ammaloramento delle pavimentazioni. Sussiste dunque la necessità di identificare nuovi materiali, in grado di garantire delle migliori prestazioni meccaniche e di durabilità.

Parallelamente, l'industria dei nanomateriali ha subito uno sviluppo straordinario, diffondendosi in ogni campo della vita umana, grazie alle peculiari proprietà fisiche e chimiche che caratterizzano i prodotti nanometrici.

L'esigenza di identificare un materiale stradale più prestante unita all'espansione dell'industria nano-tecnologica hanno condotto allo sviluppo di un materiale innovativo ottenuto mediante la dispersione di un agente nano-modificante nella matrice legante dei conglomerati bituminosi. Diversi studi di ricerca sono stati compiuti valutando molteplici tipologie di additivi: in particolare, i nano-materiali più promettenti risultano essere le nanoargille ed i nanotubi di carbonio.

Tuttavia, lo sviluppo di questi materiali stradali innovativi non può prescindere dal concetto di sostenibilità ambientale, il quale è diventato un imperativo nel campo dell'ingegneria civile. Per un possibile impiego su larga scala, i conglomerati bituminosi nano-rinforzati devono garantire delle prestazioni ambientali tali da ridurre le emissioni e il consumo di risorse ed energia legate al ciclo di vita delle sovrastrutture.

In questo contesto si delinea il presente lavoro di tesi, in cui si intende analizzare le prestazioni, sotto il profilo strutturale ed ambientale, delle pavimentazioni stradali realizzate con conglomerati bituminosi nano-rinforzati. L'obiettivo del lavoro sperimentale è quello di valutare, da un punto di vista strutturale ed ambientale, l'effetto dell'impiego di questi materiali innovativi.

La trattazione si basa su un'analisi comparativa, in cui si esamina il caso studio di una pavimentazione autostradale, valutando tre scenari differenti: uno scenario di riferimento in cui si prevede l'impiego di conglomerato bituminoso tradizionale e due scenari innovativi in cui si considerano due miscele bituminose per strato di collegamento e base, il cui legante è additivato con nanotubi di carbonio e nanoargille. Per ogni scenario, si prevede una configurazione strutturale formata dallo strato di usura, collegamento, base e fondazione in misto granulare. Indipendentemente dallo scenario, lo strato di usura è formato da conglomerato bituminoso tradizionale.

Il lavoro di tesi si sviluppa in due fasi successive: il calcolo strutturale della pavimentazione stradale e la valutazione del ciclo di vita.

La prima fase comprende, per ogni scenario, l'analisi dei materiali, la modellazione dei dati sperimentali e di progetto, l'analisi strutturale e la definizione degli spessori di progetto della pavimentazione. Il caso studio prevede che la generica sovrastruttura sia definita per infrastrutture autostradali.

La seconda fase prevede, per ogni scenario, la valutazione del ciclo di vita mediante la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*). Dopo aver definito lo scopo e il campo di applicazione e costruito l'inventario, si è passati al calcolo degli impatti ambientali

utilizzando l'applicativo PaLATE 2.0 secondo un approccio “*cradle-to-laid*”, ossia dall'estrazione delle materie prime fino alla costruzione della sovrastruttura.

Si riporta in seguito una breve descrizione della struttura della tesi.

Il Capitolo 1, denominato “Stato dell'arte”, si propone di fornire una panoramica degli studi condotti sui conglomerati bituminosi modificati con nanoargille e nanotubi di carbonio e di presentare la metodologia del LCA, esponendone la struttura e le caratteristiche generali, con un approfondimento dell'applicazione del metodo nell'ambito dell'analisi ambientale delle pavimentazioni stradali.

Il Capitolo 2, intitolato “Nanomateriali”, ha l'obiettivo di descrivere le proprietà e le tecniche di produzione di nanoargille e nanotubi carbonio e di delineare, attraverso un'attenta analisi della letteratura tecnica, l'eco-profilo di questi nano-materiali.

Il Capitolo 3, con il titolo “Materiali e modellazione dei dati sperimentali”, getta le basi per la trattazione sperimentale del presente lavoro di tesi, definendo le caratteristiche dei conglomerati bituminosi e sviluppando la modellazione dei dati sperimentali derivanti da precedenti studi condotti nel “Laboratorio Materiali Stradali” del Politecnico di Torino.

Il Capitolo 4, denominato “Progetto strutturale della pavimentazione autostradale”, è incentrato sulla presentazione del caso studio di riferimento e sul calcolo strutturale della pavimentazione autostradale, con l'obiettivo di comprendere gli effetti determinati dall'impiego di conglomerati bituminosi nano-rinforzati sulla sovrastruttura.

Il Capitolo 5, intitolato “Valutazione del ciclo di vita della pavimentazione autostradale”, presenta lo studio LCA condotto sulla pavimentazione autostradale eseguita nel capitolo precedente.

In ultimo, nel capitolo conclusivo, si proporrà una sintesi dello studio condotto nel lavoro tesi, si presenteranno i principali risultati ottenuti e delle proposte per l'impiego dei materiali innovativi analizzati.

CAPITOLO 1

STATO DELL'ARTE

I conglomerati bituminosi nano-rinforzati sono materiali innovativi, frutto della continua evoluzione del settore delle pavimentazioni stradali. Dopo una vasta ricerca in letteratura, nel presente capitolo si intende proporre una panoramica degli studi condotti su tali materiali innovativi, al fine di comprenderne le potenzialità. Nella seconda parte del capitolo si intende presentare la metodologia del *Life Cycle Assessment*, esponendone la struttura e le caratteristiche generali, con un approfondimento dell'applicazione del metodo nell'ambito dell'analisi ambientale delle pavimentazioni stradali.

1.1. Conglomerati bituminosi nano-rinforzati

Negli ultimi anni, il settore delle pavimentazioni stradali ha subito un importante sviluppo per far fronte ad un esponenziale incremento dei volumi di traffico sulle infrastrutture. Al fine di incrementare le prestazioni dei leganti e dei conglomerati bituminosi, numerosi studi sono stati compiuti su miscele innovative modificate mediante nanomateriali. In particolare, tra gli agenti nano-modificanti indagati, i nanotubi di carbonio e le nanoargille sono risultati particolarmente promettenti per il miglioramento delle prestazioni delle miscele tradizionali. Nel seguito si propone una panoramica degli studi reperiti in letteratura legati alla caratterizzazione di queste miscele innovative.

1.1.1. Conglomerati bituminosi modificati con nanoargilla

Lo studio realizzato da (Sivakumar, et al., 2016) si pone l'obiettivo di studiare il comportamento di tre miscele bituminose modificate con differenti dosaggi di nanoargilla organofila: 0,05%, 0,10 % e 0,15% rispetto alla massa del bitume. La stabilità Marshall misurata sui tre conglomerati è risultata essere più elevata rispetto al conglomerato bituminoso tradizionale di riferimento. Ancora, attraverso una prova di trazione indiretta (carico ciclico), si è riscontrato un aumento del modulo resiliente delle miscele modificate, che ha condotto ad un miglioramento del comportamento a fatica e nei confronti dell'ormaiamento del materiale. Gli autori hanno concluso che questo progresso nelle prestazioni sia dovuto a due ragioni: in primo luogo, l'aggregato dei conglomerati innovativi viene ricoperto dal legante modificato il quale permette una riduzione del contenuto di vuoti nella miscela compattata; in secondo luogo, la nanoargilla modifica la superficie degli aggregati generando un maggiore attrito tra le particelle nel conglomerato compattato, rendendo il materiale più rigido.

L'articolo elaborato da (Iskender, 2016) propone un'analisi comparativa di tre miscele bituminose in cui il filler minerale è stato sostituito con tre differenti tipologie di nanoargille, impiegate in tre diverse concentrazioni ognuna (2%, 3,5% e 5%). L'obiettivo di questo studio

è quello di valutare le prestazioni meccaniche delle miscele attraverso prove di trazione indiretta (*Indirect Tension Strength Test – ITS*) e prove di *creep* ripetute, considerando anche la suscettibilità all'umidità dei materiali attraverso l'impiego del metodo di *Lottman* modificato (AASHTO T283). Si è riscontrato un miglioramento nei confronti del danneggiamento indotto dall'umidità; in particolare per quanto riguarda la miscela contenente il 2% di nano-modificante. Ancora, i risultati sperimentali hanno dimostrato un miglioramento generale delle miscele modificate, in termini di resistenza alla fatica ed all'accumulo di deformazioni permanenti.

L'articolo proposto da (Staub De Melo, et al., 2017) analizza le caratteristiche reologiche, la resistenza a fatica e ad accumulo di deformazioni di permanenti nonché la suscettibilità al contenuto di umidità di un conglomerato bituminoso arricchito con nanoargilla organofila, in quantitativo pari al 3% del peso del bitume. La caratterizzazione reologica è stata eseguita mediante prova di flessione a quattro punti, condotta a diverse temperature e frequenza. Essa ha evidenziato un incremento del modulo dinamico della miscela modificata, risultando in un incremento della resistenza ad ormaiamento. Inoltre, le prove di carico ciclico in controllo di deformazione, hanno sottolineato anche una migliore resistenza a fatica del materiale. In ultimo, attraverso prove di trazione indiretta si è dimostrato sperimentalmente che la modifica della miscela ha ridotto la sua suscettibilità all'umidità, rispetto ad un conglomerato bituminoso tradizionale.

Nel lavoro di ricerca di (Ezzat, et al., 2016) viene svolta un'analisi volta alla caratterizzazione reologica ed empirica di leganti bituminosi modificati mediante due materiali: nanosilice e nanoargilla. La prova di penetrazione e la temperatura di rammollimento del bitume modificato con il 3% di nanoargilla ha subito rispettivamente una diminuzione ed un incremento dei valori; ancora, si è riscontrato un aumento della viscosità al viscosimetro rotazionale. Dal punto di vista reologico, le prove al *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) hanno condotto ad un incremento del *Performance Grade* sia nel caso di legante vergine che nel caso di legante invecchiato RTFOT rendendo quindi il bitume modificato più performante alle alte temperature. Si è dimostrato inoltre che aumentando il dosaggio di nanoargilla dal 3% al 7% si riscontra una diminuzione delle prestazioni del legante.

Ancora, lo studio di (Abdullah, et al., 2016) pone a confronto le prestazioni di *Warm Mix Asphalt* (WMA) modificato con nanoargille e di *Hot Mix Asphalt* (HMA). Sebbene si sia riscontrato un valore leggermente più basso di modulo resiliente relativo al WMA, i risultati ottenuti hanno sottolineato un incremento nella resistenza all'ormaiamento e una minore suscettibilità all'umidità della miscela rispetto al HMA.

In ultimo, l'analisi sperimentale di (Bonati, et al., 2013) ha indagato sulla reazione al fuoco di conglomerati bituminosi esposti ad una radiazione termica di 70 W/m^2 attraverso la prova del cono calorimetrico (ISO 5660). L'obiettivo dello studio è quello di valutare gli effetti della granulometria, della composizione del filler impiegato e della nano-modifica del legante attraverso Cloisite 20A, sul comportamento delle miscele bituminose in caso di incendio. Le prove sperimentali hanno evidenziato che l'impiego di un filler ritardante di fiamma (i.e. alluminio o idrossido di magnesio) accoppiato con la nano-modifica della miscela attraverso OMMT risulta in una drastica diminuzione di calore e rilascio di fumi tossici del conglomerato bituminoso in caso di incendio.

1.1.2. Conglomerati bituminosi modificati con nanotubi di carbonio

L'indagine sperimentale di (Ameri, et al., 2016) si pone l'obiettivo di studiare il comportamento a fatica e la resistenza a rottura di conglomerati bituminosi modificati attraverso diversi dosaggi di nanotubi di carbonio (*CNTs*). I *CNTs* sono stati additivati alla fase legante in cinque percentuali differenti, che variano da 0,2% a 1,5% rispetto alla massa del bitume. Innanzitutto, è stata condotta la caratterizzazione reologica del legante attraverso delle prove in scansione di frequenza, valutando la risposta viscoelastica lineare dei bitumi modificati. I test sono stati condotti in range di frequenza che va da 0,01 a 100 Hz, alla temperatura di 20 °C. Dai risultati sperimentali è emerso che i campioni modificati hanno evidenziato un incremento del modulo complesso, specialmente quelli contenenti i dosaggi più elevati di *CNTs*, in particolare alle alte frequenze. Ancora, per quanto riguarda l'angolo di fase l'aggiunta di *CNTs* riduce il valore di δ alle frequenze elevate, nonché dunque alle basse temperature. Ai fini della valutazione della resistenza alla frattura dei conglomerati bituminosi sono state eseguite le prove di flessione su provino semi-circolare (*Semi-Circular Bending Test – SCB Test*), ottenendo dei valori di energia di deformazione alla frattura più elevati per le miscele nano-modificate. La definizione del comportamento a fatica delle miscele innovative è stata eseguita mediante *Flexural Beam Fatigue test* impiegando un approccio basato sulla tecnica *RDEC (Ratio of Dissipated Energy Change)* attraverso la quale è stato possibile stimare il quantitativo di energia dissipata. Anche in questo caso, la resistenza a fatica dei conglomerati bituminosi modificati è risultata essere più elevata.

La modifica dei conglomerati bituminosi mediante *CNTs* è stata analizzata anche nello studio redatto da (Faramarzi, et al., 2015), indagando principalmente i metodi di miscelazione nonché le proprietà reologiche dei conglomerati. L'analisi è stata condotta su miscele caratterizzate da un dosaggio di nanomateriale variabile tra 0,1 e 1% rispetto alla massa del bitume. La caratterizzazione empirica del legante modificato ha mostrato un netto miglioramento sia nella prova di penetrazione che nel punto di rammollimento del materiale. Ancora, gli studi reologici compiuti attraverso viscosimetro rotazionale e *DSR* hanno condotto a valori di viscosità (valutati alla temperatura di 135 °C) tanto più elevati quanto maggiore è il dosaggio di *CNTs* ed inoltre, si è riscontrato un incremento ed una diminuzione rispettivamente del modulo complesso e dell'angolo di fase dei leganti modificati, alle alte temperature: questi risultati sperimentali si traducono quindi in una maggiore stabilità del bitume con *CNTs* alle alte temperature ed in un incremento della resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti del conglomerato bituminoso.

Nello stesso anno, Arabani M. e Faramarzi M. (Arabani, et al., 2015) hanno studiato l'effetto della nano-modifica attraverso *MWCNTs* dei conglomerati bituminosi attraverso la valutazione del modulo resiliente, del comportamento a fatica e nei confronti dell'ormaiamento di miscele bituminose. Il modulo resiliente è stato valutato mediante il metodo della forza di trazione indiretta (*Indirect Tensile Strength method – ITSM*) impiegando il macchinario *NAT (Nottingham Asphalt Tester)*. Attraverso il medesimo macchinario è stata valutata anche la resistenza nei confronti dell'accumulo di deformazioni permanenti, mediante una prova di carico assiale ripetuto (*Repeated Axial Load – RLA*). In entrambi i casi sono stati condotti dei test a temperature differenti e su miscele con diversi dosaggi di nanomateriale (0,1% - 0,5% - 1%). I valori più elevati di modulo resiliente, nonché la riduzione della deformazione finale nella prova *RLA* alle diverse temperature, hanno delineato un netto miglioramento nel comportamento del conglomerato bituminoso nano-modificato nei confronti dell'ormaiamento. Ancora, il comportamento a fatica, definito attraverso la prova *ITF (Indirect Tensile Fatigue)* eseguita in controllo di tensione, ha condotto ad un numero di cicli a rottura maggiore rispetto ad un conglomerato bituminoso

tradizionale per il medesimo livello tensionale imposto, grazie all'aumento della rigidità che genera minori deformazioni di trazione nel materiale innovativo. In generale quindi, le caratteristiche del conglomerato bituminoso modificato con CNTs ha subito dei miglioramenti: dal punto di vista della fatica, l'incremento più netto del numero di cicli si riscontra nella miscela con lo 0,5% di CNTs, mentre nel caso dell'ormaiamento, non vi è una differenza consistente tra il conglomerato con un dosaggio pari a 0,5% o ad 1% di nanomateriale.

Nello studio di (Galooyak, et al., 2015) si esaminano le proprietà reologiche del bitume arricchito con quantità variabile tra 0,3 e 1,5% di CNTs rispetto alla massa del bitume. Oltre ad un aumento della viscosità, si è dimostrato sperimentalmente, attraverso il DSR, che il modulo complesso G^* del legante modificato ha subito un incremento e nel contempo, l'angolo di fase è risultato inferiore: quindi, la modifica con CNTs comporta un miglioramento delle prestazioni del bitume alle alte temperature o in condizioni di traffico pesante. Inoltre, la definizione del parametro $G^*/\sin\delta$ ha permesso di identificare la miscela contenente l'1,2% di nanomateriale come la più prestante nei confronti del danneggiamento per accumulo di deformazioni permanenti.

L'articolo di (Zahedi, et al., 2017) propone uno studio delle proprietà meccaniche e reologiche di conglomerati bituminosi il cui legante è stato additivato con un dosaggio variabile tra 0,25 e 1,5% di nanotubi di carbonio. La prova di penetrazione ed il punto di rammollimento del bitume modificato hanno dimostrato una minore suscettibilità alle alte temperature della miscela. La prova Marshall, eseguita sul conglomerato bituminoso arricchito con CNTs, ha evidenziato un miglioramento sia in termini di stabilità che di scorrimento Marshall, indicando come dosaggio ottimale quello allo 0,25%. Si è osservato, inoltre, un incremento della densità delle miscele modificate e dei vuoti intergranulari riempiti dalla fase legante. In ultimo, è stata condotta anche un'analisi economica all'interno del lavoro sperimentale che ha portato a concludere che, nonostante le prestazioni superiori dei conglomerati bituminosi arricchiti con CNTs, essi dovrebbero essere impiegati in modo limitato a causa del costo parametrico del nanomateriale che rende questi materiali innovativi sconvenienti dal punto di vista economico.

In ultimo, si considera lo studio di (Santagata, et al., 2015) in cui si indaga sulle proprietà del bitume nanorinforzato con MWCNTs in dosaggio pari a rispettivamente 0,5 e 1%. Si è valutata la risposta a fatica del legante nano-modificato attraverso delle prove reologiche condotte mediante DSR, in controllo di tensione, nei tre stati di invecchiamento del bitume (vergine, invecchiato a breve termine con RTFOT e invecchiato a lungo termine mediante macchinario PAV). I risultati sperimentali hanno evidenziato che la nano-modifica del legante bituminoso ha condotto ad un miglioramento del comportamento a fatica rispetto al bitume di riferimento.

1.2. Valutazione del ciclo di vita (LCA)

La Valutazione del Ciclo di Vita, o *Life Cycle Assessment* (LCA), è una metodologia sistematica impiegata con l'obiettivo di definire l'impronta ambientale di un prodotto, un'attività o un processo. Si tratta di uno studio atto ad identificare ed analizzare i flussi di risorse ed energetici in ingresso e in uscita dal sistema, al fine di valutare le prestazioni ambientali, attraverso la stima delle emissioni nocive o degli eventuali scarti generati, durante

l'intero ciclo di vita del prodotto: dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale (Balaguera, et al., 2018).



Figura 1.1: ciclo di vita di un prodotto

La crescente attenzione nei confronti della protezione dell'ambiente e la proiezione futura verso uno sviluppo sostenibile sono i due fattori che hanno condotto al metodo *Life Cycle Assessment*. Gli studi LCA rivestono dunque una particolare importanza perché permettono di scomporre il prodotto in una serie di processi, attività e materie prime e di valutare il depauperamento delle risorse e l'entità degli impatti ambientali da essi generati, durante ogni fase del suo ciclo di vita. In questo modo, si ottiene una panoramica del sistema scomposto nelle sue singole unità di processo, che permette un'analisi microscopica ed un maggiore controllo del processo stesso, nonché la possibilità di agire in modo mirato per raggiungere delle prestazioni ambientali migliori durante i vari stadi del ciclo di vita.

Ancora, sono di particolare rilievo anche le analisi LCA di natura comparativa le quali consentono, in fase di progetto o a monte di un processo decisionale, di scegliere l'alternativa più *eco-friendly* caratterizzata dal minor carico ambientale, permettendo di muoversi verso una direzione più sostenibile.

1.2.1. Normativa LCA di riferimento: ISO 14040 – ISO 14044

La normativa di riferimento LCA è stata creata dall'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO), al fine di fornire una linea guida unificata per lo sviluppo della metodologia del *Life Cycle Assessment* (Tisberger Ibanez, et al., 2020).

Nello specifico, le norme che regolano la metodologia sono le seguenti:

- EN ISO 14040: “*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*”;
- EN ISO 14044: “*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*”.

La prima norma si propone di fornire un inquadramento teorico, metodologico ed applicativo della Valutazione del Ciclo di Vita, mentre la seconda costituisce una linea guida vera e propria del metodo esponendo, fase per fase, le prescrizioni operative e la procedura da seguire.

In accordo con le normative appena citate, lo studio LCA si compone di quattro fasi.

1. *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (Goal and scope definition)*, in cui sono definiti l'ambito di applicazione dello studio LCA, le motivazioni che portano all'esecuzione dell'analisi, nonché il sistema di prodotto indagato compreso di confini di sistema e unità funzionale di riferimento.
2. *Analisi dell'inventario (Life cycle inventory – LCI)*, include la raccolta dei dati relativi ai flussi significativi ai fini dell'obiettivo, di materiale, risorse, energia, rifiuti ed emissioni che vengono coinvolti in ogni unità di processo che costituisce il sistema di prodotto.
3. *Valutazione degli impatti del ciclo di vita (Life cycle impact assessment – LCIA)*, si pone come obiettivo quello di valutare e quantificare il potenziale impatto ambientale del ciclo di vita del sistema di prodotto, sulla base dei flussi definiti nella fase di LCI. All'interno di questa fase si prevede: l'identificazione delle categorie di impatto che si intende valutare, l'associazione dei risultati forniti dall'analisi d'inventario a specifiche categorie di impatto e la quantificazione degli impatti ambientali.
4. *Interpretazione del ciclo di vita (Life cycle interpretation)*, si tratta della fase finale dello studio LCA, in cui vengono esposti e discussi i risultati derivanti dalla LCIA o dalla LCI, o entrambe, nell'ambito del campo di applicazione e dei confini di sistema definiti, esponendo le limitazioni e le conclusioni dell'analisi nonché eventuali prescrizioni.

Si riporta in Figura 1.2 una rappresentazione schematica dell'articolazione in fasi della metodologia della Valutazione del Ciclo di Vita.

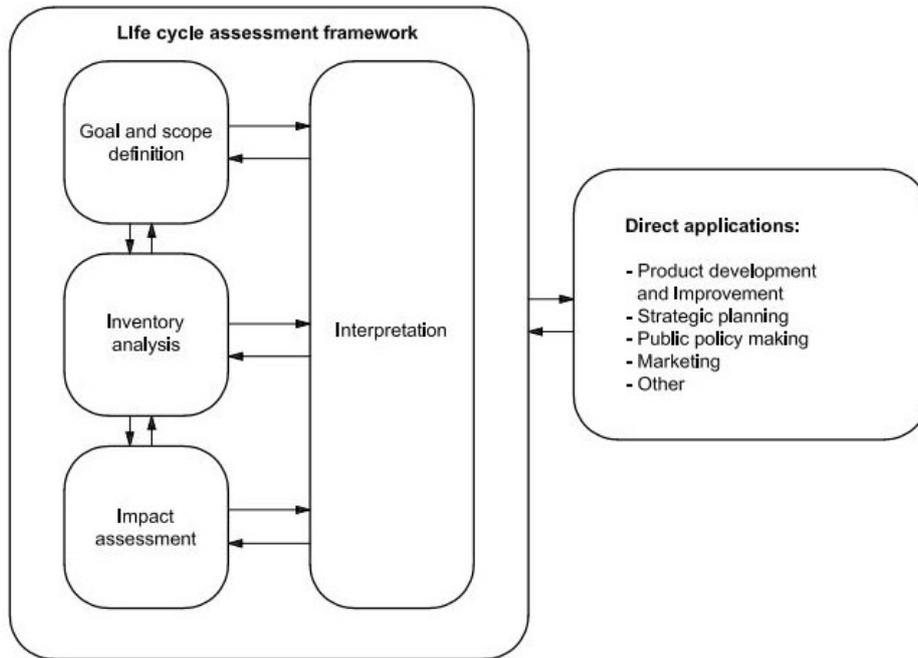


Figura 1.2: fasi della metodologia LCA

E' importante specificare che, seppur si tratti di una metodologia sistematica, esistono diversi algoritmi per condurre uno studio LCA a seconda dell'obiettivo e del campo di applicazione. In ultimo, l'approccio in esame non definisce degli impatti ambientali in termini assoluti e precisi a causa di diversi fattori:

- il potenziale impatto ambientale viene definito in termini relativi ed è riferito all'unità funzionale adottata;
- l'incertezza intrinseca dovuta alla modellazione degli impatti ambientali;
- la variabilità dei dati ambientali nel tempo e nello spazio. Tale considerazione risulta valida anche per i risultati ottenuti poiché alcuni di essi sono riferiti ad un'epoca futura.

1.2.2. Valutazione del Ciclo di Vita di pavimentazioni stradali

Il ciclo di vita di una pavimentazione stradale può essere rappresentato in cinque fasi (Celauro, et al., 2017).

1. *Acquisizione e produzione dei materiali*: questa fase coinvolge ogni singolo processo di produzione, dall'estrazione alla formazione del prodotto finale (e.g. la produzione del bitume), di tutti i materiali costituenti l'infrastruttura, considerando anche il trasporto degli stessi presso il sito di costruzione.
2. *Costruzione*: la fase di costruzione comprende tutte le attività ed i processi necessari alla costruzione della pavimentazione stradale, quali ad esempio la formazione dei singoli strati della sovrastruttura.

3. *Utilizzo*: corrisponde alla fase più lunga del ciclo di vita della pavimentazione. In questo stadio si considera il consumo energetico legato al deterioramento dell'infrastruttura (e.g. l'incremento della resistenza al rotolamento che conduce a dei consumi più elevati) e gli effetti ambientali dovuti al traffico.
4. *Manutenzione*: questa fase include tutte le opere di demolizione e smaltimento dei rifiuti, il processo di produzione dei materiali, il trasporto e la posa in opera dei nuovi strati in conglomerato bituminoso.
5. *Fine vita*: in questa fase la pavimentazione stradale ha raggiunto la fine della sua vita utile e si definisce la destinazione finale della sovrastruttura e di tutti i materiali costituenti: la ricostruzione o la demolizione integrale e l'eventuale riciclo dei materiali.

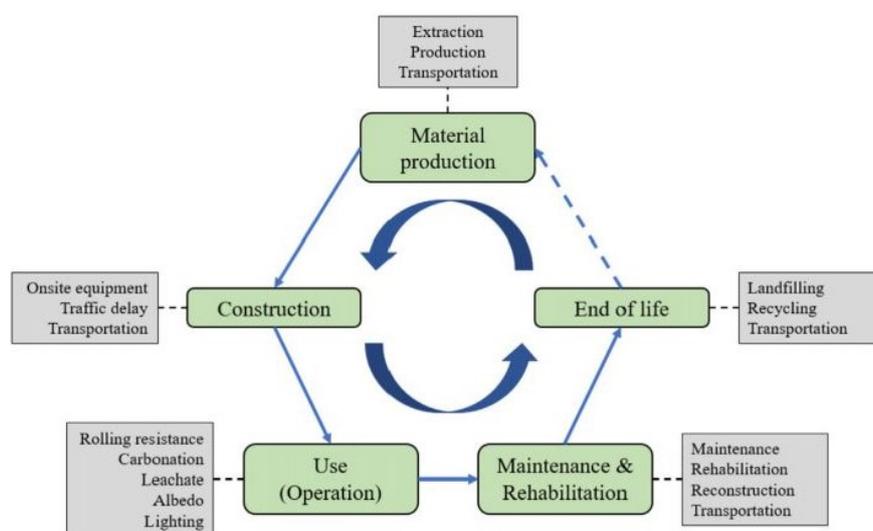


Figura 1.3: ciclo di vita di una pavimentazione stradale (Li, et al., 2019)

In funzione delle fasi considerate nello studio LCA di una pavimentazione stradale, vi sono differenti approcci che possono essere adottati nell'analisi (Li, et al., 2019):

- “*cradle-to-gate*” (dalla culla al cancello), detto anche “*cradle-to-laid*” (dalla culla alla posa): attraverso un'analisi di questo tipo si valutano unicamente le prime due fasi del ciclo di vita della sovrastruttura: l'acquisizione e la produzione dei materiali (“*cradle*”) e posa in opera della pavimentazione (“*laid*”);
- “*cradle-to-grave*” (dalla culla alla tomba): secondo questo approccio si definiscono gli impatti legati all'intero ciclo della pavimentazione: dall'acquisizione e produzione del materiale (“*cradle*”) alla fine vita della sovrastruttura (“*grave*”);
- “*cradle-to-cradle*” (dalla culla alla culla): questo corrisponde ad un approccio LCA circolare in cui nella fase di fine vita si prevede un riciclo o un riuso integrale dei materiali costituenti la pavimentazione che confluisce nella fase di acquisizione e produzione dei materiali (“*cradle*”), iniziando così un secondo ciclo di vita (Figura 1.4).

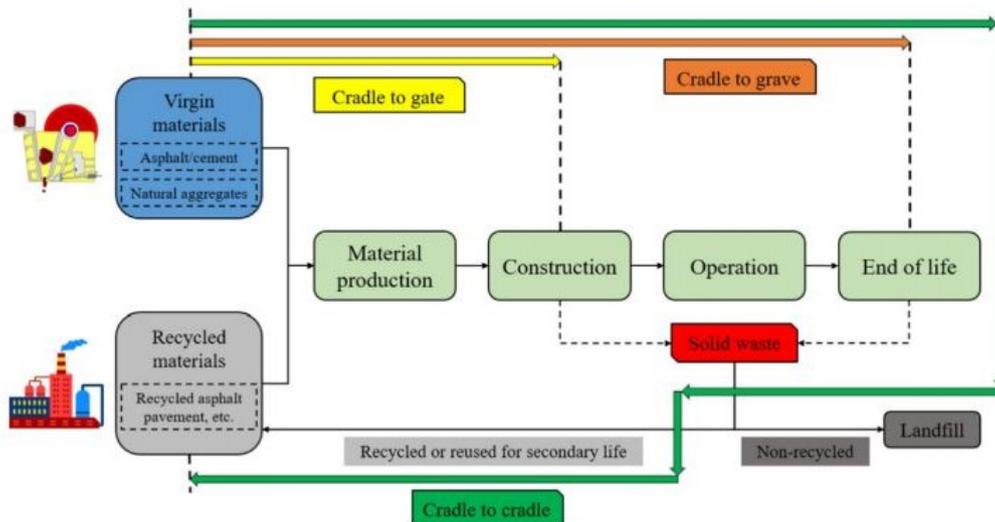


Figura 1.4: rappresentazione delle tre tipologie di approccio LCA delle pavimentazioni (Li, et al., 2019)

Le infrastrutture di trasporto sono di fondamentale importanza nella società moderna poiché costituiscono un indice di sviluppo e di benessere.

La necessità di soddisfare la crescente domanda di trasporto e la consapevolezza ecologica che conduce nella direzione della tutela dell'ambiente, hanno modificato l'approccio alla progettazione, gestione e manutenzione delle infrastrutture, riscrivendo i criteri decisionali e proiettandoli verso il concetto di sostenibilità (Celauro, et al., 2017).

La metodologia del *Life Cycle Assessment* permette di valutare l'impiego di materiali innovativi nelle pavimentazioni stradali e, più in generale nel campo dell'ingegneria civile, dal punto di vista ambientale orientando il futuro verso una direzione più *eco-friendly*.

In ultimo, vi sono diversi software e applicativi che possono essere impiegati per eseguire un'analisi LCA, quali ad esempio OpenLCA, SimaPro e PaLATE 2.0. Nel presente elaborato di tesi si è optato per l'utilizzo dell'applicativo PaLATE 2.0: *The Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*, sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università della California (Berkeley Consortium on Green Design).

CAPITOLO 2

NANOMATERIALI

Al giorno d'oggi, i nanomateriali sono presenti in ogni campo della vita umana grazie alle loro peculiari proprietà fisiche e chimiche che li rendono estremamente versatili: infatti, possono essere sintetizzati e modificati in diversi formati, a seconda della necessità e del campo di applicazione. Essi permeano l'attuale realtà tecnologica e sono presenti in ogni settore: dalle applicazioni ingegneristiche a quelle mediche, passando per l'industria della cosmesi, alimentare e non solo. La ragione per cui essi presentano queste proprietà particolari è da imputare al rapporto superficie-volume particolarmente elevato che li contraddistinguono (Sudha, et al., 2018).

La definizione di nanomateriale, come afferma il termine stesso, risiede nelle dimensioni delle particelle di quest'ultimo: infatti, secondo l'ECHA (*European Chemicals Agency*) si definisce nanomateriale, una sostanza chimica, od un materiale, composto da particelle con almeno una delle dimensioni compresa tra 1 e 100 nm (ECHA, 2014).

L'era dei nanomateriali è relativamente giovane perché nasce negli anni '80, con la scoperta del Fullerene da parte di tre ricercatori: Kroto, Smalley e Curl. Essa godette di un'ulteriore evoluzione quando Iijima sviluppò per la prima volta i nanotubi di carbonio, nel 1991. Soprattutto con l'inizio del 21esimo secolo, si assistette ad uno sviluppo e ad un interesse sempre più acceso nei rami emergenti della nanotecnologia e della nanoscienza, generando una crescita esponenziale di tali campi di studio, presente ancora oggi (Hulla, et al., 2015).

Tuttavia il concetto di nanomateriale risale a prima degli anni '80 ed è riconducibile al premio Nobel per la fisica Richard P. Feynmann. Durante gli anni '60, egli introdusse questa nozione durante una conferenza dell'American Physical Society, presentando una lezione intitolata "There's Plenty of Room at the Bottom" nella quale paventò il concetto di manipolazione della materia a livello atomico.

Al fine di ottenere una caratterizzazione unificata di riferimento, la Commissione Europea, nella Raccomandazione 2011 (Commissione, 2011), ha definito il termine "nanomateriale" come

"un materiale naturale, derivato o fabbricato contenente particelle allo stato libero, aggregato o agglomerato, e in cui, per almeno il 50% delle particelle nella distribuzione dimensionale numerica, una o più dimensioni esterne siano comprese tra 1 nm e 100 nm. In casi specifici, e laddove le preoccupazioni per l'ambiente, la salute, la sicurezza e la competitività lo giustifichino, la soglia del 50% della distribuzione dimensionale numerica può essere sostituita da una soglia compresa tra l'1% e il 50%. [...]"

Tale definizione viene utilizzata universalmente all'interno della comunità europea: dagli Stati membri, dalle agenzie dell'Unione Europea e dalle imprese.

I nanomateriali sono spesso utilizzati come *filler*, al fine di rinforzare le matrici e migliorare le proprietà meccaniche di altri materiali. In accordo con (Roes, et al., 2010), materiali come

nanotubi di carbonio, montmorilloniti (ovvero nanoargille) e nanoparticelle di silice possono essere utilizzati per rinforzare matrici polimeriche. Esempi di questa applicazione possono essere riscontrati nel polipropilene nano composito, utilizzato come pellicola per imballaggio, pellicola agricola per la pacciamatura o ancora, nei pannelli per autoveicoli (Roes, et al., 2007).

Un ulteriore esempio si può riscontrare nel calcestruzzo nanorinforzato. In questa applicazione la matrice cementizia viene arricchita con nanotubi di carbonio, i quali migliorano notevolmente le prestazioni meccaniche, nonché il modulo elastico del materiale (Konsta-Gdoutos, et al., 2019). I nanotubi di carbonio sono molto diffusi anche nel campo dell'ingegneria elettronica, ad esempio nella produzione di transistor (Niu, 2020).

Infine, come già esplicito al Capitolo 1, i nanotubi di carbonio e nanoargille sono state oggetto di diffusa ricerca anche nell'ambito delle infrastrutture. In particolare, nell'ambito delle pavimentazioni stradali, si è notato che l'aggiunta di queste componenti nel *mix design* del conglomerato bituminoso genera un miglioramento del comportamento meccanico della miscela. Infatti, lo scopo del presente studio è quello di valutare le prestazioni di queste tipologie di pavimentazioni, dal punto di vista strutturale ed ambientale.

Sebbene sia evidente che l'impiego dei nanomateriali abbia degli effetti benefici in termini di prestazioni meccaniche dei materiali compositi, essi hanno anche il potenziale di generare impatti ambientali negativi, che possono influenzare sia la salute umana che gli ecosistemi. Infatti, la produzione di nanomateriali può contribuire al cambiamento climatico, all'impoverimento dello strato di ozono stratosferico, all'eutrofizzazione, all'ecotossicità e alla tossicità (Upadhyayula, et al., 2012). Risulta quindi necessaria una valutazione ambientale della nano-produzione, al fine di stabilire le prestazioni ambientali di questi materiali ed eventualmente per sviluppare, in fase di progetto, un processo più competitivo, sicuro e compatibile dal punto di vista ambientale (Healy, et al., 2008).

Come detto in precedenza, le due tipologie di nanomateriali valutati nel presente lavoro di tesi sono: nanotubi di carbonio e nanoargille.

2.1. Nanotubi di carbonio

I nanotubi di carbonio (*CNTs*) sono cilindri cavi di carbonio, caratterizzati da un diametro dell'ordine dei nanometri ed una lunghezza variabile dalle centinaia di nanometri sino a raggiungere i micron. I cilindri consistono in fogli di grafene arrotolati a formare un tubo. Essi costituiscono la forma allotropica del carbonio scoperta per ultima in ordine di tempo. Inoltre possono avere le estremità chiuse da semisfere di tipo fullerenico.

La forma tubolare e l'energia del legame C-C, fa sì che i CNTs presentino delle proprietà meccaniche eccezionali, come il modulo di Young di circa 1 TPa e conducibilità termica di circa 2000 W/mK (Facchini).

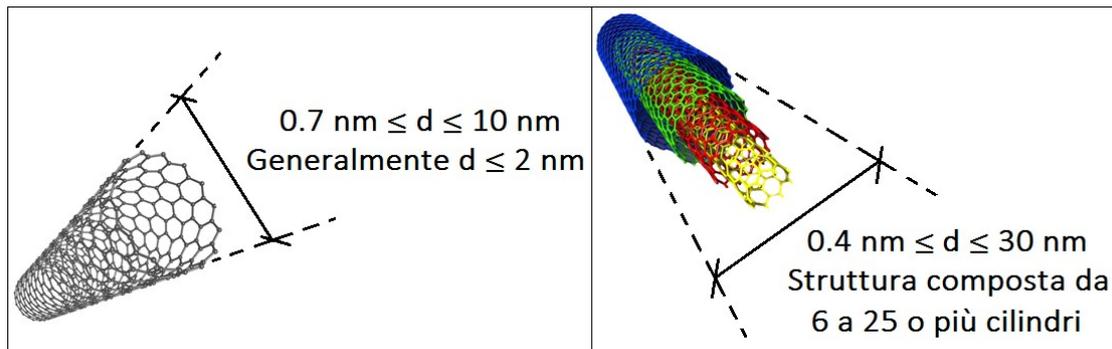


Figura 2.1: Nanotubi di carbonio a parete singola (a sinistra) e nanotubi a parete multipla (a destra)

Vi sono principalmente due tipologie di nanotubi di carbonio, le quali presentano caratteristiche e requisiti produttivi leggermente diversi, come si può notare anche da Figura 2.1.

- Nanotubi a parete singola (*SWCNTs* – *Single-Wall Carbon Nanotubes*). Essi consistono in un unico foglio di grafene arrotolato su stesso.
- Nanotubi a parete multipla (*MWCNTs* – *Multi-Wall Carbon Nanotubes*). Essi sono costituiti da più cilindri di grafene coassiali. Sono praticamente formati da due o più SWCNTs concentrici.

I nanotubi a parete multipla presentano un diametro chiaramente maggiore rispetto a quelli a parete singola ed inoltre, sono caratterizzati da una maggiore quantità di imperfezioni all'interno del loro reticolo.

Il processo produttivo dei CNTs si articola in tre fasi principali.

1. La produzione e la preparazione delle materie prime.
2. La sintesi dei nanotubi di carbonio.
3. La purificazione dei nanotubi di carbonio (se risulta necessaria).

La differenza sostanziale tra i diversi processi di produzione risiede nelle diverse tecniche di sintesi che possono essere utilizzate. Nel paragrafo successivo si eseguirà un'analisi delle principali tecniche utilizzate per la produzione di CNTs.

2.1.1. Tecniche di sintesi di CNTs

In accordo con (Kushnir, et al., 2008), i metodi di sintesi dei nanotubi di carbonio possono essere distinti in funzione della materia prima (ovvero la fonte di carbonio) che si impiega.

1. Metodi in cui la materia prima liquida o gassosa viene decomposta al fine di ottenere il carbonio atomico, come ad esempio la tecnica CVD (*Chemical Vapour Deposition*).
2. Metodi in cui la risorsa di carbonio viene vaporizzata in plasma ad alta temperatura, come ad esempio la tecnica dell'arco elettrico o dell'ablazione laser.

Considerando la “macrotipologia” di tecniche di tipo (1), la materia prima che costituisce la fonte di carbonio atomico si trova allo stato liquido o gassoso. Essa viene riscaldata

all'interno di un reattore fino alla temperatura di dissociazione diventando, dunque, fonte di atomi di carbonio. In tali processi si utilizza anche un catalizzatore, la cui funzione è quella di "assorbire" gli atomi di carbonio, i quali successivamente precipitano su un substrato e si legano a formare i nanotubi (Kushnir, 2007).

Esempi di materia prima, utilizzata nella quasi totalità di queste tecniche, sono gli idrocarburi o il monossido di carbonio.

Successivamente alla dissociazione termica, il materiale risultante costituito dal substrato, catalizzatore e carbonio in forma di nanotubi viene rimosso dal reattore al fine di eseguire il processo di purificazione.

I processi del primo tipo, in particolare la tecnica CVD, risultano essere largamente impiegati per la produzione di CNTs a livello industriale, grazie alla loro elevata resa ed efficienza. Come afferma (Kushnir, 2007), si tratta di "processi continui" che presentano diversi vantaggi per la produzione di massa, quali:

- la materia prima è largamente disponibile e facilmente reperibile. Si ricorda, infatti, che si tratta principalmente di idrocarburi (e.g. metano, toluene, acetilene) e di gas di processo come il monossido di carbonio;
- queste tecniche di sintesi sono caratterizzate da temperature di processo molto ridotte rispetto alle tecniche del tipo (2) e, richiedono di conseguenza un minor quantitativo di energia.

Le tecniche di tipo (1) per la sintesi dei CNTs sono le seguenti: *Chemical Vapour Deposition* (CVD); *High Pressure carbon monoxide Disproportionation* (HiPco); *Cobalt-Molybdenum fluidized bed CVD* (CoMoCAT).

Ognuno di questi processi è caratterizzato da materie prime differenti, come indicato in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: tecniche di sintesi dei CNTs di tipo (1), con le materie prime comunemente utilizzate per il processo

Tecnica di sintesi	Materia prima	Catalizzatore	Gas inerte	Prodotto finale
Fixed Bed CVD	Idrocarburi	Fe, Mo, Ni, Co, Fe(C ₅ H ₅) ₂	H ₂ , Ar, N ₂	SWCNTs/MWCNTs
Fluidized Bed CVD	Idrocarburi	Fe, Mo, Ni, Co, Fe(C ₅ H ₅) ₂	H ₂ , Ar, N ₂	SWCNTs/MWCNTs
Floating Catalyst CVD	Idrocarburi	Fe, Mo, Ni, Co, Fe(C ₅ H ₅) ₂	H ₂ , Ar, N ₂	MWCNTs
HiPco	CO	Fe(CO) ₅ , Fe(C ₅ H ₅) ₂	N ₂	SWCNTs
CoMoCAT	CO	Mo, Co	N ₂ , H ₂	SWCNTs

Per quanto riguarda la tipologia di tecniche di tipo (2), la sintesi dei nanotubi di carbonio si ottiene da una materia prima che si trova allo stato solido: la grafite. Essa viene vaporizzata in atmosfera inerte e la presenza del catalizzatore dipende dal prodotto finale si intende ottenere.

Il processo di vaporizzazione può essere condotto secondo diverse metodologie quali: arco elettrico, laser e reattori solari. Completata la fase di vaporizzazione, il gas inerte trasporta il prodotto finale all'esterno del reattore per la purificazione.

Queste tecniche richiedono grandi quantità di energia (*energy-intensive methods*) a causa del processo di vaporizzazione della grafite. Inoltre, la materia prima deve essere pre-lavorata

prima di essere utilizzata, affinché essa raggiunga un grado di purezza adeguato per essere sfruttata per la produzione dei CNTs. Questi metodi, quindi, non si prestano particolarmente per la produzione continua di nanotubi a causa della difficoltà nel reperire la materia prima e per il surriscaldamento (Kushnir, 2007).

Si riporta in Tabella 2.2 un prospetto delle tecniche di produzione in cui si impiega una fonte di atomi di carbonio allo stato solido.

Tabella 2.2: tecniche di sintesi dei CNTs di tipo (2), con le materie prime comunemente utilizzate per il processo

Tecnica di sintesi	Materia prima	Catalizzatore	Gas inerte	Prodotto finale
Arco elettrico	Grafite/Carbone	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	SWCNTs/MWCNTs
Ablazione laser	Grafite/Carbone	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	SWCNTs/MWCNTs
Fornace solare	Grafite/Carbone	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	MWCNTs

2.1.2. Processo di purificazione dei nanotubi di carbonio

Dopo il processo di sintesi, i nanotubi di carbonio presentano generalmente delle impurità. Esse sono prevalentemente legate alla presenza di carbonio allo stato amorfo e di particelle metalliche derivanti dal catalizzatore. A seconda del fine di utilizzo di questo materiale, esse devono essere rimosse per ottenere il grado di purezza richiesto (tipicamente si richiede un grado di purezza pari almeno al 90%) (Kushnir, 2007).

Quindi, il processo di purificazione consiste nella rimozione delle particelle di carbonio amorfo e metalliche dai nanotubi, danneggiando il meno possibile il prodotto finale.

Per quanto riguarda l'eliminazione della grafite, la tecnica più comune consiste nello sfruttare la differenza, in termini di temperatura di ossidazione, tra la grafite stessa e i nanotubi di carbonio. Il fenomeno impiegato dunque, è quello dell'ossidazione termica. Nel caso del carbonio amorfo, l'ossidazione si innesca ad una temperatura di circa 400 °C, lasciando intatti i nanotubi. Tuttavia si deve specificare che questo processo non rimuove solo impurità impurità, ma causa anche il deterioramento della struttura del nanomateriale a causa dell'introduzione dell'ossigeno in essa, riducendone la qualità.

Per l'eliminazione delle particelle metalliche, si esegue un trattamento acido del materiale, in soluzioni di acido cloridrico o acido nitrico. I nanotubi vengono immersi e mescolati con la soluzione acida mediante onde ultrasoniche. Il prodotto finale viene filtrato ed i nanotubi vengono lavati con acqua distillata e successivamente essiccati. Anche i trattamenti acidi provocano una diminuzione della qualità dei nanotubi di carbonio.

Le tecniche di purificazione presentate di cui sopra, sono quelle utilizzate più frequentemente, tuttavia ne esistono di ulteriori tipologie come ad esempio la ricottura sotto vuoto (o "*Vacuum Annealing*").

2.2. Nanoargille

Le nanoargille sono una categoria di minerali argillosi, ovvero i silicati stratificati (o silicati lamellari), che fanno parte della famiglia dei fillosilicati.

La struttura cristallina delle nanoargille è di tipo lamellare. Ognuna delle lamelle si articola in tre strati bidimensionali: si può riconoscere un “foglio” centrale ottaedrico costituito da allumina (Al_2O_3) o magnesia (MgO), il quale è legato a due strati esterni di silice tetraedrica (SiO_2) attraverso le estremità (Figura 2.2), in modo tale che gli ioni ossigeno dello strato ottaedrico facciano anche parte dei fogli tetraedrici (Alexandre, et al., 2000). Lo spessore delle lamelle corrisponde a circa 1 nm, mentre le dimensioni laterali variano da 300 Å fino a diversi micron.

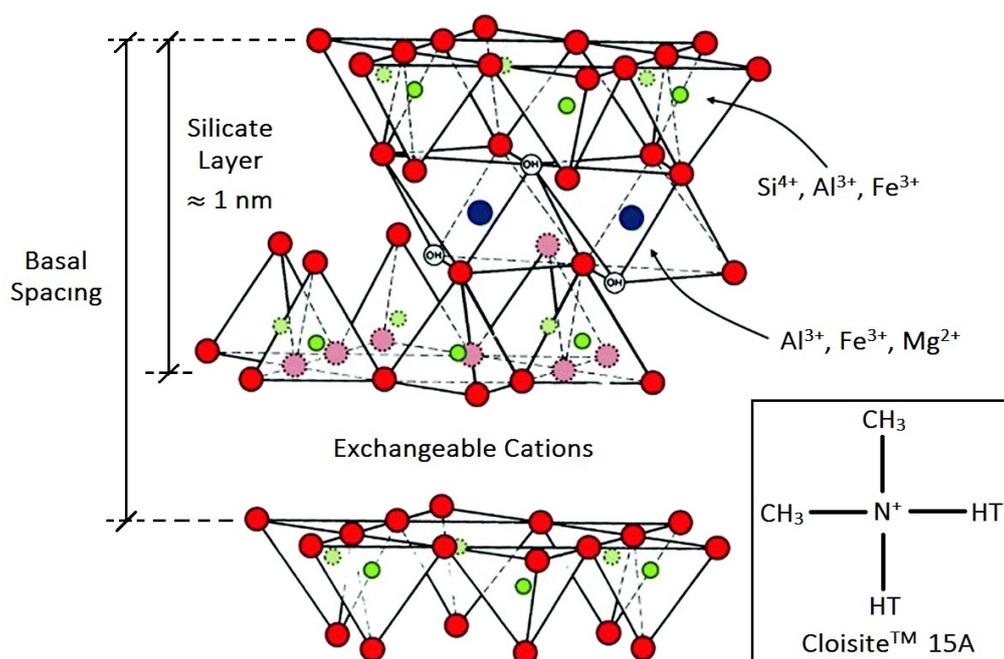


Figura 2.2: struttura della montmorillonite

Le lamelle così costituite, si articolano nello spazio in modo tale da formare delle pile, separate da regolari gap di Van der Waals, detti interstrati lamellari o gallerie.

All'interno dell'interstrato lamellare, si trovano ioni e molecole di H_2O , caratterizzati da legami di tipo ione-dipolo. Nello specifico, la presenza di ioni interlamellari è necessaria per controbilanciare la carica negativa che caratterizza le lamelle, generata a causa del fenomeno di sostituzione isomorfa degli atomi facenti parte del reticolo (e.g. il catione Si^{4+} può essere rimpiazzato dallo ione Al^{3+} ; Al^{3+} a sua volta, può essere rimpiazzato da ioni Mg^{2+} o Fe^{2+}). Al fine di ripristinare la neutralità della carica elettrica dei fillosilicati, ioni di metalli alcalini e alcalino-terrosi (e.g. Na^+ , K^+ e Ca^{2+}) si intercalano nella galleria tra le lamelle, accompagnati da molecole di acqua (Lucignano, 2009).

I fillosilicati più comuni sono la montmorillonite, la saponite e la hectorite. Si riportano queste tre tipologie di fillosilicati, con le relative formule chimiche in Tabella 2.3.

Tabella 2.3: fillosilicati comunemente impiegati, con le rispettive formule chimiche

Fillosilicato	Posizione della sostituzione isomorfa	Formula
Montmorillonite	Ottaedrica	$M_x(Al_{4-x}Mg)(Si)_8O_{20}(OH)_4$
Hectorite	Ottaedrica	$M_x(Mg_{6-x}Li)(Si)_8O_{20}(OH)_4$
Saponite	Tetraedrica	$M_x(Mg_6)(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$

Al fine di consentire una delaminazione puramente meccanica di queste strutture e di garantire inoltre una maggiore compatibilità dei fillosilicati con matrici polimeriche organiche, si può eseguire una modifica organica di questi minerali argillosi, ottenendo in questo modo, le argille organofile (*organoclay*): particolarmente diffusa è la montmorillonite organofila.

La modifica organica consiste nella sostituzione degli ioni metallici e delle molecole d'acqua interlamellari, che sviluppano un effetto legante relativamente debole, con delle catene polimeriche.

La procedura chimica secondo cui si esegue la modifica organica consiste nel rendere l'argilla, che è fortemente idrofila, un materiale organofilo. Questo si può ottenere scambiando i cationi interlamellari con surfattanti cationici come l'alchilammonio o l'alchilfosfonio.

Considerando a titolo esemplificativo la montmorillonite, essa è un'argilla anionica caratterizzata dalla presenza di ioni positivi nell'interstrato lamellare. Questi ultimi, non facendo parte del reticolo cristallino del fillosilicato ed essendo debolmente legati ad esso, possono essere rimpiazzati da altre molecole, tra cui le più comuni sono i sali d'ammonio (primari, secondari, terziari e quaternari), al fine di rendere l'argilla più compatibile con la matrice organica.

2.2.1. Tecniche di produzione delle nanoargille

Dopo aver fornito le caratteristiche generali delle nanoargille e delle *organoclay*, si intende analizzare il processo produttivo. Si farà prevalente riferimento ai fillosilicati con modifiche organiche (nello specifico *organophilic montmorillonite* – *OMMT*), poiché è la più utilizzata per il nanorinforzo dei conglomerati bituminosi.

In accordo con (Satish, 2008), il processo produttivo si articola in tre fasi.

1. Estrazione dell'argilla (*clay mining*): la montmorillonite viene comunemente reperita in depositi bentonitici, in tutto il mondo.
2. Produzione del modificatore organico: il modificatore organico più utilizzato per ottenere la OMMT, è il sale di ammonio quaternario. In questa fase, ricadono altre due lavorazioni quali la produzione di ammoniaca e la produzione di isobutilene, necessarie per la sintesi del surfattante.
3. Lavorazione dell'argilla (*clay processing*): questa fase include le lavorazioni di separazione, purificazione, delaminazione, reazione con purificatori organici, omogeneizzazione, disidratazione e riduzione delle dimensioni.

Nello step di separazione avviene il distacco dei minerali argillosi dai materiali non argillosi come quarzo, ghiaia e calcare. Tale lavorazione è eseguita attraverso un lavaggio con fanghi costituiti da acqua e argilla. In seguito, viene effettuata la delaminazione e la modificazione delle nanoargille mediante modificatori organici come il sale di ammonio quaternario. La percentuale in massa del modificatore può variare a seconda del tipo di nanoargilla che si intende ottenere: per esempio, le argille Cloisiti® OMMT della Southern Clay Products hanno un contenuto variabile di modificatore tra il 30% ed il 43% (Satish, 2008). Infine, i fanghi argillosi vengono disidratati mediante un processo di filtrazione, seguito dall'essiccazione.

Si riporta uno schema riassuntivo del processo produttivo della OMMT, in Figura 2.3.

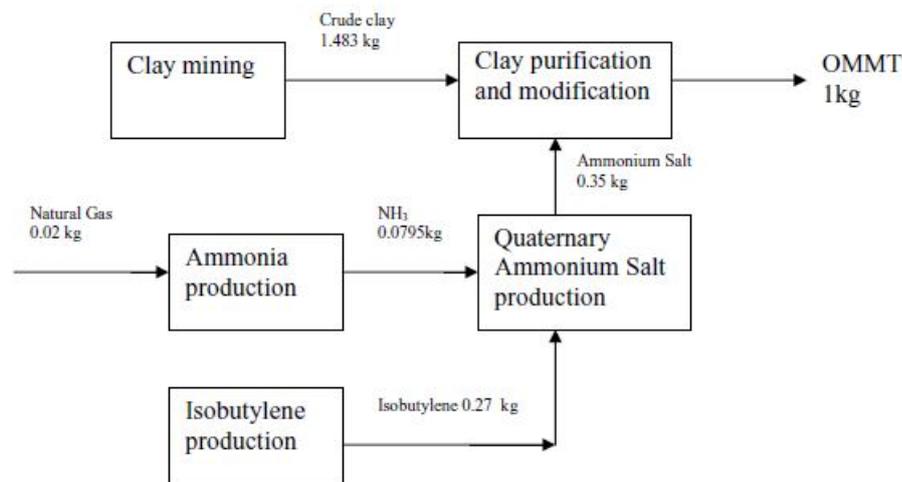


Figura 2.3: processo produttivo per la produzione di un 1 kg di OMMT (Satish, 2008)

Nei paragrafi successivi si eseguirà un'analisi ambientale di questi due nanomateriali, sulla base degli articoli e degli studi reperiti nella letteratura tecnica. Questo capitolo costituisce la base per l'analisi di inventario relativo ai nanomateriali, per i casi studio di pavimentazioni nanostrutturate che verranno analizzati in seguito.

2.3. Metodi di valutazione degli impatti ambientali

Nel presente paragrafo si intende analizzare diverse metodologie utilizzate per la fase di valutazione degli impatti del ciclo di vita (*LCIA - Life Cycle Impact Assessment*). Lo scopo di questa analisi è quello di fornire un chiarimento relativo alle diverse categorie di impatto che si riscontreranno nel paragrafo successivo, in cui è stata eseguita l'analisi degli studi ambientali dei nanomateriali considerati.

Si ricorda che la LCIA si pone come obiettivo quello di valutare e quantificare il potenziale impatto ambientale del ciclo di vita di un sistema produttivo o di un prodotto.

La struttura del processo LCIA parte dai risultati dell'analisi d'inventario, i quali vengono associati a specifiche categorie di impatto ambientale. Per ognuna di esse, si definisce

l'indicatore di categoria il quale, attraverso l'apposita unità di misura, fornisce la rappresentazione quantificata dell'impatto.

La valutazione dell'impatto del ciclo di vita si articola su due livelli, a seconda degli effetti ambientali che si intende considerare.

1. Livello *midpoint*: in questo caso la valutazione è condotta considerando gli effetti a medio termine e, le categorie di impatto sono più vicine all'intervento ambientale (Consorzio ECOSIGN). In questo livello di valutazione gli indicatori definiscono categorie di impatto come cambiamento climatico, eutrofizzazione, acidificazione ed ecotossicità.
2. Livello *endpoint*: su questo livello si esegue la valutazione dell'ultimo effetto ambientale. Gli impatti sono quantificati convertendo quelli ottenuti nel livello *midpoint* e raggruppando le categorie con effetti simili. Tale "raggruppamento" viene eseguito in funzione dei potenziali effetti finali sulle diverse aree di protezione (Areas of Protection). All'*endpoint level* gli indicatori definiscono categorie di impatto come i danni alla salute umana, i danni alla diversità dell'ecosistema e i danni alla disponibilità di risorse.

Il passaggio dall'output del LCI alle categorie di impatto quantificate a livello *midpoint* e da queste ultime a quelle *endpoint*, si esegue a mezzo di coefficienti di conversione detti *fattori di caratterizzazione* o *fattori di emissione*. Essi sono di fondamentale importanza perché permettono di normalizzare diversi flussi, di varia natura e con differente unità di misura, per aggregarli nelle diverse categorie di impatto di appartenenza.

Per maggiore chiarezza, si riporta un esempio di fattore di caratterizzazione. Si considera la categoria di impatto "cambiamento climatico", la cui unità di riferimento corrisponde a [kg CO₂ eq] (ovvero kilogrammi di CO₂ equivalente). Dall'unità di misura si può notare che l'inquinante di riferimento rispetto a cui si esprime l'impatto è l'anidride carbonica, quindi quest'ultima avrà un fattore di caratterizzazione unitario. Si considera ora un'altra sostanza, come l'ossido di diazoto (N₂O): esso è caratterizzato da fattore di emissione pari a 265. Questo significa che un kilogrammo di N₂O ha un potenziale di riscaldamento globale pari a 265 kg di CO₂ o, in altri termini, l'alterazione climatica 1 kg di N₂O, corrisponde a 265 kg di CO₂.

I metodi per eseguire la LCIA sono molti e presentano differenze principalmente in due aspetti: (i) possono contemplare solo il primo step del diagramma di flusso che conduce dalla LCI fino al livello *endpoint*, quindi estendersi fino alla quantificazione degli impatti a livello *midpoint* (e.g. metodo TRACI, metodo CML 2002), oppure prevedono una procedura completa, fino alla quantificazione delle categorie *endpoint* (e.g. metodo ReCiPe 2008); (ii) possono presentare categorie di impatto diverse, con differente nomenclatura o con diverse unità di misura.

Proprio a causa di queste differenze riscontrate durante la fase di *Life Cycle Inventory* relativo ai nanomateriali, si rende necessario il presente paragrafo. I metodi che si intendono trattare sinteticamente sono quelli riscontrati nei diversi studi analizzati.

- ReCiPe 2008 (Goedkoop, et al., 2009).
- TRACI (Bare, et al., 2002) - TRACI 2.1 (Usepa, 2012).
- USEtox (Fantke, et al., 2017).

L'analisi dei metodi di cui sopra sarà incentrata prevalentemente sulle categorie di impatto midpoint per motivare le differenze riscontrate nelle diverse fonti di dati per i nanotubi di carbonio e le nanoargille.

2.3.1. ReCiPe 2008

ReCiPe 2008 è una metodologia LCIA implementata con l'obiettivo di ottenere un unico approccio armonizzato in termini di modellazione dei principi e delle scelte da seguire per la valutazione del ciclo di vita di un prodotto o di un sistema produttivo. Questo metodo permette di ottenere dei risultati in termini di quantificazione dell'impatto su ambo i livelli di valutazione citati in precedenza (Goedkoop, et al., 2009).

Al fine quindi di costruire un unico algoritmo da utilizzare per la valutazione sui diversi livelli, la metodologia in analisi combina due differenti approcci, a seconda del livello degli indicatori di categoria considerato.

1. L'approccio alla base della valutazione degli indicatori di categoria *midpoint* corrisponde al metodo CML 2002.
2. L'approccio alla base della valutazione degli indicatori di categoria *endpoint* corrisponde al metodo Eco-indicator 99.

In seguito verranno analizzate le diverse categorie di impatto ambientale che caratterizzano l'approccio ReCiPe 2008.

2.3.1.1. Livello midpoint – ReCiPe 2008

ReCiPe 2008 contempla diverse categorie di impatto midpoint. Esse vengono indicate con le rispettive unità di riferimento, all'interno della Tabella 2.4.

Tabella 2.4: categorie di impatto *midpoint* e relative unità di riferimento – Metodo ReCiPe 2008

Categoria di impatto midpoint	Unità di riferimento
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq
Riduzione dello strato di ozono	kg CFC-11 eq
Acidificazione terrestre	kg SO ₂ eq
Eutrofizzazione delle acque dolci	kg P eq
Eutrofizzazione marina	kg N eq
Tossicità umana	kg 14DCB eq
Ossidazione fotochimica	kg NMVOC eq
Formazione di particolato	kg PM10 eq
Ecotossicità terrestre	kg 14 DCB eq
Ecotossicità delle acque dolci	kg 14 DCB eq
Ecotossicità marina	kg 14 DCB eq
Radiazioni ionizzanti	kg U235 eq
Occupazione di territorio agricolo	m ² anno
Occupazione di territorio urbano	m ² anno
Trasformazione di suolo naturale	m ² anno
Riduzione delle risorse idriche	m ³
Riduzione delle risorse minerali	kg Fe eq
Esaurimento del combustibile fossile	kg Oil eq

L'unità di riferimento di ciascuna categoria, riportata in Tabella 2.4, corrisponde all'unità di misura del relativo indicatore.

I dettagli sul significato delle varie categorie di impatto verranno esplicitati nel paragrafo successivo.

2.3.1.2. Livello endpoint – ReCiPe 2008

Le categorie di impatto *endpoint* previste dalla corrente metodologia sono in numero minore rispetto al livello precedente. Esse vengono riportate in Tabella 2.5, con le relative unità di riferimento.

Tabella 2.5: categorie di impatto *endpoint* e relative unità di riferimento – Metodo ReCiPe 2008

Categoria di impatto endpoint	Unità di riferimento	Significato unità di riferimento
Danno alla salute umana	DALY	Disability-adjusted-life-year
Danno alla diversità dell'ecosistema	PDFm ³ d	Potentially disappear fraction (of species)*anno
Danno alla disponibilità di risorse	Aumento in \$	-

Si può notare la corrispondenza tra le tre categorie endpoint elencate e tre delle quattro Aree di Protezione (*AoPs – Areas of Protection*) rappresentate da esse. Per maggiore chiarezza, si riporta un prospetto delle AoPs con le corrispondenti categorie contemplate da ReCiPe in Tabella 2.6.

Tabella 2.6: legame tra AoPs e categorie *endpoint* – Metodo ReCiPe 2008

Area di protezione	Categoria di impatto <i>endpoint</i>
Salute umana	Danno alla salute umana
Ecosistemi	Danno alla diversità dell'ecosistema
Risorse	Danno alla disponibilità di risorse
Ambiente artificiale	-

2.3.1.3. Connessione tra i diversi livelli di valutazione

Come detto in precedenza, i risultati dell'analisi d'inventario vengono collegati con le categorie di impatto *midpoint* attraverso i fattori di caratterizzazione. La stessa procedura, ma con fattori diversi, si esegue per la valutazione dell'impatto a livello *endpoint*, partendo da quello *midpoint*.

Entrambi i passaggi sono caratterizzati da una preliminare operazione di “raggruppamento”, in funzione del potenziale impatto ambientale che ogni flusso di materia/energia, all'interno del processo produttivo, può causare. Per esempio, per quanto riguarda la categoria di impatto “cambiamento climatico”, è noto che l'emissione di diverse sostanze concorrono a tale fenomeno (e.g. N₂O, CO₂, ecc.); questo significa che all'interno di un processo produttivo, ci sono diversi flussi che concorrono allo stesso impatto ambientale. Quando tutti i flussi sono stati identificati, essi vengono raggruppati nelle categorie di pertinenza e si applicano i fattori di caratterizzazione per convertirli nella stessa unità di misura. Allo stesso modo avviene il passaggio tra le categorie di impatto livello *midpoint* e quelle *endpoint*.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 2.4 il diagramma di flusso relativo alla categoria cambiamento climatico, al fine di una migliore comprensione.

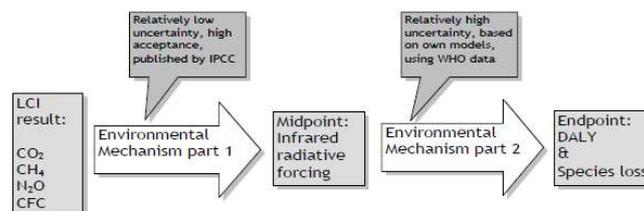


Figure 1.1: Example of a harmonised midpoint-endpoint model for climate change, linking to human health and ecosystem damage.

Figura 2.4: connessione tra i livelli di valutazione per la categoria “cambiamento climatico” (Goedkoop, et al., 2009)

Si può notare dallo schema in Figura 2.4, come l'indicatore di categoria a livello *midpoint* sia definito come “Infrared radiative forcing” ed espresso in termini di [kg CO₂ eq], mentre per quanto riguarda la valutazione a livello *endpoint*, si considerano due indicatori quali il danno alla salute umana e il danno alla diversità dell'ecosistema.

L'ultimo aspetto da analizzare per ottenere una panoramica completa del metodo ReCiPe 2008 è quello relativo all'incertezza dei modelli di caratterizzazione. Le relazioni modellate tra i diversi livelli di impatto rappresentano una fonte di incertezza perché, la conoscenza dei meccanismi ambientali che coinvolgono il cambiamento climatico, l'eutrofizzazione, l'acidificazione, ecc. è ridotta. A tal proposito, all'interno di questo metodo sono definiti tre differenti scenari, in cui si sono eseguite differenti assunzioni (Goedkoop, et al., 2009).

1. “*Individualist (I)*”: questa prospettiva è basata sugli interessi a breve termine, sulle tipologie di impatto indiscusse e su un ottimismo tecnologico per quanto riguarda l’adattamento umano.
2. “*Hierarchist (H)*”: questo scenario si basa sui principi prevalentemente normativi.
3. “*Egalitarian (E)*”: questa è la prospettiva maggiormente a favore di sicurezza, la quale considera gli interessi a lungo termine.

Il valore dei fattori di caratterizzazione dipende dal tipo di scenario che si assume durante l’analisi ambientale.

2.3.2. Metodo TRACI

TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) è una metodologia di valutazione dell’impatto ambientale sviluppata dall’Agenzia Statunitense per la Protezione dell’Ambiente U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*). Questo algoritmo è stato sviluppato per metriche sostenibili, per la valutazione dell’impatto del ciclo di vita, per lo sviluppo dell’ecologia industriale e per la valutazione dell’impatto del processo di progettazione. Il fine è quello di sviluppare prodotti, processi, strutture, aziende comunità sempre più sostenibili (Usepa, 2012).

L’analisi di questa metodologia sarà più breve rispetto al metodo ReCiPe 2008, perché i principi di base, il diagramma di flusso nonché le procedure operative da adottare per la quantificazione dei potenziali impatti ambientali sono le medesime. Le differenze sostanziali tra questi due metodi sono le seguenti.

1. L’algoritmo TRACI consente la valutazione dell’impatto del ciclo di vita solo a livello *midpoint*, mentre l’approccio ReCiPe permette di eseguire una valutazione su ambo i livelli.
2. Alcune categorie di impatto a livello *midpoint* sono caratterizzate da differenti unità di riferimento nei due metodi.

E’ importante specificare che questa metodologia è stata sviluppata specificamente per gli Stati Uniti, impiegando parametri di input coerenti con le località statunitensi per le categorie di impatto contemplate e riportate in Tabella 2.7 (GreenDelta, 2016).

Durante l’analisi di inventario relativo ai nanotubi di carbonio, si sono riscontrate due versioni diverse del corrente algoritmo: TRACI 2.1 (Usepa, 2012), nonché la versione più recente; la versione 2002, con riferimento all’articolo (Bare, et al., 2002). Esse differiscono principalmente nelle unità di riferimento delle categorie di impatto analizzate.

2.3.2.1. TRACI 2002

La metodologia in esame contempla un numero inferiore di categorie di impatto *midpoint*, rispetto al metodo ReCiPe 2008. Esse vengono indicate, con le rispettive unità di riferimento, in Tabella 2.7.

Tabella 2.7: categorie di impatto *midpoint* e relative unità di riferimento – Metodo TRACI 2002

Categoria di impatto midpoint	Unità di riferimento
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq
Riduzione dello strato di ozono	kg CFC-11 eq
Acidificazione	moli H ⁺ eq
Eutrofizzazione	kg N eq
Formazione di smog	kg NO _x eq
Particolato - Salute umana (HH)	kg PM2,5 eq
Cancro - Salute umana (HH)	kg BENZENE eq
Non cancro - Salute umana (HH)	kg TOLUENE eq
Ecotossicità	kg 2,4D eq
Impiego delle risorse idriche	m ³

Si ricorda che, anche in questo caso, saranno necessari i fattori di caratterizzazione per seguire il diagramma di flusso dell' algoritmo ed ottenere una stima degli oneri ambientali, come indicato in Figura 2.5.

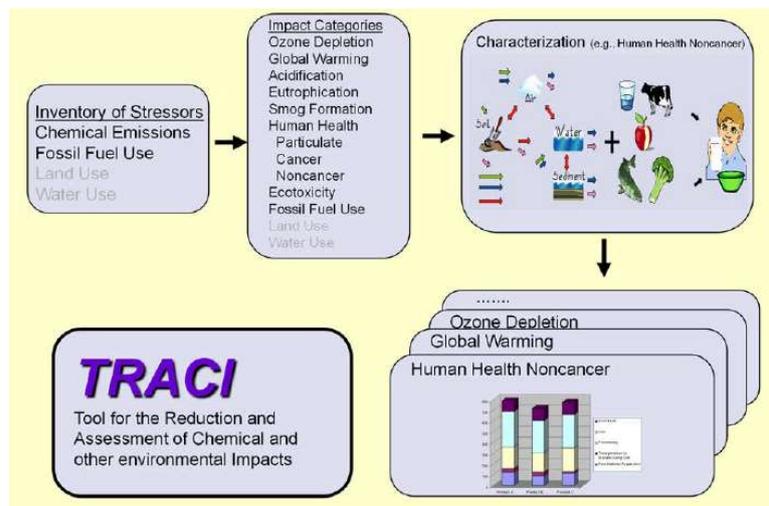


Figura 2.5: diagramma di flusso – Metodo TRACI

I fattori di caratterizzazione sono valori tabulati, stabiliti dall'Agenzia Statunitense di Protezione dell'ambiente.

2.3.2.2. TRACI 2.1

Il metodo TRACI 2.1 corrisponde alla versione più aggiornata sviluppata dall'U.S. EPA. Le caratteristiche operative sono uguali alle versioni precedenti tuttavia cambiano le categorie di impatto, in termini di unità di riferimento. Ne si riporta il prospetto dettagliato in Tabella 2.8.

Tabella 2.8: categorie di impatto *midpoint* e relative unità di riferimento – Metodo TRACI 2.1

Categoria di impatto midpoint	Unità di riferimento
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq
Riduzione dello strato di ozono	kg CFC-11 eq
Acidificazione	kg SO ₂ eq
Eutrofizzazione	kg N eq
Formazione di smog	kg O ₃ eq
Particolato - Salute umana (HH)	kg PM _{2,5} eq
Cancro - Salute umana (HH)	CTUcancer
Non cancro - Salute umana (HH)	CTUoncancer
Ecotossicità	CTUe

2.3.3. Metodo USEtox

USEtox è un modello per la caratterizzazione e la valutazione degli impatti ambientali sulla salute umana ed eco-tossicologici dovuti alle emissioni di sostanze chimiche durante il ciclo di vita di un prodotto. L'output principale di questo approccio corrisponde al database dei fattori di caratterizzazione per la valutazione dei danni alla salute umana e alle acque dolci a causa delle emissioni di agenti contaminanti in aria di ambienti interni, aria di ambiente urbano e rurale, in acque dolci e suolo agricolo (Fantke, et al., 2017).

Anche in questo caso, i principi operativi per la quantificazione degli impatti sono i medesimi decritti nei paragrafi precedenti.

2.3.3.1. Livello midpoint - USEtox

Il metodo USEtox copre un numero molto inferiore di categorie di impatto rispetto ai due algoritmi precedenti. Esse sono riportate in Tabella 2.9, con le relative unità di riferimento.

Tabella 2.9: categorie di impatto *midpoint* e relative unità di riferimento – Metodo USEtox

Categoria di impatto midpoint	Unità di riferimento
Tossicità umana - Cancro	CTUh
Tossicità umana - Non cancro	CTUh
Tossicità umana - Totale	CTUh
Ecotossicità delle acque dolci	CTUe

Si può notare da Tabella 2.9 che tutte le categorie di impatto sono quantificate attraverso l'approccio *Comparative Toxic Unit* (CTU). Per quanto riguarda la tossicità umana, il CTU corrisponde all'aumento di morbilità nella popolazione umana totale, nel caso si consideri la tossicità umana, ovvero [CTUh] (Fantke, et al., 2017). Quindi in accordo con (Fantke, et al., 2017)

CTUh = numero totale di casi di malattia (cancerogena o non cancerogena)

Nel caso in cui si consideri l'ecotossicità delle acque dolci, [CTUe] corrisponde alla stima della frazione di specie potenzialmente affetta (PAF), integrata su un determinato intervallo di tempo e di volume.

I relativi fattori di caratterizzazione si misurano in CTUh/CTUe per unità in massa di sostanza chimica emessa [CTU/kg di sostanza emessa].

2.3.3.2. Livello endpoint - USEtox

Per quanto riguarda il livello di valutazione *endpoint*, si considerano solo due categorie di impatto nell'ambito di questo metodo, sulla base dell'approccio del *Comparative Damage Unit* (CDU).

Le categorie di impatto previste in questo metodo sono le seguenti.

- Danno alla salute umana. L'unità di riferimento di questa categoria è [CDUh] e si valuta a partire dalle categorie *midpoint* legate all'area di protezione della salute umana.
- Danno alla qualità dell'ecosistema. L'unità di riferimento di questa categoria è [CDUe] e si valuta a partire dalle categorie *midpoint* legate all'area di protezione relativa alla salvaguardia dell'ecosistema.

Si ricorda infine che anche in questo caso, il passaggio da livello *midpoint* a livello *endpoint*, si esegue a mezzo di appositi fattori di caratterizzazione, forniti dal modello USEtox, per ogni tipologia di sostanza emessa.

2.3.4. Categorie di impatto

Per maggiore chiarezza, all'interno del presente elaborato si include una breve descrizione delle categorie di impatto principalmente impiegate nelle analisi LCA, a livello *midpoint*.

2.3.4.1. Cambiamento climatico

La categoria di impatto "cambiamento climatico" si riferisce al potenziale cambiamento climatico della Terra causato dall'effetto serra. Questo fenomeno è causato dall'emissione di gas serra come i clorofluorocarburi (CFC), gli idroclorofluorocarburi (HCFC), il metano (CH₄) e l'anidride carbonica (CO₂).

Questa categoria di impatto ambientale è comune a tutti i metodi analizzati (dove essa è prevista) ed è caratterizzata dalla stessa unità di riferimento [kg CO₂eq]. I fattori di caratterizzazione prendono il nome di potenziale di riscaldamento globale (GWP) e vengono espressi in riferimento ad un orizzonte temporale definito: il più comune corrisponde a 100 anni. L'unità di misura dei GWP corrisponde a [kg CO₂ eq/ kg di sostanza emessa].

2.3.4.2. Riduzione dello strato di ozono stratosferico

La riduzione dello strato di ozono stratosferico è generata dalle emissioni di sostanze gassose dannose per l'ozono che ne causano la distruzione delle proprie molecole. Questo causa l'assottigliamento dello strato di ozono atmosferico, noto anche come "buco dell'ozono". I composti clorurati e bromurati sono le sostanze responsabili di questo fenomeno. I CFC, gli

HCFC e il BFC (bromoclorodifluorometano) sono i principali agenti l'impoverimento di ozono.

I danni allo strato di ozono riducono la capacità di filtrare la radiazione UV da parte dell'atmosfera, permettendo il passaggio di una maggiore quantità di raggi ultra-violetti B (UVB). La radiazione UVB genera potenzialmente casi di tumore alla pelle e cataratta, oltre che avere effetti negativi sulle colture, sulla fauna marina e sui materiali (Bare, et al., 2002).

Anche in questo caso, questa categoria è considerata sia nel metodo ReCiPe 2008, che nel metodo TRACI. Essa è caratterizzata dalla medesima unità di riferimento [kg CFC-11 eq].

I fattori di caratterizzazione prendono il nome di potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) e sono espressi in [kg CFC-11 eq/kg di sostanza emessa].

2.3.4.3. Acidificazione

La categoria di impatto dell'acidificazione corrisponde al processo chimico per cui si assiste ad un aumento dell'acidità di acqua e suolo. Gas acidi come il diossido di zolfo (SO_2), reagiscono con l'acqua in atmosfera generando "piogge acide", un processo noto come deposizione acida. Questo fenomeno provoca un deterioramento dell'ecosistema di grado variabile. Tra i gas responsabili della deposizione acida si trovano l'ammoniaca (NH_4), gli ossidi di azoto (NO_x) e gli ossidi di zolfo (SO_x).

Per questa categoria, le unità di riferimento variano a seconda del metodo, come si può notare da Tabella 2.4, Tabella 2.7 e Tabella 2.8.

I fattori di caratterizzazione prendono il nome di potenziale di riduzione di acidificazione (AP).

2.3.4.4. Eutrofizzazione

L'eutrofizzazione è un fenomeno che si verifica negli ambienti acquatici, in cui si assiste ad un aumento di concentrazione di sostanze nutritive. Esso stimola ed accelera la produttività biologica come la crescita di alghe e altre piante acquatiche. Questo fenomeno può portare ad una serie di conseguenze quali cattivo odore, avvelenamento o morte dei pesci, riduzione della biodiversità acquatica, produzione di sostanze chimiche tossiche per gli umani, mammiferi marini o per il bestiame.

Le sostanze che concorrono al fenomeno dell'eutrofizzazione acquatica sono principalmente i nitrati, l'ammoniaca, ossidi di azoto e fosforo rilasciati in aria o in acqua.

A seconda della tipologia di ambiente acquatico (marino o di acqua dolce), si impiegano diverse unità di riferimento per la quantificazione di questi impatto, come indicato in Tabella 2.4.

I fattori di caratterizzazione prendono il nome di potenziale di riduzione di eutrofizzazione (NP).

2.3.4.5. Ossidazione fotochimica

Il fenomeno di ossidazione fotochimica considera la concentrazione di ozono sulla superficie terrestre, detto anche "ground level ozone". Al contrario dell'ozono che si trova nella stratosfera, quello che si trova sulla superficie terrestre risulta tossico per l'essere umano, se in alte concentrazioni.

L'ozono fotochimico si forma dalla reazione tra sostanze organiche volatili (*VOC – Volatile Organic Compounds*) e gli ossidi di azoto, in presenza di calore e luce solare.

Questa categoria di impatto ambientale è legata principalmente alle quantità di monossido di carbonio (CO), diossido di zolfo (SO₂), monossido di azoto (NO), ammonio e di NMVOC (*Non-Methane Volatile Organic Compound*).

Le unità di riferimento sono diverse a seconda del metodo.

2.3.4.6. Formazione di particolato

Il particolato corrisponde ad un complesso agglomerato di sostanze organiche ed inorganiche, le cui particelle sono caratterizzate da un diametro massimo pari a 10 µm (PM10). Il PM10 causa problemi di salute specialmente di natura respiratoria, perché raggiunge la parte superiore delle vie aeree e dei polmoni quando viene inalato. Comunque gli effetti sulla riduzione delle aspettative di vita, sono attribuiti al PM2,5 (Goedkoop, et al., 2009).

L'inquinamento da particolato è costituito da una considerevole quantità di sostanze come gli acidi (e.g. nitrati e solfati), sostanze chimiche organiche, metalli e particelle di suolo o di polvere.

2.3.4.7. Radiazione ionizzante

Questa categoria di impatto ambientale considera i danni recati alla salute umana ed agli ecosistemi causati dalle emissioni di radionuclidi, attraverso il ciclo di vita di un prodotto o di un edificio (e.g. elettricità prodotta mediante energia nucleare).

Nella radiazione ionizzante si includono le radiazioni di tipo α , β , γ ed i neutroni. Questa particolare categoria di impatto viene impiegata solo all'interno del metodo ReCiPe 2008 e la sua unità di misura è kilogrammi di uranio-235 equivalente [kg U235 eq].

2.3.4.8. Ecotossicità

La valutazione dell'ecotossicità, o tossicità ambientale, tiene conto della destinazione, dell'esposizione e degli effetti tossici di una determinata sostanza sull'ambiente. Questa categoria può essere suddivisa in tre differenti elementi quali acqua dolce, ambiente marino e ambiente terrestre.

L'ecotossicità può essere valutata con unità di misura diverse, a seconda del metodo utilizzato, come si può evincere da Tabella 2.7, Tabella 2.8 e Tabella 2.9.

2.3.4.9. Tossicità umana

Il potenziale di tossicità umana corrisponde ad un indice che riflette il potenziale danno causato dal rilascio nell'ambiente di una unità in massa di una determinata sostanza chimica. Esso si basa sia sulla tossicità intrinseca di un composto, che sulla sua potenziale dose. Queste sostanze quali ad esempio arsenico, bicromato di sodio e fluoruro di idrogeno, sono generate per la maggior parte dalla produzione di energia elettrica mediante combustibili fossili. Queste emissioni sono pericolose per l'uomo, se vengono inalate, ingerite od in alcuni casi anche toccate.

2.3.4.10. Occupazione del suolo

La categoria di impatto dovuto all'occupazione del suolo riflette il danno recato all'ecosistema, causato dall'occupazione e dalla trasformazione del suolo. Al fine della quantificazione di questa categoria, si pone l'attenzione su due meccanismi:

1. Occupazione di un'area di terra per un determinato periodo.
2. Trasformazione di una certa area di terreno.

All'interno della voce di occupazione del suolo si possono distinguere le seguenti categorie:

- Occupazione del suolo agricolo
- Occupazione del suolo urbano
- Trasformazione del suolo naturale

Tutti gli aspetti appena citati incidono negativamente sulla biodiversità, generandone una diminuzione.

Queste categorie sono tutte caratterizzate dalla medesima unità di misura [m^2 anno].

2.3.4.11. Riduzione delle risorse

In questa macrocategoria vi sono diversi "sotto-impatti" che devono essere considerati. In linea generale, si fa riferimento al consumo di sostanze non biologiche, come i combustibili fossili, i minerali, i metalli e l'acqua.

Il valore del consumo di una risorsa corrisponde alla misura della scarsità della sostanza stessa. Ciò significa che dipende dalla quantità di risorse disponibili e dal tasso di estrazione delle stesse.

2.4. Analisi dei dati: casi studio presenti in letteratura

Il presente paragrafo ha l'obiettivo di eseguire un'analisi degli studi presenti in letteratura, relativi alla valutazione ambientale di nanotubi di carbonio e nanoargille.

Il fine della ricerca bibliografica è stato quello di ottenere degli ordini di grandezza degli impatti relativi alla produzione dei nanomateriali in esame e di implementare la valutazione ambientale per i materiali stradali innovativi considerati.

E' stata eseguita una ricerca approfondita su diversi database (ScienceDirect, ACS Journals, SpringerLink, IEL-IEEE, Wiley Blackwell) e sul web al fine di reperire diversi articoli, saggi scientifici e tesi, il cui oggetto di studio coinvolgesse il *Life Cycle Assessment* dei nanotubi di carbonio delle nanoargille. Sono stati reperiti in totale 12 articoli che trattano l'argomento e che forniscono dei dati numerici legati alle emissioni ed ai consumi energetici: otto di questi studi trattano i nanotubi di carbonio, due trattano le nanoargille ed infine, uno tratta ambo i nanomateriali.

Al fine di seguire un approccio unificato nell'analisi di tutti gli articoli, oltre ai risultati numerici forniti, il confronto tra i diversi studi considera diversi aspetti chiave quali: l'unità funzionale, i confini di sistema, il ciclo di vita dei nano-prodotti, la scala produttiva, l'anno di pubblicazione dell'articolo (tempo dipendenza) e il posto in cui esso è stato pubblicato (spazio dipendenza).

Si precisa che la quantità di informazioni riscontrate per i nanotubi di carbonio è molto maggiore rispetto a quella relativa alle nanoargille. Per questo motivo, la trattazione principale riguarderà i CNTs.

2.4.1. Unità funzionale

L'unità funzionale impiegata nei diversi studi LCA è un aspetto molto importante perché corrisponde all'unità di riferimento sulla base della quale vengono espressi gli impatti ambientali generati dai diversi flussi di produzione.

Negli studi analizzati tipicamente è stata considerata un'unità funzionale pari ad 1 kg di prodotto. Tuttavia, si è riscontrato anche l'utilizzo di unità di riferimento pari a 300 mg (Griffiths, et al., 2013) ed 1 g (Singh, et al., 2008), per cui si è resa necessaria una normalizzazione dei diversi impatti ambientali per riferirli ad un'unità funzionale comune, pari ad 1 kg.

2.4.2. Confini di sistema

Un altro aspetto importante, che influenza in modo marcato l'entità degli impatti, è il confine di sistema considerato. In questo caso si è riscontrata omogeneità in quasi la totalità degli articoli, nei quali è stato adottato un approccio *cradle-to-gate*, ossia dall'estrazione della materia prima alla produzione del prodotto finale.

2.4.3. Processo produttivo

Il processo produttivo ricopre un ruolo fondamentale nell'analisi ambientale perché in funzione esso verranno impiegate materie prime, quantitativi di energia e di risorse differenti.

Dal punto di vista tecnico, come enunciato al Paragrafo 2.1, vi sono diverse soluzioni per la sintesi dei nanotubi di carbonio. A tal proposito, si è notato che il campo dei CNTs è oggetto di particolare interesse per lo studio delle implicazioni ambientali legate alle diverse tecniche di produttive.

Al contrario, per quanto riguarda le nanoargille si è riscontrata una scarsità di dati. E' stata posta particolare attenzione sulla montmorillonite, ma senza specificare in modo dettagliato il processo produttivo adottato, ad eccezione dell'articolo di (Satish, 2008).

Si può concludere che, sulla base delle considerazioni di cui sopra e sulla base del numero di articoli reperiti, si potrà condurre un'analisi più accurata nei riguardi dei nanotubi di carbonio, evidenziando le differenze ambientali dipendenti dai processi di produzione impiegati.

2.4.4. Scala di produzione

Considerando le scale di produzione adottate nei diversi studi, questi ultimi possono essere suddivisi in due categorie distinte.

1. Le analisi in cui la produzione dei nanomateriali è stata studiata su scala di laboratorio (articoli 1, 3, 4, 5 ,6, 9, 10, 12 riportati in Tabella 2.10).
2. Le analisi in cui la produzione dei nanomateriali è stata studiata su scala industriale.

Un'ulteriore considerazione legata alla scala di produzione può essere fatta, considerando che in alcuni articoli, i nanomateriali sono stati prodotti per specifiche applicazioni, come ad esempio la montmorillonite prodotta per essere utilizzata come filler in una matrice polimerica (Satish, 2008). In altri casi, lo studio LCA è volto unicamente all'analisi degli impatti ambientali legati ai nanomateriali ed al loro sistema produttivo, senza considerare un'applicazione specifica di essi: un esempio lo si riscontra nell'articolo di (Gavankar, et al., 2014) o di (Kushnir, et al., 2008).

2.4.5. Spazio-dipendenza e tempo-dipendenza

La dipendenza dallo spazio e dal tempo, come anche la scala di produzione, sfociano tutte direttamente nel livello di maturità dei processi produttivi dei nanomateriali. Un'indagine che si incentra su questi aspetti è stata riscontrata nell'articolo di (Gavankar, et al., 2014).

Al fine di identificare la spazio e la tempo-dipendenza, si sono considerati rispettivamente l'anno di pubblicazione degli articoli e il paese dell'istituzione universitaria di cui fanno parte il gruppo di ricerca. Quest'ultima assunzione è stata eseguita perchè spesso la scala di produzione coincide con quella di laboratorio, quindi si suppone essere all'interno della struttura universitaria. Tuttavia, nei casi in cui la produzione è risultata essere a livello industriale, la localizzazione dell'impianto non è stata fornita, quindi analogamente, si assume la posizione dell'ente di ricerca come riferimento.

2.4.6. Metodi LCIA impiegati

Come detto in precedenza, i metodi LCIA riscontrati negli articoli sono diversi e ciò determina una differenza in termini di categorie di impatto, unità di misura e indicatori ambientali. Tutti i metodi utilizzati negli articoli sono stati presentati al Paragrafo 2.3.

Si riporta in Tabella 2.10 un prospetto generale degli articoli analizzati, in cui si specifica il tipo di analisi condotta, il confine di sistema, il nanomateriale trattato, l'unità funzionale, gli impatti considerati nella valutazione, nonché il metodo impiegato ed infine la scala produttiva.

Tabella 2.10: prospetto degli articoli analizzati

Codice articolo	Studio	Tipo studio	Confine di sistema	Nanomateriale	Unità funzionale	Valutazione dell'impatto ambientale	Scala produttiva
1	Trompeta, et al., 2016	Analisi LCA	Cradle-to-gate	MWCNTs	1 kg	ReCiPe 2008 - Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Laboratorio
2	Wu, et al., 2020	Analisi LCA	Cradle-to-gate	MWCNTs	1 kg	TRACI 2.1 - Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Industriale
3	Kushnir, et al., 2008	Analisi energetica	Cradle-to-gate	SWCNTs MWCNTs	1 kg	Solo analisi energetica	Laboratorio riscaldato a produzione industriale
4	Griffiths, et al., 2013	Analisi LCA	Cradle-to-gate	MWCNTs	300 mg	ReCiPe 2008 - Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Laboratorio
5	Teah, et al., 2020	Analisi LCA	Cradle-to-gate	SWCNTs	1 g	Cambiamento climatico ed impatto energetico	Laboratorio
6	Roes, et al., 2010	Analisi LCA	Cradle-to-grave	SWCNTs MWCNTs OMMT	1 kg	Cambiamento climatico ed impatto energetico	Laboratorio riscaldato a produzione industriale
7	Hischier, et al., 2012	Confronto studi nanomateriali	-	SWCNTs MWCNTs OMMT	-	-	-
8	Upadhyayula, et al., 2012	Confronto studi nanomateriali	-	SWCNTs MWCNTs OMMT	-	-	-
9	Singh, et al., 2008	Analisi LCA	Cradle-to-gate	SWCNTs	1 g	TRACI (2002) - Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Laboratorio
10	Gavankar, et al., 2014	Analisi LCA	Cradle-to-gate	SWCNTs	1 kg	TRACI (2002) - Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Laboratorio/ Industriale
11	Joshi, 2008	Analisi LCA	Cradle-to-gate	OMMT	1 kg	Nessun metodo specificato. Vari indicatori midpoint ed impatto energetico	Industriale
12	Schrijvers, et al., 2014	Analisi LCA	Cradle-to-gate	OMMT	1 kg	Cambiamento climatico ed impatto energetico	Laboratorio riscaldato a produzione industriale

Si procede dunque con l'analisi dei dati numerici reperiti all'interno degli articoli, eseguendo un confronto tra le diverse tecniche di produzione impiegate e tra le diverse tipologie di nanomateriali.

Prima di iniziare l'analisi, si deve specificare che la criticità causata dall'impiego di metodi LCIA differenti, non ha permesso di ottenere delle quantità sempre confrontabili a causa della diversa unità di riferimento o diversa categoria di impatto: si considereranno, quindi, le gli impatti comuni ai vari studi per trarre delle conclusioni.

2.4.7. Nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNTs)

Nel presente paragrafo si intende valutare come variano gli impatti ambientali per la produzione dei MWCNTs, in funzione della tecnica di sintesi.

Come si può notare da Tabella 2.10, gli studi di (Trompeta, et al., 2016), (Wu, et al., 2020) e (Griffiths, et al., 2013), seppur utilizzando metodi LCIA differenti, forniscono una valutazione ambientale completa del processo produttivo dei MWCNTs. Inoltre, per tutti gli articoli, ad eccezione di (Roes, et al., 2010), si è preferito un approccio *cradle-to-gate*.

2.4.7.1. Studio condotto da (Trompeta, et al., 2016)

L'articolo di (Trompeta, et al., 2016), fornisce due "percorsi" di produzione diversi, utilizzando la medesima tecnica di sintesi (ossia la CVD), con materie prime differenti, come riportato in Tabella 2.11.

Tabella 2.11: tecniche e materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Trompeta, et al., 2016)

Route	Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
1	CVD	Canfora	Ferrocene	N ₂	n.d.	2,48E+03
2	Fixed Bed CVD	Acetilene	Fe	N ₂	n.d.	1,10E+03

Si deve specificare che, mentre per la "ROUTE 2" risulta chiaro che la tecnica di sintesi impiegata sia la cosiddetta *Fixed Bed CVD*, grazie alle informazioni trovate in letteratura (Danafar, et al., 2009), per quanto riguarda la "ROUTE 1" risulta difficile stabilire la tipologia di CVD.

Il metodo di valutazione dell'impatto ambientale utilizzato è il ReCiPe 2008, come anche nel caso di (Griffiths, et al., 2013). Si può notare dall'istogramma di confronto riportato in Figura 2.6, che la "ROUTE 1" (in rosso) risulta essere molto più impattante rispetto alla "ROUTE 2" (in blu), in ogni categoria contemplata, ad eccezione del consumo idrico. Inoltre, in alcune categorie vi è una differenza di quasi un ordine di grandezza, come nel caso dell'eutrofizzazione dell'acqua dolce in cui, con il primo metodo si ha un valore pari a 1,05E-02 kg P eq/kg_{MWCNT} contro un valore di 2,30E-03 kg P eq/kg_{MWCNT} del secondo metodo.

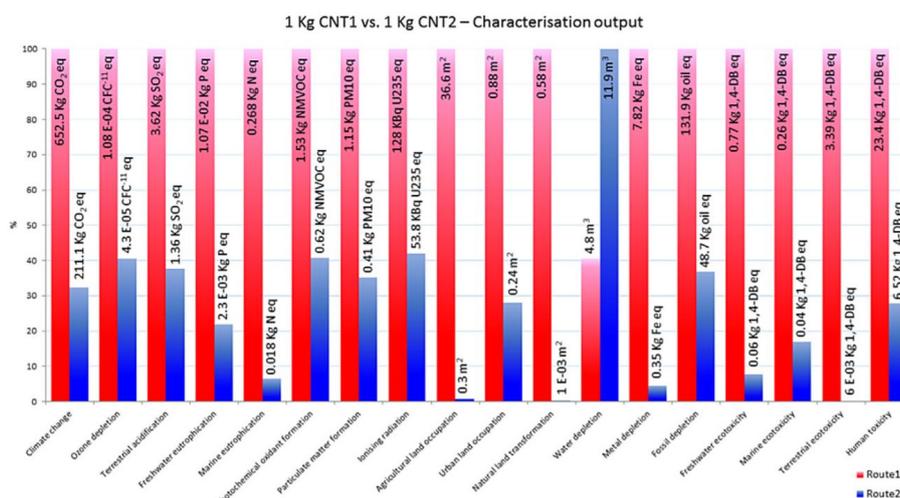


Figura 2.6: impatti legati alla produzione di 1 kg MWCNTs per entrambe le tecniche (Trompeta, et al., 2016)

In accordo con (Trompeta, et al., 2016), questa differenza risultante tra gli impatti è dovuta a diversi fattori.

1. Il maggior fabbisogno di energia richiesto dalla ROUTE 1 (2480 MJ/kg), rispetto a quello richiesto dalla ROUTE 2 (1100 MJ/kg). Questo è dovuto al fatto che, al fine di permettere la crescita dei MWCNTs nel primo metodo, la richiesta di energia termica (temperatura della fornace a 850 °C) è più elevata, rispetto a quella nel secondo metodo (temperatura della fornace a 700 °C).
2. Si è dimostrato sperimentalmente che la produttività della ROUTE 2 è molto più elevata (circa un ordine di grandezza) e questo si traduce in un carico ambientale inferiore.
3. L'utilizzo della canfora (ROUTE 1) implica un maggior contributo in diverse categorie di impatto a causa del suo processo di estrazione e dello smaltimento delle biomasse di scarto.

2.4.7.2. Studio condotto da (Griffiths, et al., 2013)

Considerando lo studio di (Griffiths, et al., 2013), si può notare, da Tabella 2.12, che variano le materie prime impiegate per la sintesi dei CNTs e di conseguenza la tecnica di sintesi impiegata: in questo caso si tratta la tecnica *Floating Catalyst CVD*.

Tabella 2.12: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Griffiths, et al., 2013)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Floating Catalyst CVD	Toluene	Ferrocene	H ₂ /Ar	Eseguita	4,90E+04

Si riscontrano due differenze principali rispetto allo studio precedente: (i) la prima riguarda l'unità funzionale, come si può notare da Tabella 2.10. Questo problema è stato risolto eseguendo un calcolo proporzionale, al fine di amplificare gli impatti del presente studio per ottenere tutti gli indicatori relativi ad una produzione di 1 kg di prodotto; (ii) la seconda

differenza risiede nel fatto che, nell'analisi condotta da (Griffiths, et al., 2013), si considera anche lo step di purificazione del prodotto, al contrario dello studio (Trompeta, et al., 2016), in cui non è specificato.

Grazie all'utilizzo dello stesso metodo LCIA ed alla normalizzazione dell'unità funzionale dei due studi, è possibile eseguire un confronto su tutte le categorie di impatto coinvolte, il quale si riporta in Tabella 2.13.

Tabella 2.13: confronto degli impatti rilevati per la tecnica Fixed Bed CVD e la tecnica Floating Catalyst CVD

Categoria d'impatto	U.M.	Trompeta et al. (2016)		Griffiths et al. (2013)
		CVD	Fixed bed CVD	Floating catalyst CVD
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq/kg	6,53E+02	2,11E+02	1,65E+02
Impoverimento ozono stratosferico	kg CFC-11 eq/kg	1,08E-04	4,30E-05	1,42E-05
Acidificazione terrestre	kg SO ₂ eq/kg	3,62E+00	1,36E+00	1,09E+00
Eutrofizzazione di acqua dolce	kg P eq/kg	1,07E-02	2,30E-03	1,91E-01
Eutrofizzazione marina	kg N eq/kg	2,68E-01	1,80E-02	1,75E-01
Ossidazione fotochimica	kg NMVOCeq/kg	1,53E+00	6,20E-01	5,62E-01
Formazione di particolato	kg PM10 eq/kg	1,15E+00	4,10E-01	4,34E-01
Radiazione ionizzante	kg U235 eq/kg	1,28E+02	5,38E+01	5,93E+01
Occupazione del suolo agricolo	m ² a/kg	3,66E+01	3,00E-01	5,13E+00
Occupazione del suolo urbano	m ² a/kg	8,80E-01	2,40E-01	2,18E+00
Trasformazione del suolo naturale	m ² /kg	5,80E-01	1,00E-03	3,88E-02
Consumo di acqua	m ³ /kg	4,80E+00	1,19E+01	1,68E+00
Consumo di metalli	kg Fe eq/kg	7,82E+00	3,50E-01	1,48E+02
Consumo di combustibili fossili	kg Oil eq/kg	1,32E+02	4,87E+01	5,28E+01
Ecotossicità acqua dolce	kg 1,4DB eq/kg	7,70E-01	6,00E-02	4,33E+00
Ecotossicità marina	kg 1,4DB eq/kg	2,60E-01	4,00E-02	4,55E+00
Ecotossicità terrestre	kg 1,4DB eq/kg	3,39E+00	6,00E-03	3,72E-02
Tossicità umana	kg 1,4DB eq/kg	2,34E+01	6,52E+00	2,60E+02
GER	MJ/kg	n.d.	n.d.	4,90E+04
Elettricità	MJ/kg	2,48E+03	1,10E+03	n.d.

Si può notare da Tabella 2.13 che gli impatti ambientali recati dalla ROUTE 2 proposta da (Trompeta, et al., 2016) ed il processo produttivo analizzato da (Griffiths, et al., 2013) sono caratterizzati da ordini di grandezza simili.

Analizzando più da vicino le categorie di impatto relative al cambiamento climatico, all'acidificazione terrestre e all'impoverimento dello strato di ozono, si riscontra esattamente lo stesso ordine di grandezza, con indicatori leggermente inferiori nel caso (Griffiths, et al., 2013). Si nota una differenza importante nelle categorie di tossicità umana e nelle voci legate all'ecotossicità, che risultano essere maggiori nel caso (Griffiths, et al., 2013), di uno o addirittura due ordini di grandezza. Infine, valutando l'aspetto energetico, si osserva un

valore insolitamente elevato (49.000 MJ/kg) nello studio di (Griffiths, et al., 2013) rispetto ad ambo i casi precedenti ed anche rispetto alla tendenza generale riscontrata nelle tecniche di sintesi CVD. In accordo con l'autore, tale valore è giustificato dalla richiesta di una maggiore quantità di materie prime e soprattutto, dalla dettagliata quantificazione degli impatti legati alle infrastrutture utilizzate per la produzione.

2.4.7.3. Studio condotto da (Wu, et al., 2020)

Nello studio di (Wu, et al., 2020) si propone l'analisi della stessa tecnica *Floating Catalyst CVD*, ma con l'impiego di un idrocarburo differente come risorsa di carbonio: il benzene. Si riportano in Tabella 2.14, le principali materie prime considerate nell'articolo.

Tabella 2.14: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Wu, et al., 2020)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Floating Catalyst CVD	Benzene	Ferrocene	H ₂	Eseguita	4,82E+02

In questo caso, l'autore ha impiegato il metodo TRACI 2.1 combinato con il metodo USEtox, per la valutazione degli impatti legati alla tossicità ed ecotossicità. Il confronto con le due tecniche analizzate in precedenza può essere eseguito solo per le categorie di impatto comuni ai metodi impiegati e che sono caratterizzati dalla stessa unità di riferimento. Esse corrispondono alle categorie del cambiamento climatico, di impoverimento dello strato di ozono stratosferico, dell'acidificazione terrestre e dell'eutrofizzazione dell'acqua marina. Si riporta il confronto tra i diversi studi in Tabella 2.15.

Tabella 2.15: confronto impatti rilevati per (Trompeta, et al., 2016), (Griffiths, et al., 2013) e (Wu, et al., 2020)

Categoria d'impatto	U.M.	Trompeta et al. (2016)		Griffiths et al. (2013)	Wu et al. (2020)
		CVD	Fixed bed CVD	Floating catalyst CVD	Floating catalyst CVD
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq/kg	6,53E+02	2,11E+02	1,65E+02	1,36E+02
Impoverimento ozono stratosferico	kg CFC-11 eq/kg	1,08E-04	4,30E-05	1,42E-05	5,08E-06
Acidificazione terrestre	kg SO ₂ eq/kg	3,62E+00	1,36E+00	1,09E+00	9,74E-01
Eutrofizzazione marina	kg N eq/kg	2,68E-01	1,80E-02	1,75E-01	2,11E-01

Da Tabella 2.15 si può notare che nello studio (Wu, et al., 2020) il carico ambientale risulti minore rispetto agli altri processi esaminati. Esso, comunque, presenta lo stesso ordine di grandezza in termini di cambiamento climatico ed in termini di eutrofizzazione, mentre è caratterizzato un ordine di grandezza inferiore nelle altre due categorie di impatto analizzate.

Si può concludere dunque che la tecnica *Floating Catalyst CVD*, con materie prime come indicate in Tabella 2.14, risulti più eco-compatibile rispetto alle precedenti. Questo può essere causato anche da un minor fabbisogno energetico.

2.4.7.4. Studio condotto da (Roes, et al., 2010)

L'articolo di (Roes, et al., 2010) analizza diversi nanomateriali dal punto di vista ambientale. Esso verrà impiegato come riferimento anche nel campo delle nanoargille. Questo studio si focalizza principalmente sull'aspetto energetico del processo produttivo dei MWCNTs. Per quanto riguarda il carico ambientale, considera unicamente la categoria di impatto del cambiamento climatico.

L'autore parte dalla quantificazione del fabbisogno energetico per la produzione di nanotubi a parete singola (954 MJ/kg) facendo riferimento allo studio di (Kushnir, et al., 2008). Per ottenere la domanda di energia per la produzione dei MWCNTs (95,4 MJ/kg), si è considerata un'aliquota energetica pari al 10% di quella necessaria per i SWCNTs. Questa considerazione empirica è motivata dal colloquio da parte dell'autore dell'articolo con un'azienda produttrice di nanotubi di carbonio.

Lo stesso approccio è stato impiegato per la valutazione dei kilogrammi di anidride carbonica equivalente. Nel caso dei SWCNTs si osserva un valore di 110 kg CO₂eq/kg, mentre nel caso dei MWCNTs si riscontra un valore pari a 11 kg CO₂eq/kg.

La tecnica considerata in questo articolo è la *Fluidized Bed CVD* e la risorsa di carbonio atomico è il metano, come indicato in Tabella 2.16.

Tabella 2.16: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Roes, et al., 2010)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Fluidized Bed CVD	Metano	Fe	N ₂	Eseguita	9,54E+01

Si può osservare nell'articolo di (Roes, et al., 2010) una differenza molto consistente sia in termini energetici, che in termini di impatto ambientale, rispetto agli articoli analizzati finora. Considerando la categoria di cambiamento climatico, si riscontra una discrepanza di un ordine di grandezza mentre nel caso energetico si riscontra una differenza di uno (Wu, et al., 2020), due (Trompeta, et al., 2016) o addirittura tre ordini di grandezza (Griffiths, et al., 2013).

2.4.7.5. Studio condotto da (Kushnir, et al., 2008)

L'ultimo articolo relativo ai nanotubi di carbonio a parete multipla è quello di (Kushnir, et al., 2008). E' uno studio condotto unicamente sotto il profilo energetico. Tuttavia risulta interessante perché non tratta solo le tecniche CVD, ma anche metodi di sintesi in cui viene utilizzata la materia prima allo stato solido. Inoltre, il fabbisogno energetico costituisce un importante indicatore di qualità ambientale del processo.

Anche in questo caso, come negli articoli di (Griffiths, et al., 2013), (Wu, et al., 2020) e (Roes, et al., 2010), si è considerata sia la fase di sintesi dei nanotubi che quella di purificazione. Le tecniche di sintesi analizzate nel presente articolo vengono riportate in Tabella 2.17.

Tabella 2.17: materie prime e tecniche analizzate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di(Kushnir, et al., 2008)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Floating Catalyst CVD	Benzene	Ferrocene	H ₂	Eseguita	4,82E+02
Arco elettrico	Grafite	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	Eseguita	2,48E+03
Ablazione laser	Grafite	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	Eseguita	9,64E+03
Fornace solare	Grafite	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	Eseguita	4,42E+02

Da Tabella 2.17 si può osservare come la tecnica *Floating Catalyst CVD* e la tecnica *Fluidized Bed CVD* risultino molto meno dispendiose, in termini energetici, rispetto alle tecniche in cui la fonte di carbonio si trova allo stato solido (arco elettrico e ablazione laser). Come afferma (Kushnir, et al., 2008), questo è dovuto principalmente alla differenza di stato di aggregazione della fonte di carbonio atomico: infatti i metodi che impiegano la materia prima solida sono “*energy-intensive*” a causa dell’importante domanda energetica per vaporizzare la grafite, per mantenere l’atmosfera inerte e la temperatura e pressione adeguate. Inoltre, una criticità importante per questi metodi, è quello di richiedere una materia prima ad elevato grado di purezza, quindi anche le lavorazioni di preparazione di quest’ultima per il processo di sintesi risultano energeticamente dispendiose.

Infine, la tecnica della “fornace solare” risulta quella meno dispendiosa tra quelle citate, tuttavia soffre di una difficile praticabilità su scala industriale a causa della sua bassa produttività, dovuta all’impiego dell’energia fotonica derivante dai raggi solari.

2.4.7.6. Confronto tra le tecniche produttive dei MWCNTs

In definitiva, si può eseguire un confronto dei fabbisogni energetici di tutte le tecniche analizzate, reperite nei diversi articoli (Figura 2.7)

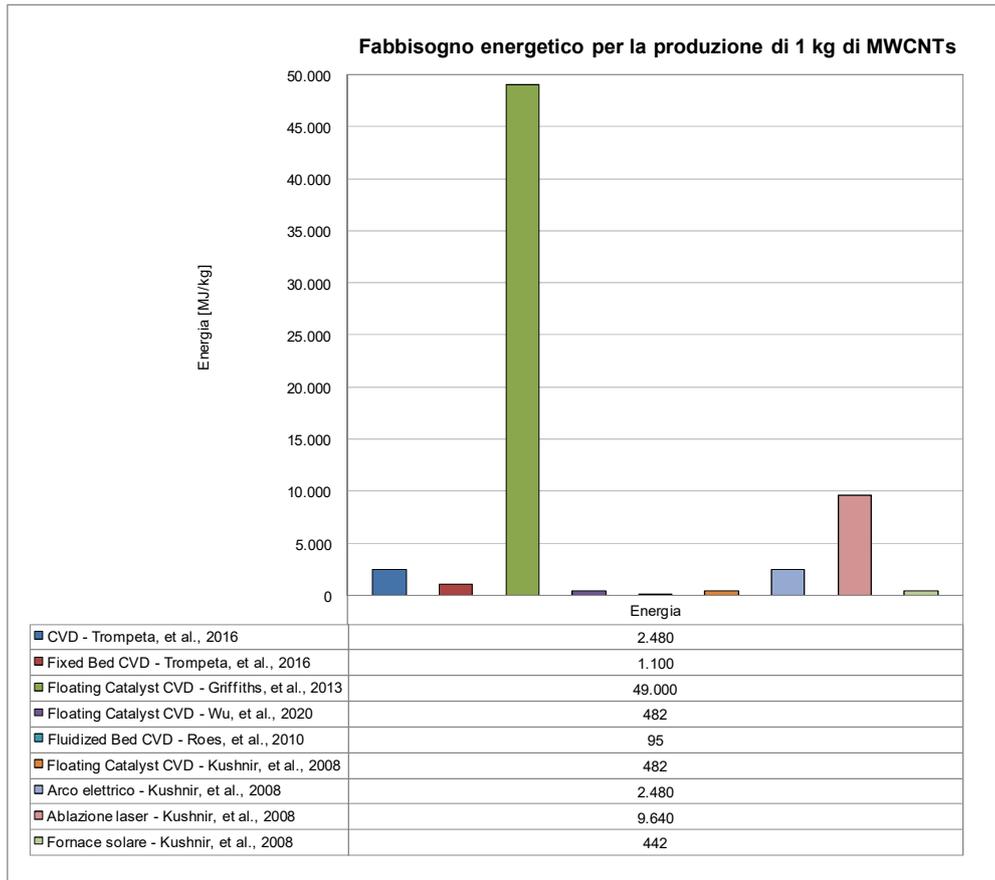


Figura 2.7: confronto energetico tra i diversi metodi di produzione per i MWCNTs

Si può notare che, in generale le tecniche CVD (in particolare la *Floating Catalyst* e *Fluidized Bed*), siano quelle più economiche in termini di domanda energetica e anche in termini di carico ambientale come precedentemente dimostrato. Proprio per queste caratteristiche e per la loro elevata produttività sono le tecniche maggiormente impiegate a livello industriale (Wu, et al., 2020). Tuttavia vi è comunque un'elevata eterogeneità energetica, anche solo tra le diverse tecniche CVD. Però, si è notata una tendenza abbastanza stabile nella produzione di CO₂ equivalente, attraverso tutte le tecniche viste in precedenza (Figura 2.8).

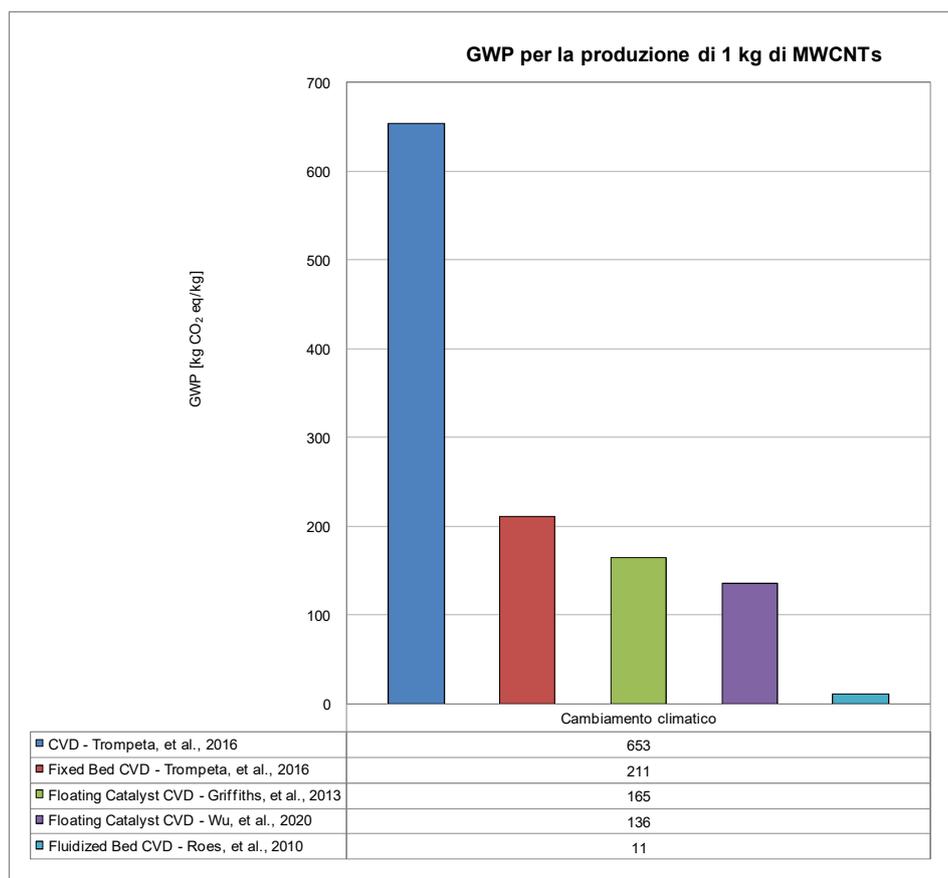


Figura 2.8: confronto di emissioni CO₂ equivalente, nelle differenti tecniche esaminate (MWCNTs)

Si può notare come la tecnica *Fixed Bed CVD* sia quella decisamente più gravosa, per quanto riguarda la categoria del cambiamento climatico. Purtroppo non è stato possibile confrontare le tecniche in termini ambientali, le tecniche che utilizzato carbone/grafite come materia prima, a causa della completa assenza di dati in letteratura.

2.4.8. Confronto tra MWCNTs e SWCNTs

Finora ci si è focalizzati unicamente sui nanotubi a parete multipla, per confrontare le diverse tecniche produttive. Questo perché normalmente i MWCNTs sono le tipologie di nanotubi impiegati nelle pavimentazioni stradali nanostrutturate. Tuttavia, è interessante eseguire un confronto con i nanotubi a parete singola, per compararne le prestazioni ambientali.

Come riportato in Tabella 2.10, i SWCNTs sono stati oggetto di studio in diversi articoli: alcuni sono già stati citati anche nel paragrafo relativo ai MWCNTs, poiché vengono trattate ambo le tipologie. Anche in questo caso, sono stati reperite alcune analisi di natura energetica (Kushnir, et al., 2008), o prevalentemente energetica con la valutazione del cambiamento climatico (Teah, et al., 2020) ed infine altri forniscono una valutazione ambientale completa, impiegando il metodo TRACI (Gavankar, et al., 2014, Singh, et al., 2008).

2.4.8.1. Studio condotto da (Gavankar, et al., 2014)

Partendo dall'articolo di (Gavankar, et al., 2014), si può apprezzare particolarmente l'effetto scala analizzato dall'autore. Il nucleo centrale dell'articolo è quello di eseguire un'analisi LCA per ottenere gli impatti ambientali generati per la produzione di 1 kg di SWCNTs, prodotti con la tecnica CoMoCAT (Tabella 2.18).

Tabella 2.18: materie prime considerate per la sintesi dei SWCNTs, nell'articolo di (Gavankar, et al., 2014)

Scala di produzione	Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
100 g/giorno	CoMoCAT	Monossido di carbonio	Co, Mo	N2/H2	Eseguita	7,80E+04
1 ton/giorno	CoMoCAT	Monossido di carbonio	Co, Mo	N2/H2	Eseguita	1,00E+04

Nella presente analisi sono stati considerati due casi studio: la produzione su piccola scala (assimilabile alla scala di laboratorio) e quella su grande scala (assimilabile alla produzione su scala industriale). I risultati sono presentati in Tabella 2.19.

Tabella 2.19: confronto degli impatti rilevati per la tecnica CoMoCAT, su due differenti scale di produzione

Categoria d'impatto	U.M.	Piccola scala	Grande scala
Acidificazione	moli H+ eq/kg	2,07E+05	2,22E+04
Ecotossicità	kg 2,4D eq/kg	2,34E+05	3,75E+04
Eutrofizzazione	kg N eq/kg	3,56E+02	2,10E+01
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq/kg	8,18E+05	8,83E+04
Salute umana-Cancro	kg benzene eq/kg	1,31E+03	1,33E+02
Ossidazione fotochimica	kg NO _x eq/kg	1,48E+03	1,60E+02
Rifiuti non pericolosi	m ³ /kg	4,45E+02	4,45E+02
Impoverimento ozono stratosferico	kg CFC-11 eq/kg	1,16E-01	6,78E-03
Acqua di rifiuto trattata	m ³ /kg	8,25E+01	8,25E+01
Consumo idrico	m ³ /kg	5,83E+03	7,07E+02
Vapore acqueo	m ³ /kg	1,60E+00	1,60E+00
Energia	MJ/kg	7,80E+04	1,00E+04
GER	MJ/kg	2,42E+05	3,10E+04

Da Tabella 2.19 si può notare come la produzione su larga scala sia meno impattante. Si riscontrano addirittura delle riduzioni di impatto di un ordine di grandezza, per esempio, nel caso della categoria di cambiamento climatico, dell'acidificazione o dell'impoverimento dello strato di ozono stratosferico.

Anche in termini energetici si assiste ad un'importante riduzione: produzione su piccola scala (78.000 MJ/kg) contro produzione su grande scala (10.000 MJ/kg).

Quindi questo è un esempio evidente di come la scala di produzione influenzi pesantemente il carico ambientale prodotto. In particolare, maggiore sarà la scala di produzione, minore sarà l'entità degli impatti per unità di massa di prodotto.

2.4.8.2. Studio condotto da (Singh, et al., 2008)

Prima di procedere con delle prime considerazioni sul confronto tra SWCNTs e MWCNTs, è opportuno analizzare ancora l'articolo di (Singh, et al., 2008).

In questo articolo si analizzano due sistemi produttivi, in due scenari differenti. I due sistemi produttivi utilizzano la stessa materia prima, ovvero il monossido di carbonio, ma due tecniche di sintesi differenti: HiPco e CoMoCAT (Tabella 2.20).

Tabella 2.20: materie prime e tecniche analizzate per la sintesi dei SWCNTs, nell'articolo di (Singh, et al., 2008)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
HiPco	Monossido di carbonio	Fe(CO) ₅	N ₂	Eseguita	1,39E+03
CoMoCAT	Monossido di carbonio	Co, Mo	N ₂	Eseguita	3,80E+03

I due scenari sono i seguenti:

1. Base design: in questo scenario, si assume che nessuna delle risorse venga riciclata e gli output del processo vengono trattati come emissioni.
2. New design: in questo scenario si assume che si applichino del processo di riciclo (non specificati dall'autore).

Tuttavia, nel presente elaborato si è deciso di considerare unicamente i dati relativi al "base design" perché vengono fornite anche delle informazioni quantitative di natura energetica. Inoltre, si è deciso di trascurare il processo "new design" perché non è stata fornita alcuna specifica in merito ai processi di recupero utilizzati.

Si precisa che è stata eseguita una normalizzazione degli impatti, per passare da una unità funzionale pari a 1 g a quella pari ad 1 kg. Si riportano gli impatti relativi alla produzione di 1 kg di SWCNTs in Tabella 2.21.

Tabella 2.21: confronto impatti ambientali per la produzione di 1 kg SWCNTs dell'articolo di (Singh, et al., 2008)

Categoria d'impatto	U.M.	HiPCO	CoMoCAT
Acidificazione	moli H ⁺ eq/kg	1,57E+02	7,99E+01
Ecotossicità	kg 2,4D eq/kg	3,73E-02	1,37E-02
Eutrofizzazione	kg N eq/kg	1,02E-01	6,21E-02
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq/kg	6,29E+03	5,82E+03
Salute umana-Cancro	kg benzene eq/kg	5,59E-02	6,44E-02
Ossidazione fotochimica	kg NO _x eq/kg	2,52E+00	9,39E+00
Salute umana-Non cancro	kg toluene eq/kg	5,83E+01	6,95E+01
HH criteria Air-Mobile	kg PM _{2,5} eq/kg	4,21E-01	1,82E-01
HH criteria Air-Point source	kg PM _{2,5} eq/kg	4,00E-01	1,70E-01

Da Tabella 2.21 si può notare, innanzitutto, che alcune delle categorie di impatto considerate nel presente articolo siano leggermente differenti rispetto all'articolo di (Gavankar, et al., 2014): questo perché le categorie di impatto variano a seconda dello scopo dell'analisi LCA (e.g. water Depletion, Treated Waste Water).

Confrontando l'entità dei diversi impatti generati dalle due tecniche in analisi, si può notare che solo nelle categorie di eutrofizzazione e acidificazione emerge una differenza di un ordine di grandezza. Nelle restanti categorie si possono riscontrare gli stessi ordini di grandezza, con differenze comunque apprezzabili in alcuni casi, come ad esempio nella categoria di formazione dello smog.

In termini energetici, infine, si delinea una differenza importante: risulta più economica la tecnica CoMoCAT, il cui fabbisogno è pari a $1,39E+03$ MJ/kg, della tecnica HiPco, la cui domanda energetica corrisponde a $3,80E+03$ MJ/kg.

Confrontando ora lo studio di (Singh, et al., 2008) con quello di (Gavankar, et al., 2014), si possono effettuare le seguenti considerazioni.

1. Dal punto di vista energetico, si può notare che nello studio di (Singh, et al., 2008), il fabbisogno (sia HiPco che CoMoCAT) è molto minore rispetto, non solo al caso di impiego di tecnica CoMoCAT su piccola scala, ma anche su scala industriale, come si dimostra in Figura 2.9.

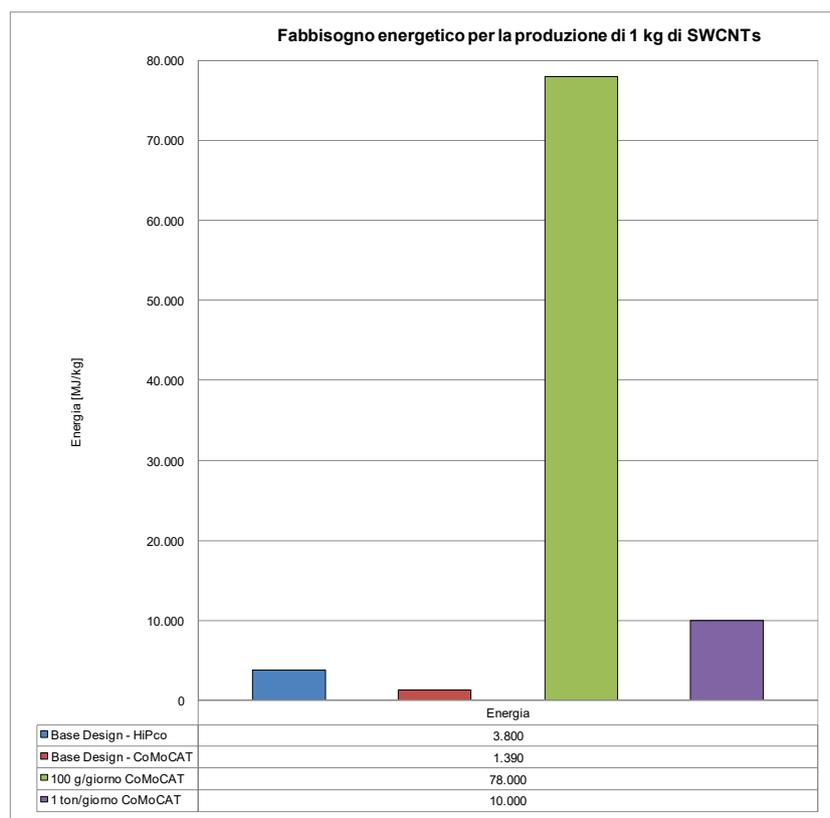


Figura 2.9: confronto energetico tra le tecniche proposte da (Gavankar, et al., 2014) e da (Singh, et al., 2008)

Ancora, risulta singolare che nel caso in cui si consideri la stessa tecnica di sintesi (CoMoCAT), vi sia una differenza di un ordine di grandezza tra le due analisi.

2. Anche valutando gli impatti ambientali, si può notare una differenza elevata sia tra la tecnica HiPco di (Singh, et al., 2008) e la tecnica CoMoCAT (su piccola e grande scala) di (Gavankar, et al., 2014), sia tra le due tecniche CoMoCAT valutate nei casi studio dei due articoli. Per esempio, considerando la categoria di cambiamento climatico, si riporta un istogramma di confronto in Figura 2.10.

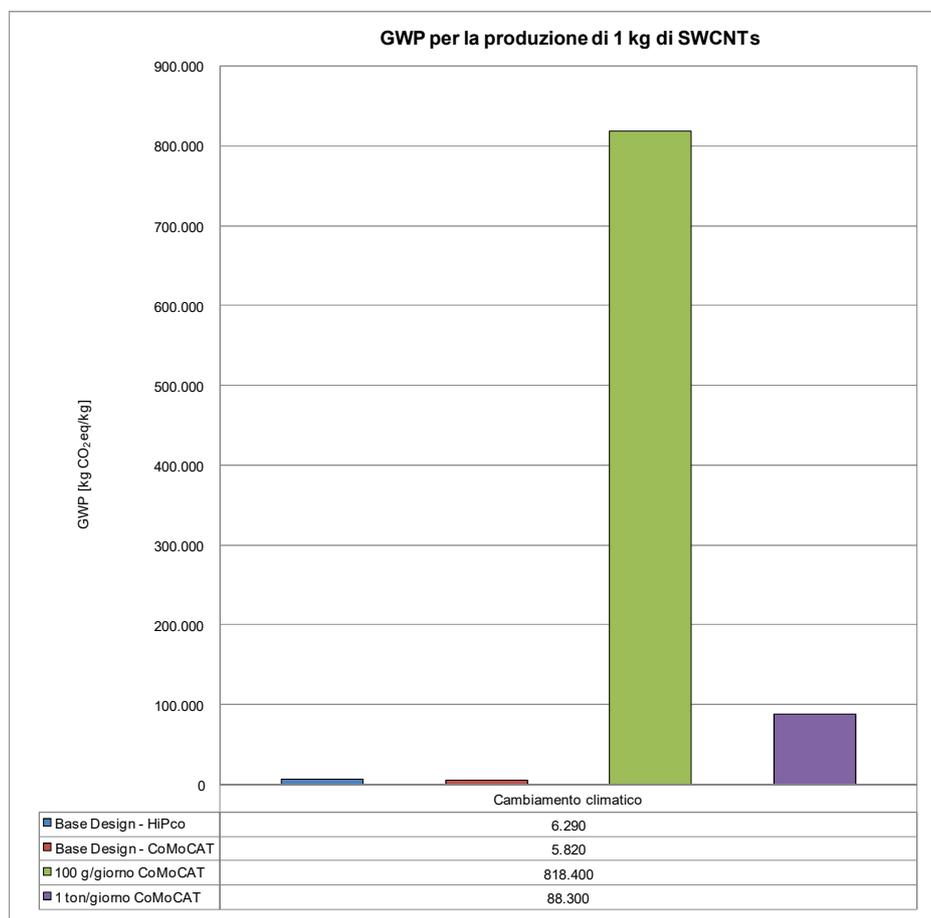


Figura 2.10: confronto del GWP tra le tecniche proposte da (Gavankar, et al., 2014) e da (Singh, et al., 2008)

Ora si possono già eseguire alcune considerazioni sul confronto SWCNTs - MWCNTs. La prima è relativa alla categoria di cambiamento climatico (l'unica comune, in tutti gli studi reperiti): l'impatto legato alla produzione di MWCNTs risulta abbastanza costante e stabilmente di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai SWCNTs. Si può quindi affermare che dal punto di vista ambientale, i MWCNTs sono meno impattanti.

La seconda considerazione che si può eseguire è la seguente: dal confronto energetico tra tutti i metodi di produzione analizzati finora, si può notare come ambo le tecniche HiPco e CoMoCAT, utilizzate per produrre i SWCNTs, siano mediamente molto più dispendiose rispetto alla tecnica *Fluidized Bed CVD* (circa due ordini di grandezza). Tuttavia bisogna porre l'accento anche sul fatto che, le tecniche analizzate nell'articolo di (Singh, et al., 2008), risultino energeticamente molto simili alle tecniche *Fixed Bed CVD*, valutate nell'articolo di (Trompeta, et al., 2016).

Questo significa che oltre alla tipologia di nanotubo sintetizzato, influisce molto anche la tecnica impiegata, come precedentemente dimostrato. Si è comunque notato finora, un carico ambientale mediamente più elevato nel caso dei nanotubi a parete singola.

2.4.8.3. Studio condotto da (Teah, et al., 2020)

Non solo le tecniche HiPco e CoMoCAT possono essere impiegate per la sintesi dei nanotubi a parete singola. Come afferma (Teah, et al., 2020), possono essere utilizzate anche le tecniche CVD ed in particolare la “*Fixed Bed*” e la “*Fluidized bed*”. In questo studio infatti esse sono state analizzate sia dal punto di vista energetico, sia dal punto di vista ambientale, quantificando l’impatto legato al cambiamento climatico indotto dal processo di produzione. L’autore ha scelto queste tecniche per gli stessi motivi citati in precedenza: basso costo di impianto ed alta resa di produzione.

In questo caso, si è utilizzata un’unità funzionale pari ad 1 g, perciò gli impatti valutati sono stati riscaldati alla produzione di 1 kg di prodotto, per renderli confrontabili con gli altri studi.

Per ambo le tecniche analizzate, sono state eseguite diverse prove al fine di valutare anche la resa del processo: nel caso del *Fixed Bed CVD*, la variabile considerata è l’agente ossidante, per cui si sono provate diverse sostanze (H_2O e CO_2) e, diversi supporti di reazione; nel caso di *Fluidized Bed CVD*, la variabile considerata invece corrisponde al gas “trasportatore” o *carrier gas* (Ar o N_2).

In accordo con quanto stabilito da (Teah, et al., 2020), nel presente elaborato si considerano le due tecniche che si sono rivelate le meno impattanti, per il confronto: per la *Fixed Bed CVD*, la tecnica considerata è CO2_18(b), mentre *Fluidized Bed CVD* si considera la CVD_N2_20.

Tabella 2.22: materie prime considerate per la sintesi dei SWCNTs, nell’articolo di (Teah, et al., 2020)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Fixed Bed CVD	Acetilene/Etilene	Fe	Ar	Eseguita	n.d.
Fluidized Bed CVD	Acetilene	Fe	Ar	Eseguita	n.d.

Per quanto riguarda la variante *Fixed Bed CVD*, si riscontra un valore di CO_2 equivalente per kilogrammo di prodotto ($2,86E+04$ kg CO_2 eq/kg), del tutto in linea con quello ottenuto da (Gavankar, et al., 2014), in cui è stata impiegata la tecnica CoMoCAT su scala industriale ($8,83E+04$ kg CO_2 eq/kg). Tuttavia questo valore, come già esplicitato in precedenza, risulta essere elevato rispetto a quello “normalmente” ottenuto nel caso MWCNTs e nel caso delle tecniche HiPco analizzate finora.

Al contrario invece, la variante *Fluidized Bed CVD* presenta un impatto ($4,80E+02$ kg CO_2 eq/kg) perfettamente in linea con quelli ottenuti nel caso dei nanotubi a parete multipla. In termini energetici, si sono riscontrate informazioni solo relativamente ai consumi elettrici.

2.4.8.4. Studi condotti da (Kushnir, et al., 2008) e (Roes, et al., 2010)

Infine, gli ultimi due articoli che si intendono analizzare sono già stati citati nella sezione relativa ai nanotubi *multi-wall*: essi sono quello di (Kushnir, et al., 2008), in cui si è svolta una valutazione energetica anche dei SWCNT e quello di (Roes, et al., 2010).

Considerando l'articolo di (Kushnir, et al., 2008), l'autore esamina alcune procedure utilizzate per nanotubi a parete singola. Tra questi, si trova la tecnica HiPco in cui la fonte di carbonio è il monossido di carbonio e la tecnica *Fluidized Bed CVD* (Tabella 2.23) anche in questo caso, la cui fonte di carbonio è il metano.

Tabella 2.23: tecniche e materie prime per la sintesi dei SWCNTs nell'articolo di (Kushnir, et al., 2008)

Metodo di sintesi	Fonte di carbonio	Catalizzatore	Carrier gas	Purificazione	Energia (MJ/kg)
Fluidized Bed CVD	Metano	Fe	N ₂	Eseguita	9,54E+02
HiPco	Monossido di carbonio	Ferrocene	N ₂	Eseguita	5,82E+03
Arco elettrico	Grafite	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	Eseguita	2,48E+03
Ablazione laser	Grafite	Ni, Co, Y	He, Ar, N ₂	Eseguita	9,64E+03

Precedentemente, sono state discusse anche le tecniche dell'ablazione laser e dell'arco elettrico per i MWCNTs. Le stesse tecniche possono essere utilizzate anche per la sintesi dei SWCNTs, ottenendo i medesimi i consumi energetici.

L'ultimo articolo da analizzare è quello di (Roes, et al., 2010). Si ricorda che esso è già stato citato per MWCNTs; infatti, come già affermato precedentemente, i consumi e l'impatto ambientale dei nanotubi a parete singola sono pari a 10 volte quelli rilevati per i MWCNTs.

Si riportano, infine, due tabelle di confronto, considerando i due aspetti maggiormente tenuti in considerazione negli studi esaminati. L'obiettivo è quello di confrontare le prestazioni ambientali di MWCNTs (Tabella 2.24) e SWCNTs (Tabella 2.25). Le categorie di impatto considerate per questa analisi comparativa sono cambiamento climatico e impatti energetici.

Tabella 2.24: prospetto riassuntivo del fabbisogno energetico e delle emissioni per la produzione di 1 kg di MWCNTs

Tecnica di produzione - Articolo - Tipologia CNTs	Energia [MJ/kg]	GWP [kg CO ₂ eq/kg]
CVD - Trompeta, et al., 2016 - MWCNTs	2.480	653
Fixed Bed CVD - Trompeta, et al., 2016 - MWCNTs	1.100	211
Floating Catalyst CVD - Griffiths, et al., 2013 - MWCNTs	49.000	165
Floating Catalyst CVD - Wu, et al., 2020 - MWCNTs	482	136
Fluidized Bed CVD - Roes, et al., 2010 - MWCNTs	95	11
Floating Catalyst CVD - Kushnir, et al., 2008 - MWCNTs	482	n.d.
Arco elettrico - Kushnir, et al., 2008 - MWCNTs	2.480	n.d.
Ablazione laser - Kushnir, et al., 2008 - MWCNTs	9.640	n.d.
Fornace solare - Kushnir, et al., 2008 - MWCNTs	442	n.d.

Tabella 2.25: prospetto riassuntivo del fabbisogno energetico e delle emissioni per la produzione di 1 kg di SWCNTs

Tecnica di produzione - Articolo - Tipologia CNTs	Energia [MJ/kg]	GWP [kg CO ₂ eq/kg]
CoMoCAT (100 g/giorno) - Gavankar, et al., 2014 - SWCNTs	78.000	818.400
CoMoCAT (1 ton/giorno) - Gavankar, et al., 2014 - SWCNTs	10.000	88.300
HiPco - Singh, et al., 2014 - SWCNTs	1.390	6.290
CoMoCAT - Singh, et al., 2014 - SWCNTs	3.800	5.820
Fluidized Bed CVD - Kushnir, et al., 2008 - SWCNTs	954	n.d.
HiPco - Kushnir, et al., 2008 - SWCNTs	5.820	n.d.
Arco elettrico - Kushnir, et al., 2008 - SWCNTs	2.480	n.d.
Ablazione laser - Kushnir, et al., 2008 - SWCNTs	9.640	n.d.
Fluidized Bed CVD - Roes, et al., 2010 - SWCNTs	954	110
Fixed Bed CVD - Teah, et al., 2014 - SWCNTs	n.d.	28.600
Fluidized Bed CVD - Teah, et al., 2014 - SWCNTs	n.d.	480

Sulla base dei confronti eseguiti e delle informazioni reperite, possono essere eseguite le seguenti considerazioni.

1. I nanotubi di carbonio a parete multipla risultano mediamente meno impattanti sull'ambiente rispetto a quelli a parete singola. Come si può notare da Tabella 2.24 e Tabella 2.25 infatti, per quanto riguarda la categoria di cambiamento climatico, in quasi tutti i casi i kg CO₂eq/kg emessi dai MWCNTs risulta minore rispetto alla controparte esaminata.
2. Come da aspettative ed in accordo con (Kushnir, et al., 2008), i metodi che impiegano la materia prima fonte di carbonio allo stato solido (grafite) risultano avere un fabbisogno energetico più elevato rispetto alle altre tecniche, anche se il processo di purificazione potrebbe non essere necessario in questi casi.
3. Le tecniche *Floating catalyst CVD* e *Fluidized Bed CVD* risultano le più prestanti dal punto di vista di fabbisogno energetico, dal punto di vista di impatto ambientale e dal punto di vista di resa produttiva: esse sono le più economiche sotto ogni aspetto e largamente le più utilizzate per la produzione dei CNTs (Wu, et al., 2020). Questa considerazione è valida sia per i nanotubi a parete multipla che per i nanotubi a parete singola.
4. In termini energetici, si sono riscontrati dei valori fortemente eterogenei e non sempre i MWCNTs risultano più "economici" sotto questo punto di vista: un esempio lo si può riscontrare nel confronto tra (Trompeta, et al., 2016), in cui si riscontra un valore di minimo pari a 1,10E+03 MJ/kg (per la sintesi di MWCNTs via *Fixed Bed CVD*) e, l'articolo (Kushnir, et al., 2008) in cui si rileva un valore pari a 9,54E+02 MJ/kg (per la sintesi di SWCNTs via *Fluidized Bed CVD*).
5. Tra le tecniche CVD (sia per MW che per SW), quella più impattante dal punto di vista energetico-ambientale risulta essere il tipo *Fixed Bed*.
6. Un'ultima considerazione deve essere eseguita sull'affidabilità della presente analisi. Sono state riscontrate dell'eterogeneità importanti, soprattutto in termini di fabbisogno energetico, ma non solo: per esempio, considerando il confronto (Wu, et al., 2020) vs. (Gavankar, et al., 2014), si sono notate delle differenze anche di alcuni ordini di grandezza nelle diverse categorie di impatto. Questo si è verificato anche se

è stata valutata la stessa tecnica di sintesi per la produzione della stessa tipologia di nanotubi, utilizzando lo stesso metodo di valutazione LCIA.

Questo significa che bisogna considerare che la presenza di un determinato grado di incertezza nella presente analisi, influenzato molto dal grado di incertezza riscontrato in ognuno di articoli ed anche a causa di tutti i fattori che influenzano le analisi LCA ed energetiche considerate, quali ad esempio la tempo-dipendenza, la spazio-dipendenza e l'effetto di scala sulla produzione. Gli aspetti appena citati, sono in parte già stati analizzati ma alcuni di essi verranno comunque ripresi in seguito.

2.4.9. Tempo dipendenza

Il fattore temporale gioca un ruolo molto importante su tutti i campi della tecnologia. La “tempo-dipendenza” consiste nel determinare, in modo qualitativo, come varia nel tempo il consumo energetico e gli impatti ambientali derivanti dalla produzione di nanotubi di carbonio. Intuitivamente si può subito comprendere che il carico ambientale generato dalla produzione di questa tipologia di nanomateriale, sia molto diverso, se si considera la produzione nei primi anni del 2000 o negli anni più recenti. Questo, a causa dell'enorme sviluppo della nano-tecnologia ma non solo: contemporaneamente si sono sviluppati molto anche i processi produttivi, nonché gli strumenti computazionali e di analisi di questi ultimi (e.g. analisi LCA). Inoltre, un fattore non trascurabile è anche quello di una maggiore sensibilità ambientale sviluppata dalla popolazione mondiale.

Quindi il tempo incide molto sui risultati ottenuti nelle analisi condotte nel precedente paragrafo. Tuttavia, in questa relazione tempo-impatti è difficile tracciare un andamento realistico, perché ci sono un gran numero di variabili in gioco quali ad esempio: la tecnica impiegata per la sintesi, il tipo di processo di purificazione dei CNTs, il tipo di materie prime utilizzate (fonte di carbonio, catalizzatore, supporto, ecc.) e la scala di produzione.

Nonostante queste difficoltà, un'analisi temporale può essere riscontrata nell'articolo di (Gavankar, et al., 2014). In questo studio, viene valutata proprio la maturità della tecnologia e dei sistemi produttivi considerati per la produzione di CNTs, con diverse tecniche. All'interno di questa analisi si sono considerati diversi studi relativi alla valutazione energetico-ambientale dei diversi processi produttivi di nanotubi di carbonio, considerando due indici.

1. Indice TRL (*Technology Readiness Level*): si tratta di un indice introdotto dalla NASA, al fine di fornire una misura sistematica per la valutazione della maturità di una determinata tecnologia. La scala TRL è caratterizzata da 9 livelli, in cui il livello 1 corrisponde all'osservazione dei principi base della tecnologia in fase di sviluppo, mentre il livello 9 corrisponde all'impiego di sistemi operativi completamente evoluti. Tuttavia questo corrisponde ad un indice relativo unicamente alla tecnologia e per questo motivo è stato introdotto l'indice MRL.
2. Indice MRL (*Manufacturing Readiness Level*): si tratta di un indice introdotto dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, al fine di valutare non solo la maturità di una data tecnologia, ma anche la maturità di tutte le componenti e dei sottosistemi che concorrono al processo produttivo di essa (Gavankar, et al., 2014).

Dalle definizioni degli indici TRL ed MRL è chiaro come il fattore temporale giochi un ruolo di spicco sulla maturità dei diversi campi della tecnologia, nanomateriali compresi.

Dallo studio di (Gavankar, et al., 2014) è emerso che la quantità di energia per kilogrammo di nanotubi di carbonio tende a diminuire nel tempo, perché l'indice di maturità tecnologica TRL e produttiva MRL aumentano (a parità di tecnica produttiva). Ancora, considerando più specificamente l'indice MRL, si può notare come la quantità di "energia specifica necessaria per la produzione" diminuisca all'aumentare dell'indice: l'aumentare del punteggio MRL, significa non solo una maggiore maturità nel processo produttivo, ma anche una scala di produzione più elevata chiaramente. Si riporta il trend in Figura 2.11.

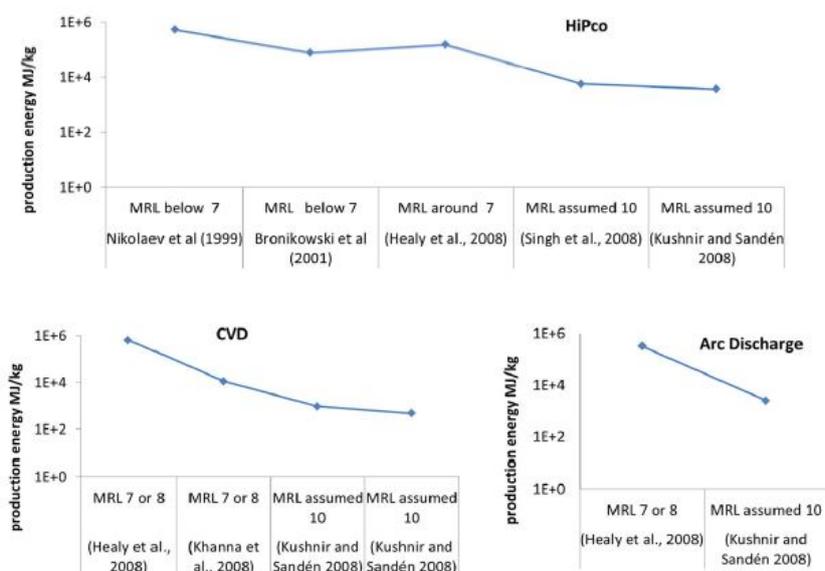


Figura 2.11 diminuzione osservata in termini di richiesta di energia per la sintesi di CNTs con aumento di indice MRL, con le tecniche HiPco, CVD, arc discharge (Gavankar, et al., 2014)

2.4.10. Spazio dipendenza

Come già affermato in precedenza, anche il posto in cui vengono prodotti i materiali influenza il processo produttivo. Si può notare da Tabella 2.10 che gran parte degli studi reperiti sono stati svolti negli Stati Uniti (3 su 8); 2 articoli hanno origine europea; un solo studio è stato svolto in Asia; infine un articolo ha origine dalla collaborazione asiatica ed americana.

2.4.11. Scala di produzione

L'ultimo aspetto importante di questa analisi è la scala di produzione dei CNTs. In realtà vi sono poche informazioni a riguardo perché quasi tutti gli studi reperiti sono riferiti a scala di laboratorio, come si può evincere da Tabella 2.10. Tuttavia, un articolo in particolare ha messo in evidenza questo aspetto, ovvero quello di (Gavankar, et al., 2014).

Si può notare infatti che, nel passaggio da scala di laboratorio a scala di industriale, vi è una riduzione degli impatti: considerando per esempio la categoria del cambiamento climatico, rappresentata in Figura 2.10, si apprezza una differenza di un ordine di grandezza.

Il fatto di reperire comunque dei dati riferiti principalmente alla sola scala di laboratorio permette di ottenere delle quantità effettivamente confrontabili, ma allo stesso tempo si può concludere anche che, i dati ottenuti siano affetti da incertezza, legata all'infrastruttura di laboratorio impiegata.

2.4.12. Nanoargille

Come detto in precedenza, l'analisi relativa alle nanoargille verrà eseguita con particolare riferimento alle montmorilloniti con modifica organica. Inoltre, a causa della scarsità di dati disponibili sulle emissioni e fabbisogni energetici per la produzione delle nanoargille, anche la presente analisi sarà molto ridimensionata, rispetto a quella condotta per i nanotubi. Tuttavia, si ritiene opportuno sfruttare i dati reperiti perché, anche questa tipologia di nanomateriale viene utilizzata nel campo delle pavimentazioni stradali.

2.4.12.3. Studio condotto da (Satish, 2008)

Il primo articolo in analisi è quello di (Satish, 2008). Esso è quello più completo perché fornisce in modo dettagliato, tutti gli step del processo produttivo, nonché le materie prime impiegate ed infine anche l'inventario delle emissioni prodotte ed il fabbisogno energetico necessario, come si riporta in Figura 2.12.

Inputs/ Emissions	Clay mining	Ammonia production	Quaternary-ammonium salt production	Clay processing and modification	Iso-butylene production	Transportation Mt-km	Total
Production kg per kg OMMT clay	1.483	0.080	0.350	1.000	0.270	6.727	
Total energy MJ	2.170	0.896	4.502	14.091	17.204	1.216	40.079
Air emissions							
CO ₂ g	118.88	46.61	258.65	764.01	135.00	84.32	1,407.471
Methane g	0.510	0.217	0.879	3.118	0.000	0.050	4.774
N ₂ O g	0.001	0.001	0.003	0.008	0.000	0.005	0.018
GWP g CO ₂ eq	131.022	51.757	279.696	838.219	135.000	86.94	1,522.628
CO g	0.191	0.170	0.705	1.729	0.108	0.197	3.100
SOx g	0.252	0.100	1.090	2.322	0.810	0.920	5.495
NOx g	0.271	0.095	0.543	1.573	1.620	1.078	5.180
PM g	0.029	0.013	0.118	0.700	0.216	0.063	1.139
Water emissions							
BOD g	0.000	0.004	0.000	0.027	0.011	0.008	0.049
COD g	0.000	0.000	0.001	0.054	0.054	0.066	0.175
Nitrate g	0.000	0.018	0.000	0.000	0.003	0.000	0.022

Note: Data include both direct energy and emissions and life cycle energy and emissions for the fuels used in each stage. Mt-km = megaton-kilometers; CO₂ = carbon dioxide; N₂O = nitrous oxide; GWP = global warming potential; CO = carbon monoxide; SOx = sulfur oxides; NOx = nitrogen oxides; PM = particulate matter; BOD = biological oxygen demand; COD = chemical oxygen demand.

Figura 2.12: inventario degli impatti ambientali ed energetici per la produzione di OMMT (Satish, 2008)

Tutte le voci all'interno di Figura 2.12, fanno riferimento all'unità funzionale di 1 kg di montmorillonite con modifica organica. Si può subito notare come la OMMT valutata in questo studio, risulti decisamente meno impattante rispetto ai nanotubi di carbonio: valutando, per esempio, l'impatto legato al cambiamento climatico e quello energetico, si osservano dei valori rispettivamente pari a 1,52 kg CO₂eq/kg e 40,1 MJ/kg. Si può quindi osservare una differenza di uno o più ordini di grandezza.

2.4.12.4. Studio condotto da (Roes, et al., 2010) - Nanoargille

Considerando ora l'articolo di (Roes, et al., 2010), già citato per i nanotubi di carbonio, l'oggetto della valutazione ambientale è sempre una montmorillonite con modifica organica, con fine di utilizzo nei polimeri nano-compositi. In questo studio, è stata eseguita una valutazione di tipo energetico ed una quantificazione dell'impatto legato al cambiamento climatico. Le specifiche del processo di produzione possono essere reperite nell'articolo (Roes, et al., 2007).

Nel presente studio si osserva un impatto ambientale, il cui valore è pari a 3,55 kg CO₂eq/kg ed un fabbisogno energetico pari a 69,7 MJ/kg. E' importante osservare che il valore di queste voci abbia lo stesso ordine di grandezza riscontrato nello studio precedente. Inoltre, esse risultano comunque più elevate: questo potrebbe essere spiegato dal fatto che nel presente studio si sia adottato un approccio *cradle-to-grave*, al contrario del precedente in cui si è scelto un confine di sistema *cradle-to-gate*.

2.4.12.5. Studio condotto da (Schrijvers, et al., 2014)

L'ultimo studio considerato nel presente elaborato infine, è quello (Schrijvers, et al., 2014), nel quale si valuta la produzione di una OMMT, utilizzata per rinforzare una matrice polimerica, al fine di produrre delle pellicole per la pacciamatura agricola.

Gli aspetti analizzati, come nel caso precedente, sono il fabbisogno energetico e l'impatto legato al cambiamento climatico, per cui si riscontrano rispettivamente dei valori pari a: 72,8 MJ/kg e 3,25 kg CO₂eq/kg.

Si può notare come questi indicatori siano molto simili a quelli riscontrati nell'articolo di (Roes, et al., 2010): questo perché i due studi sono caratterizzati dalla medesima analisi di inventario. Inoltre, in accordo con (Schrijvers, et al., 2014), la piccola differenza riscontrata nei risultati finali tra le due analisi potrebbe essere causata da scelte differenti nel processo di background assunto nello studio LCA.

Si riporta dunque in Tabella 2.26, il prospetto degli impatti ottenuti nei tre diversi studi.

Tabella 2.26: impatto energetico e GWP derivanti dalla produzione di OMMT

Articolo	Fabbisogno energetico (MJ/kg)	GWP (kg CO ₂ eq/kg)
Joshi, 2008	4,01E+01	1,52E+00
Roes, et al., 2010	6,97E+01	3,55E+00
Schrijvers, et al., 2014	7,28E+01	3,25E+00

2.4.13. Confronto nanotubi vs nanoargille

Dopo aver eseguito una panoramica dei diversi studi presenti in letteratura, relativi alla produzione di nanotubi di carbonio e nanoargille, si può procedere con il loro confronto.

Si può notare immediatamente come la produzione di OMMT sia decisamente molto meno impattante dal punto di vista ambientale, rispetto ai nanotubi di carbonio. Per dimostrare ciò, in Figura 2.13, si è realizzata una comparazione "al limite": ovvero si è considerata la tipologia di nanotubo "migliore" e la nanoargilla "peggiore", riscontrati nei diversi studi. Con

i termini “migliore” e “peggiore”, si intende i nanotubi risultati meno impattanti e la OMMT risultata più “pesante” dal punto di vista ambientale.

Le tipologie di impatto che si sono considerate per questo confronto sono quelle che si sono riscontrate quasi in ogni studio: il cambiamento climatico ed il fabbisogno energetico (Figura 2.13).

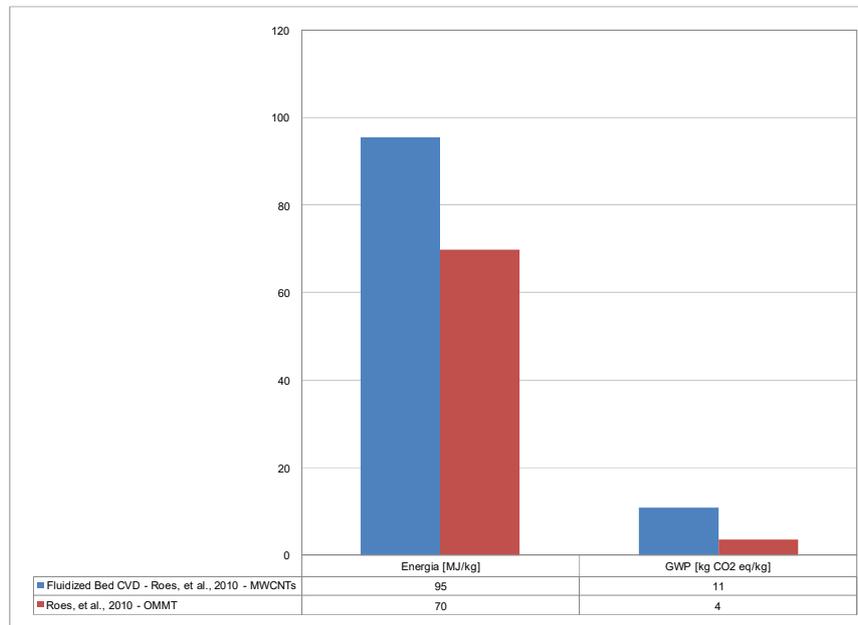


Figura 2.13: confronto tra “migliore” tipologia di CNTs e “peggiore” tipologia di OMMT

Per i nanotubi di carbonio, i dati sono riferiti allo studio di (Roes, et al., 2010), per la produzione di MW, con tecnica *Fluidized Bed CVD*, per cui si hanno i seguenti valori: 11,0 kg CO₂eq/kg e 95,4 MJ/kg. Per le nanoargille, i dati sono riferiti allo studio di (Schrijvers, et al., 2014), per la produzione di OMMT, per cui si hanno i seguenti valori: 3,25 kg CO₂eq/kg e 72,8 MJ/kg.

Si può quindi concludere che in generale, la montmorillonite genera un carico ambientale decisamente più lieve rispetto ai nanotubi di carbonio in generale.

Si ricorda, infine, che questa considerazione è stata eseguita limitatamente sulla base degli articoli reperiti in letteratura.

CAPITOLO 3

MATERIALI E MODELLAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

Il presente capitolo si pone l'obiettivo di definire le caratteristiche dei conglomerati bituminosi e sviluppare la modellazione dei dati sperimentali. La trattazione verrà condotta in ottica progettuale, al fine di ottenere i dati necessari per definire il caso studio, in tutti gli scenari che verranno valutati.

Per quanto concerne i dati sperimentali relativi alle miscele bituminose, si farà riferimento principalmente a: il lavoro di tesi di laurea di Miglietta et al. (2016) "Protocolli di Prova e Modelli di Analisi per lo Studio del Comportamento Meccanico di Conglomerati Bituminosi Nano-Rinforzati" e l'articolo redatto da Santagata et al. (2019) "Impact of Nanosized Additives on the Fatigue Damage Behaviour of Asphalt Mixtures".

3.1. Materiali

Il presente paragrafo si focalizza sulla descrizione dei materiali costituenti i conglomerati bituminosi, specificando anche gli agenti nano-modificanti impiegati e, sulla definizione delle caratteristiche volumetriche della miscela bituminosa oggetto del presente studio.

3.1.1. Bitume base

Il bitume rappresenta la componente fondamentale, insieme agli aggregati, di una miscela bituminosa utilizzata per la costruzione delle pavimentazioni stradali flessibili. Esso costituisce la fase legante della miscela, la cui funzione è quella di legare gli aggregati tra di loro, in modo da ottenere un materiale composito caratterizzato da proprietà meccaniche adeguate a sostenere i carichi veicolari.

Il bitume consiste in una miscela complessa di idrocarburi paraffinici ed aromatici ad alto peso molecolare ed è prodotto dalla distillazione frazionata del greggio di petrolio. Esso è caratterizzato da un comportamento viscoelastico, termo-dipendente e tempo-dipendente: ciò significa che le sue proprietà meccaniche e reologiche dipendono dalla temperatura e dal tempo/frequenza di carico.

Sulla base di studi reologici precedenti, la scelta del legante utilizzato nella sperimentazione degli articoli di riferimento si è orientata verso un bitume appartenente alla classe di penetrazione 70/100.

I risultati dell'analisi SARA (Saturi Aromatici Resine Asfaltene), l'indice di stabilità colloidale (ISC) ed i rapporti Asfaltene/Resine e Saturi/Aromatici vengono riportati in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: caratterizzazione chimica del bitume base 70/100

Bitume 70/100	
Saturi [%]	2,97
Aromatici [%]	65,3
Resine [%]	15,96
Asfalteni [%]	15,77
ISC	0,23
Asfalteni/Resine	0,99
Saturi/Aromatici	0,05

Per quanto riguarda la caratterizzazione reologica del legante, eseguita determinando il Performace Grade (PG), si precisa che il bitume base si può classificare come PG 58-22.

3.1.2. Nano-additivi

Le caratteristiche generali dei nanomateriali in questione sono già state delineate nel Capitolo 2; con questo approfondimento si intende descrivere nel dettaglio le caratteristiche dei nanotubi di carbonio e delle nanoargille utilizzati nella sperimentazione.

3.1.2.1. Nanotubi di carbonio

I nanotubi di carbonio sono la prima tipologia di nanomateriale di cui si esporranno le caratteristiche. Essi, come ampiamente spiegato nel capitolo precedente, sono dei cilindri cavi le cui pareti sono costituite da fogli di grafene arrotolati su sè stessi e le cui basi possono essere chiuse da due calotte fullereniche. A seconda del numero di strati costituenti la parete cilindrica di ogni singola particella di nanomateriale, si possono distinguere: *Single Wall Carbon Nanotubes* (SWCNTs), nel caso di un unico strato costituente; *Multi-Wall Carbon Nanotubes* (MWCNTs), nel caso di parete costituita da più cilindri di grafene coassiali.

Nello specifico, la forma allotropica del carbonio impiegata nella modifica del legante bituminoso corrisponde ai MWCNTs, prodotti via CCVD (*Catalytic Chemical Vapour Deposition*). Si riportano le caratteristiche fisiche del nano-additivo in Tabella 3.2.

Tabella 3.2: caratteristiche fisiche dei MWCNTs impiegati nella sperimentazione

Diametro medio [nm]	Lunghezza media [µm]	Densità superficiale [cm²/g]	Purezza [%]	Densità [g/cm³]
9,5	1,5	250-300	90	1,72

3.1.2.2. Nanoargille

La seconda tipologia di conglomerato innovativo è stata definita impiegando la nanoargilla. Si tratta di una montmorillonite naturale organofila, la cui modifica organica è avvenuta utilizzando un sale di ammonio quaternario. Si riportano le proprietà fisiche del nanomateriale in esame in Tabella 3.3.

Tabella 3.3: caratteristiche fisiche della montmorillonite impiegata nella sperimentazione

Surfattante	Densità [g/cm ³]	Distanza basale [nm]
Sale di ammonio quaternario	1,66	3,15

Come detto in precedenza, la tecnica di produzione delle OMMT si articola in tre fasi:

- estrazione dell'argilla;
- produzione del modificatore organico: in questo caso il sale di ammonio quaternario viene impiegato come surfattante;
- processazione dell'argilla: questa fase è composta da diverse lavorazioni quali separazione, purificazione, delaminazione, reazione con purificatori organici, omogeneizzazione, disidratazione e di riduzione delle dimensioni.

Comunque, per maggiori dettagli si rimanda al Paragrafo 2.2.1.

3.1.3. Tecniche di miscelazione dei bitumi nano-modificati

L'iter svolto per la preparazione del legante innovativo si articola in tre fasi, in accordo con (Santagata, et al., 2019).

1. Miscelazione manuale del nano-additivo con il bitume puro.
2. Miscelazione meccanica mediante *shear mixer*, eseguita per 90 minuti alla velocità di 1550 rpm.
3. Sonicazione della miscela: in questa fase la miscela di bitume e nano-additivo viene investita da onde ultrasoniche di ampiezza pari 157,5 μm , frequenza di 24 kHz e potenza pari a 200 W. Tale processo viene realizzato mediante un omogeneizzatore ad ultrasuoni (o sonicatore) e ha la durata di 60 minuti. La fase di sonicazione risulta fondamentale per disperdere le nano-particelle in modo omogeneo all'interno della matrice bituminosa.

La temperatura del legante è stata mantenuta pari a 150 °C durante tutte le fasi del processo.

La metodologia appena esposta risulta particolarmente importante ai fini della valutazione degli impatti ambientali e consumo di energia legati al processo di produzione dei leganti nano-rinforzati.

3.1.4. Conglomerato bituminoso

Nel presente sotto paragrafo si intende fornire una panoramica completa delle caratteristiche dei conglomerati bituminosi studiati nei lavori di riferimento.

Tale caratterizzazione risulterà fondamentale nei capitoli successivi, quando si eseguirà il progetto e la valutazione del ciclo di vita della pavimentazione poiché si impiegheranno i dati sperimentali disponibili ed i risultati ottenuti nelle due trattazioni.

Come detto in precedenza, il conglomerato bituminoso corrisponde ad una miscela, composta da aggregati grossi, fini e filler, legati tra di loro mediante il bitume. Il comportamento meccanico di questa miscela è di natura molto complessa e dipende da diversi fattori quali: la composizione e le caratteristiche volumetriche, la temperatura e la frequenza/tempo di carico.

Tale materiale è utilizzato per la costruzione degli strati legati delle pavimentazioni flessibili ed è soggetto ad un'attenta procedura di progettazione detta *mix design*, il cui scopo è quello di definire le proporzioni ottimali di ogni componente della miscela stessa, per soddisfare i requisiti prestazionali richiesti.

Il pacchetto legato delle pavimentazioni flessibili si articola in diversi strati in conglomerato bituminoso, i quali differiscono tra di loro per spessore, caratteristiche compositive, volumetriche e meccaniche.

Nei lavori di (Miglietta, et al., 2016) e (Santagata, et al., 2019), sono state analizzate tre miscele bituminose per strato di collegamento.

1. Miscela TAL QUALE: si tratta di un conglomerato di tipo tradizionale, costituito da bitume tal quale 70/100 e aggregati.
2. Miscela modificata con NANOARGILLA: consiste in un conglomerato bituminoso in cui la fase legante è costituita da bitume nano-modificato con una montmorillonite organofila (*organoclay*).
3. Miscela modificata con NANOTUBI DI CARBONIO: in questo caso la miscela è stata additivata con nanotubi di carbonio *multi-wall*.

Si presentano le tre miscele analizzate ed i dosaggi previsti per i nanomateriali in Tabella 3.4.

Tabella 3.4: panoramica delle miscele bituminose analizzate

TIPOLOGIA MISCELA	BITUME	NANOMODIFICANTE	NOMENCLATURA MISCELA
Tradizionale	B70/100	-	TAL QUALE
Modificata con NANOARGILLA	B70/100	Cloisite 15A	NC
Modificata con NANOTUBI DI CARBONIO	B70/100	MWCNTs	CNTs

La consistenza di nano-modificanti impiegata rappresenta il quantitativo ottimale per ottenere una dispersione adeguata degli additivi, una buona lavorabilità della miscela ed inoltre permette di mantenere dei costi di produzione simili a quelli per i bitumi modificati mediante polimeri (e.g. modifica con SBS) (Santagata, et al., 2019).

3.1.4.1. Composizione dello scheletro litico

Al fine di ottenere i requisiti prestazionali richiesti per ogni strato legato, si deve progettare la miscela di aggregati che costituisce lo scheletro litico dei conglomerati bituminosi.

Le miscele in analisi sono state progettate in conformità con il Capitolato ANAS, il quale definisce le linee guida per la progettazione, la costruzione, le prove in sito e la gestione delle pavimentazioni stradali. Per ogni strato di pavimentazione, esso prescrive un fuso granulometrico entro il quale la curva granulometrica di progetto deve essere compresa.

Si riporta in Tabella 3.5 il fuso granulometrico prescritto per lo strato di binder e la curva granulometrica di progetto adottata per realizzare i campioni di conglomerato bituminoso.

Tabella 3.5: fuso granulometrico per strato di binder e curva granulometrica di progetto (Miglietta, et al., 2016)

Setaccio EN [mm]	STRATO BINDER Fuso granulometrico		Curva granulometrica di progetto [%]
	Limite Inferiore [%]	Limite Superiore [%]	
20,0	100,0	100,0	100,0
16,0	90,0	100,0	100,0
14,0	77,0	92,4	91,8
12,5	66,0	86,0	85,7
10,0	59,0	79,0	75,9
8,0	52,0	72,0	65,7
6,3	45,8	65,8	54,4
4,0	34,0	54,0	44,7
2,0	25,0	40,0	34,0
1,0	17,5	31,0	23,1
0,5	10,0	22,0	15,9
0,25	6,0	16,0	11,3
0,125	5,0	12,0	8,3
0,075	4,3	9,0	6,4

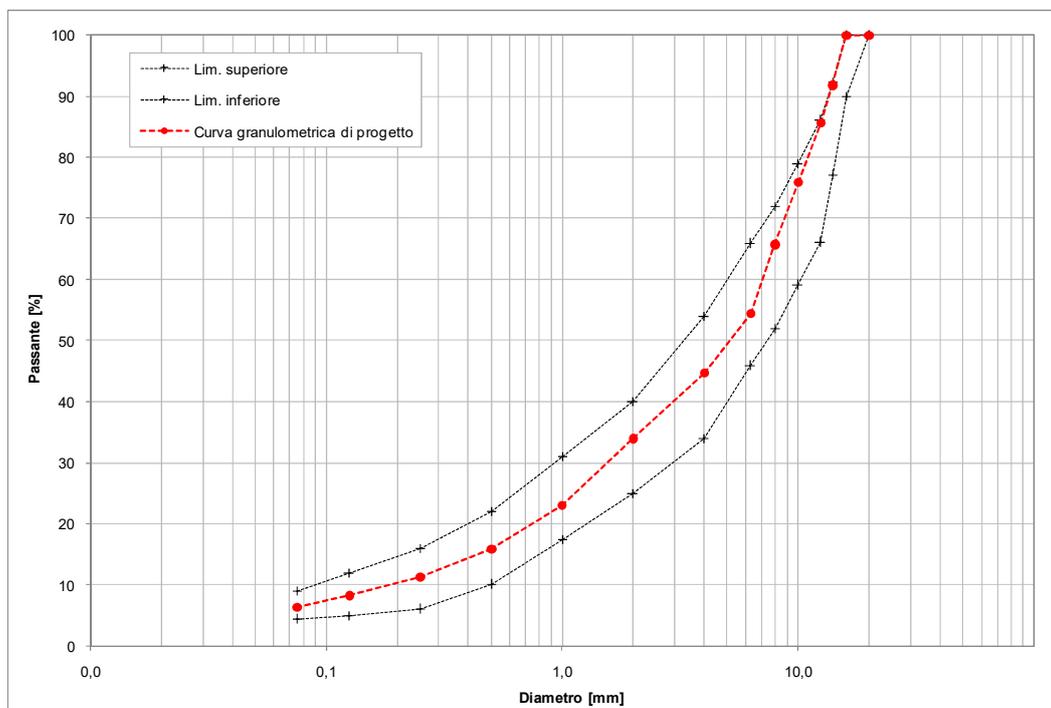


Figura 3.1: curva granulometrica di progetto

Si può notare come la curva granulometrica di progetto della miscela di aggregati, riportata in Figura 3.1, ricada all'interno del fuso prescritto da capitolato.

3.1.4.2. Caratteristiche volumetriche delle miscele

Le proprietà volumetriche delle miscele bituminose influenzano in modo marcato il comportamento strutturale e le risposte nei confronti dei danneggiamenti.

Il *mix design* è stato condotto facendo riferimento alle prescrizioni del Capitolato ANAS. Esso prevede che per lo strato di collegamento siano rispettati dei valori limite in termini di quantità di bitume e di percentuale dei vuoti, riportati in Tabella 3.6.

Tabella 3.6: prescrizioni volumetriche sui conglomerati bituminosi, imposti da Capitolato ANAS

	Base	Collegamento	Usura A
% Bitume sulla miscela	3,8 – 5,2	4,1 – 5,5	4,5 – 6,1
% vuoti	3,0 – 6,0	3,0 – 6,0	3,0 – 6,0

Sulla base delle limitazioni imposte nella Tabella 3.6, nella sperimentazione di (Miglietta, et al., 2016) sono state realizzate le tre miscele con le caratteristiche volumetriche riportate in Tabella 3.7.

Tabella 3.7: massima massa volumica teorica, contenuto di bitume in massa e di vuoti nelle miscele

Miscela	MMVT [kg/m ³]	%Bmix [%]	%v [%]
TAL QUALE	2.578	4,5	4,0
NC	2.569	4,6	4,0
CNTs	2.589	4,5	4,0

Partendo da queste grandezze note e precisando che la densità del bitume impiegato si assume pari a 997,5 kg/m³, si possono determinare le restanti grandezze volumetriche dei tre conglomerati.

Si procede innanzitutto con il calcolo della massa volumica della miscela TAL QUALE attraverso la seguente equazione:

$$MV = \left(1 - \frac{v}{100}\right) \cdot MMVT = \left(1 - \frac{4,0}{100}\right) \cdot 2.578 \text{ kg/m}^3 = 2.475 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

In cui:

- MV corrisponde alla massa volumica del conglomerato bituminoso [kg/m³];
- v corrisponde alla percentuale dei vuoti all'interno del materiale [%];
- MMVT corrisponde alla massima massa volumica teorica della miscela [kg/m³].

Applicando le Equazioni (3.2 – 3.3) si possono determinare le percentuali in termini di volume di bitume ed aggregati nella miscela:

$$V_b(\%) = \frac{\%B_{mix} \cdot MV}{\gamma_b} = \frac{4,5 \cdot 2.475 \text{ kg/m}^3}{997,5 \text{ kg/m}^3} = 11,2\% \quad (3.2)$$

$$V_g(\%) = 100 - v - V_b = 100 - 4,0 - 11,2 = 84,8\% \quad (3.3)$$

Dove

- V_b è la percentuale di bitume rispetto al volume totale della miscela [%];
- $\%B_{mix}$ è la percentuale in massa di bitume sulla massa totale della miscela [%];
- MV è la massa volumica [kg/m^3];
- γ_b è la densità del bitume base che, come detto in precedenza, risulta essere pari a $997,5 \text{ kg/m}^3$;
- V_g è la percentuale volumica di aggregati rispetto al volume complessivo della miscela [%];
- v è la percentuale dei vuoti presenti all'interno della miscela [%].

Si può determinare ora la densità degli aggregati (γ_g), secondo l'espressione (3.4).

$$\gamma_g = \frac{(100 - \%B_{mix}) \cdot MV}{V_g} = \frac{(100 - 4,5) \cdot 2.475 \text{ kg/m}^3}{84,8} = 2.786 \text{ kg/m}^3 \quad (3.4)$$

Nota la percentuale di vuoti (v) e la massima massa volumica teorica (MMVT) delle miscele nano-strutturate, si può determinare la massa volumica (MV) come in Equazione (3.1).

Assumendo che gli aggregati impiegati nella sperimentazione presentino le medesime caratteristiche indipendentemente dalla miscela, si può impiegare γ_g definito nell'Equazione (3.4) per calcolare le percentuali di aggregati e di bitume rispetto al volume totale della miscela, secondo le seguenti formulazioni:

$$V_g = \frac{(100 - \%B_{mix}) \cdot MV}{\gamma_g} \quad (3.5)$$

$$V_b = 100 - v - V_g \quad (3.6)$$

Applicando le Equazioni (3.7 – 3.8) si possono determinare VMA e VFB dei tre conglomerati

$$VMA = v + \left(\frac{\%B_{mix} \cdot MV}{\gamma_b} \right) \quad (3.7)$$

$$VFB = \left(\frac{VMA - v}{VMA} \right) \cdot 100 \quad (3.8)$$

Dove:

- VMA corrisponde al volume dei vuoti presenti all'interno della miscela di aggregati rispetto al suo volume totale [%];
- VFB corrisponde alla percentuale dei vuoti intergranulari della miscela compattata riempiti dal bitume [%].

Queste ultime due grandezze risulteranno fondamentali nella fase di modellazione del modulo dinamico dei conglomerati bituminosi.

Infine, l'ultimo passo per completare la caratterizzazione volumetrica è quello di determinare la densità del bitume nano-modificato, mediante l'espressione:

$$\gamma_b = \frac{\%B_{mix} \cdot MV}{V_b} \quad (3.9)$$

I risultati della procedura di calcolo appena esposta vengono riportati in Tabella 3.8

Tabella 3.8: caratteristiche volumetriche dei conglomerati

Miscela	MV [kg/m ³]	V _b [%]	V _g [%]	γ _b [kg/m ³]	VMA [%]	VFB [%]
TAL QUALE	2.475	11,2	84,8	997,5	15,16	73,62
NC	2.485	10,8	85,2	1.035,3	14,80	72,98
CNTs	2.466	11,5	84,5	982,3	15,55	74,28

Il profilo volumetrico delle tre miscele in analisi risulta quindi completo.

3.2. Caratteristiche meccaniche

Delineata la composizione volumetrica delle miscele oggetto di studio, si procede ora alla caratterizzazione meccanica. A tale scopo, nel presente paragrafo si definiranno il modulo dinamico ed il comportamento a fatica dei tre conglomerati bituminosi.

3.2.1. Curve maestre dei conglomerati

Come detto in precedenza, il conglomerato bituminoso è caratterizzato da un comportamento viscoelastico, tempo-dipendente e termo-dipendente. Questo significa che la risposta tenso-deformativa del materiale nei confronti di un'azione esterna è costituita da una componente di natura elastica ed una componente di tipo viscoso, dipendenti dalla temperatura e dalla frequenza di carico.

Al fine di definire il comportamento delle miscele bituminose, considerando la viscoelasticità, la rigidezza di questi materiali è rappresentata mediante il cosiddetto modulo

complesso. Esso viene definito a mezzo di prove sperimentali eseguite in regime oscillatorio, a differenti frequenze, temperature e livelli tenso-deformativi.

Il modulo dinamico delle miscele bituminose viene descritto mediante attraverso dei diagrammi logaritmici in cui ne si rappresenta l'andamento in funzione della frequenza ridotta o della temperatura. Tali diagrammi sono definiti curve maestre.

In particolare, le curve maestre per i tre conglomerati sono state determinate sperimentalmente attraverso prove di carico ciclico, mediante la macchina di prova AMPT (*Asphalt Mixture Performance Tester*). Tutte le specifiche tecniche relative alla sperimentazione sui materiali in analisi possono essere reperite all'interno del lavoro di (Miglietta, et al., 2016). Nella presente trattazione si riportano solamente i risultati finali, necessari per la progettazione della pavimentazione stradale.

La forma funzionale utilizzata per descrivere le curve maestre dei tre conglomerati corrisponde alla funzione sigmoideale. L'equazione (3.10) riporta dunque l'espressione della funzione sigmoideale impiegata per la modellazione delle curve maestre mentre il valore dei parametri che costituiscono il modello, calibrati con i dati sperimentali, sono riportati in Tabella 3.9.

$$\log|E^*| = \kappa + \frac{\mu - \kappa}{1 + e^{\gamma + \delta \log f_R}} \quad (3.10)$$

In cui:

- $|E^*|$ corrisponde alla norma del modulo complesso del conglomerato bituminoso (detto anche *modulo dinamico*) [MPa];
- κ , μ , γ e δ sono i parametri di calibrazione della funzione sigmoideale [-];
- f_R corrisponde alla frequenza ridotta, calcolata come il prodotto tra la frequenza di carico (f) e lo shift factor (a) [Hz].

Tabella 3.9: parametri della funzione sigmoideale

Miscela	E_a	κ	μ	γ	δ
TAL QUALE	184.375	1,693	4,412	-0,856	-0,759
NC	183.480	1,692	4,476	-0,911	-0,735
CNTs	188.346	1,703	4,430	-0,943	-0,731

Inoltre, al fine di valutare l'evoluzione del modulo complesso nel dominio della frequenza, ma ad una temperatura differente da quella di riferimento, è stato sfruttato il principio di equivalenza tempo-temperatura ovvero “*la variazione di $|E^*|$ per effetto di un cambiamento di frequenza, può essere riprodotta mediante una variazione di temperatura*”. Dal punto di vista pratico, ciò significa traslare i punti sperimentali acquisiti a diverse temperature e frequenze, sul piano $\log(f_R) - \log|E^*|$, attraverso gli *shift factors*, al fine di ottenere la curva maestra ad una temperatura di riferimento.

La funzione considerata per determinare gli *shift factors* corrisponde all'equazione di Arrhenius, riportata in equazione (3.11) e calibrata sulla base dei dati sperimentali.

$$\log a(T) = \frac{E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (3.11)$$

Dove:

- $a(T)$ corrisponde allo shift factor [-];
- E_a corrisponde all'energia di attivazione [J/mol];
- T è la temperatura a cui si intende valutare il modulo complesso [K];
- T_r corrisponde alla temperatura di riferimento, pari a 20°C, da esprimere in [K].

Tuttavia, nel presente lavoro di tesi risulta più utile determinare le curve maestre ad una frequenza di riferimento, dette "isocrone": infatti, in fase di progetto, si assumerà una frequenza di sollecitazione costante pari a 10 Hz ed una temperatura variabile, a seconda del periodo di analisi. A questo scopo, si riportano in Figura 3.2 le isocrone dei tre conglomerati bituminosi in analisi, ottenute ad una frequenza di riferimento pari a 10 Hz.

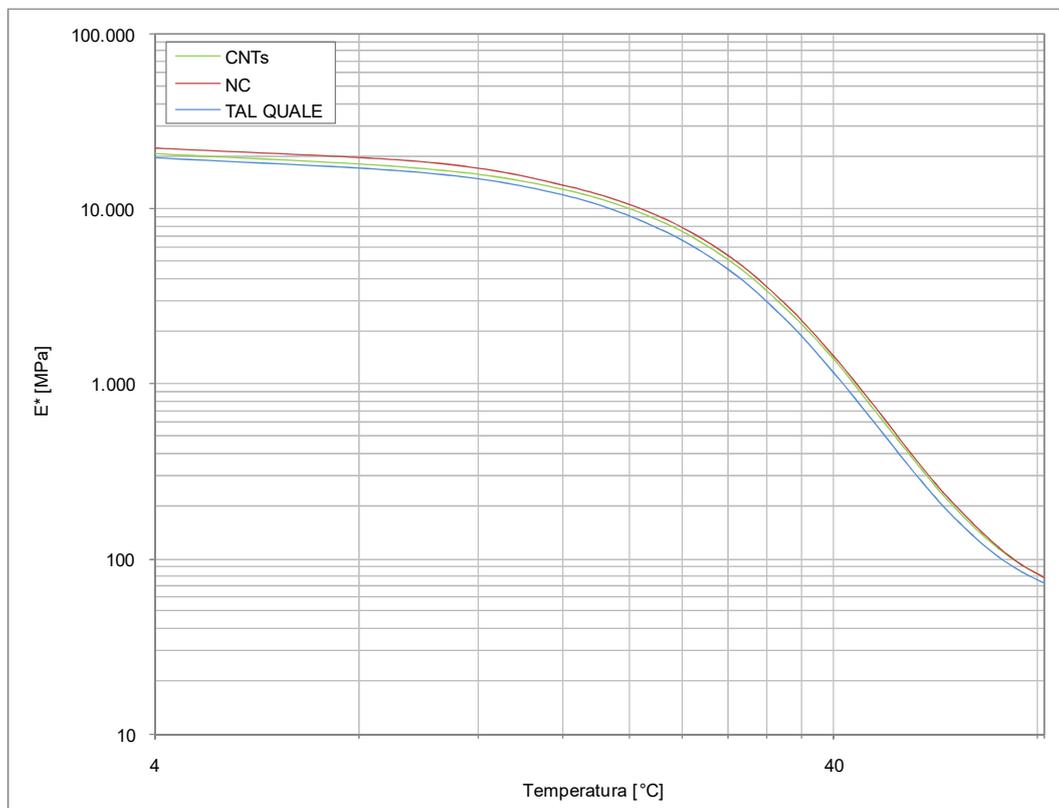


Figura 3.2: curve maestre dei conglomerati bituminosi in analisi

Si può notare come la miscela nano-rinforzata con nanoargille risulti essere caratterizzata dal modulo dinamico più elevato, tra quelle considerate.

3.2.2. Curve di fatica

In generale, il fenomeno della fatica corrisponde ad un processo di progressivo danneggiamento di un materiale, imputato alle deformazioni di trazione, applicate ripetutamente nel tempo.

In particolare, nell'ambito delle pavimentazioni stradali, gli strati legati sollecitati dai carichi transienti, sono sottoposti a degli sforzi di trazione ciclici, che possono portare al collasso per fatica del materiale. Per questo motivo, un'adeguata resistenza delle miscele bituminose nei confronti di tale fenomeno costituisce un requisito fondamentale per garantire la durabilità della sovrastruttura ed evitare fenomeni di ammaloramento precoci.

Le leggi di fatica corrispondono alla quantificazione matematica della resistenza a fatica dei conglomerati bituminosi, mettendo in relazione il numero di cicli a rottura, con l'ampiezza iniziale della deformazione di trazione e la rigidità del materiale, secondo la formulazione riportata in Equazione (3.12).

$$N_{\text{sper}} = f_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{f_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{f_3} \quad (3.12)$$

In cui:

- N_{sper} corrisponde al numero di cicli di applicazione del carico che portano a rottura il materiale;
- ε_t corrisponde all'ampiezza iniziale della deformazione ciclica [m/m];
- E corrisponde al modulo dinamico del conglomerato bituminoso [MPa];
- f_1, f_2, f_3 sono i parametri di regressione.

La calibrazione dell'espressione (3.12), è eseguita sulla base delle indagini sperimentali svolte nel lavoro di tesi di (Miglietta, et al., 2016).

Il comportamento a fatica del materiale è stato studiato mediante delle prove cicliche, eseguite in configurazione di trazione diretta ed in controllo di deformazione. Nello specifico, per ogni tipologia di conglomerato sono stati testati almeno tre provini, alla temperatura di 15 °C e ad una frequenza di carico pari a 10 Hz. Per ogni provino è stata inoltre impostata l'ampiezza della deformazione iniziale e misurato il numero di cicli a rottura del materiale. Si specifica che il criterio di rottura adottato durante la sperimentazione è quello del picco dell'angolo di fase, perché considerato quello più conservativo. Per maggiori specifiche relative alle indagini di laboratorio, si rimanda all'elaborato di (Miglietta, et al., 2016).

Riassumendo, le prove sono state eseguite per diversi livelli di deformazione iniziale ma alla medesima temperatura; questo significa che il coefficiente f_3 non può essere stimato sperimentalmente. Esso, infatti, sulla base dei dati in letteratura, si assume pari a 1,8.

Al contrario, il valore di f_1 e f_2 può essere definito grazie ai diversi livelli deformativi imposti durante i singoli test. Noti $N_{\text{sper}}, \varepsilon_t, E$ dai risultati sperimentali ed f_3 assunto pari ad 1,8, i parametri incogniti sono stati stimati mediante una procedura ai minimi quadrati. Si riportano in Tabella 3.10 i valori dei coefficienti di regressione delle curve di fatica per ognuna delle miscele, mentre in Figura 3.3 si descrive graficamente il comportamento a fatica dei materiali, nel piano bi-logaritmico $\log(N_{\text{sper}}) - \log(\varepsilon_t)$.

Tabella 3.10: parametri di regressione delle curve di fatica

Miscela	f_1	f_2	f_3
TAL QUALE	2,62E-08	5,000	1,8
NC	1,46E-08	5,338	1,8
CNTs	9,41E-04	3,968	1,8

Risulta necessario specificare che si è riscontrata un'anomalia nei dati sperimentali relativi alla miscela TAL QUALE che ha condotto ad un valore di f_2 pari a 12. L'entità di questo parametro è risultata atipica e poco rappresentativa delle caratteristiche reali del materiale. Per questo motivo si è deciso di assumere f_2 pari a 5. Tale valore rispecchia un comportamento ricorrente dei conglomerati bituminosi tradizionali nei confronti della fatica. Fissato il coefficiente di regressione f_2 , si è proceduto con la stima di f_1 , come quanto fatto per le altre miscele.

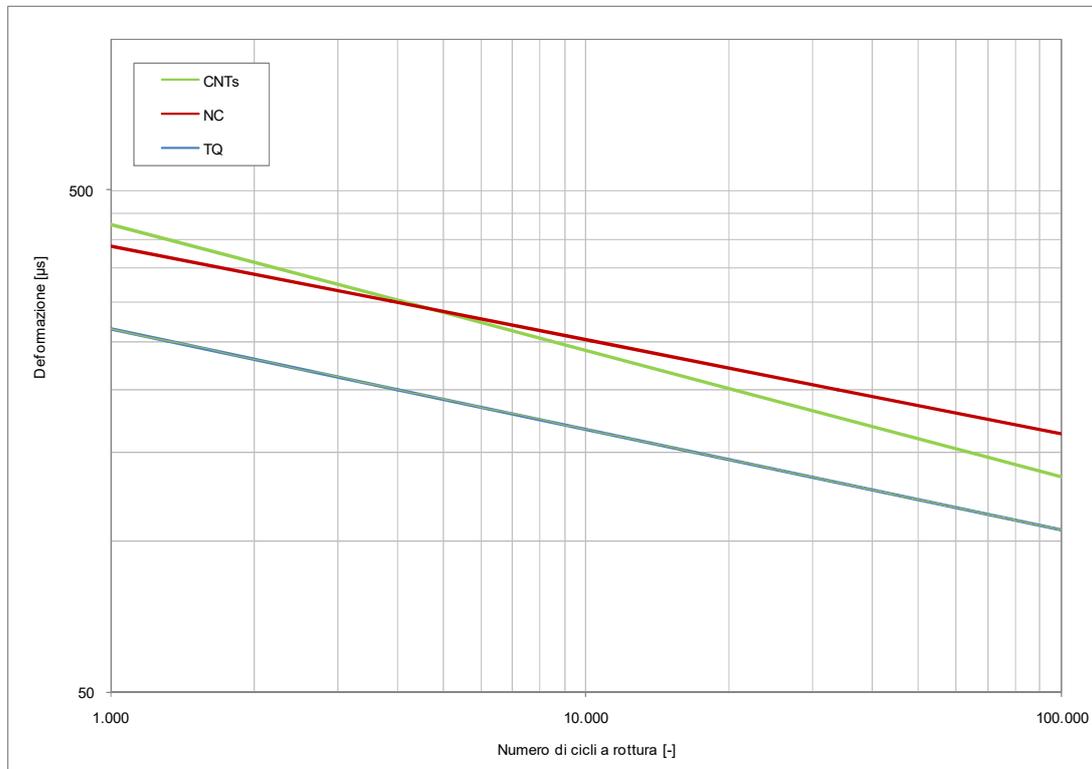


Figura 3.3: curve di fatica delle tre miscele esaminate

I risultati descritti in questo paragrafo risultano fondamentali per la successiva trattazione e costituiscono la base su cui si svolgerà il progetto della pavimentazione e lo studio LCA.

3.3. Modellazione del modulo dinamico

I risultati illustrati fino ad ora riguardano unicamente miscele per strato di collegamento. Tuttavia, in fase di progetto, risulterà necessario definire le proprietà meccaniche di conglomerati bituminosi per strato di usura e base, per le quali si dovrà fare ricorso ad un modello analitico in assenza di informazioni sperimentali. L'obiettivo quindi, è quello di definire il modulo dinamico delle suddette miscele attraverso una formulazione empirica o semi-empirica.

Data la particolarità delle miscele in analisi, si ritiene che l'applicabilità di tale modello possa essere valutata sulla base dell'accuratezza con cui esso rappresenta i dati sperimentali noti.

Il presente paragrafo è quindi incentrato sull'identificazione del modello analitico più adeguato alla stima del modulo dinamico dei conglomerati bituminosi analizzati in precedenza.

Dopo una vasta ricerca in letteratura, diversi modelli per la determinazione di $|E^*|$ sono stati reperiti:

- modello di Francken & Verstraeten;
- modello di Hirsch;
- modello di Bari & Witzak;
- modello NCHRP1-40D;
- modello di Al-Khateeb.

La scelta del modello da utilizzare, è stata eseguita sulla base di un'analisi comparativa, effettuata confrontando i moduli dinamici determinati a partire dalle curve maestre sperimentali con i moduli calcolati attraverso l'applicazione dei modelli di cui sopra.

Tale analisi ha presentato delle criticità intrinseche perché tutti i modelli sono stati calibrati principalmente sulla base di miscele tradizionali, con caratteristiche meccaniche e volumetriche differenti rispetto alle miscele in esame.

Per questo motivo si sono selezionati tre criteri secondo cui eseguire la scelta del modello.

1. Il primo criterio corrisponde a quello di massima somiglianza tra i dati forniti dalla sperimentazione e quelli di modello: dal punto di vista operativo, questo si è tradotto nella valutazione della somma dei quadrati degli scarti risultanti tra $|E^*|$ calcolato mediante le curve maestre ed il corrispondente determinato tramite legge empirica. Il modello più valido risulta essere quello caratterizzato dallo scarto totale minore.
2. Il secondo criterio invece, assume un'ottica progettuale: si sono prediletti i modelli che tendono a sottostimare il modulo dinamico dei conglomerati, a favore di sicurezza.
3. Il terzo ed ultimo criterio, prescrive di valutare i primi due punti, solo ed esclusivamente nel range delle temperature di interesse per il progetto, il quale si assume essere 4 – 40 °C; inoltre si considererà una frequenza di carico costante, sempre pari a 10 Hz, che corrisponde a quella che verrà assunta in fase di progetto.

In allegato si riportano la presentazione dei singoli modelli considerati ed il dettaglio dei passaggi dell'analisi, che ha portato a scegliere il *modello di Hirsch* come più rappresentativo.

Per maggiore chiarezza, si riportano le equazioni che definiscono il modello di Hirsch.

$$|E^*| = Pc \left[E_a \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VMA \cdot VFB}{10000} \right) \right] + (1 - Pc) \left[\frac{1 - VMA/100}{E_a} + \frac{VMA}{3 \cdot VFB \cdot |G^*|_{binder}} \right]^{-1} \quad (3.13)$$

Dove:

- $|E^*|$ rappresenta il modulo dinamico del conglomerato bituminoso [psi]
- E_a rappresenta il modulo elastico degli aggregati, per il quale è previsto un valore pari a 4.230.000 psi ($\pm 6.5\%$) ed è consigliato un valore pari a 4.200.000 psi;
- VMA rappresenta i vuoti presenti all'interno della miscela di aggregati [%];
- VFB corrisponde alla percentuale dei vuoti intergranulari della miscela compattata riempiti dal bitume [%];
- $|G^*|_{binder}$ rappresenta il modulo complesso del bitume utilizzato [psi];
- Pc rappresenta il volume di contatto, che viene stimato attraverso la seguente equazione:

$$Pc = \frac{\left(20 + \frac{VFB \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFB \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (3.14)$$

Risulta necessario specificare che, ai fini della valutazione, i dati di input per l'applicazione del modello semi-empirico, sono stati assunti come segue:

- caratteristiche volumetriche dei conglomerati riportate in Tabella 3.8;
- modulo elastico dell'aggregato E_a pari a 4.200.000 psi;
- modulo complesso dei bitumi determinato sperimentalmente nell'ambito del progetto FIRB "Danneggiamento ed autoriparazione di materiali bituminosi innovativi nano-strutturati e modificati con polimeri". Si riportano in Tabella 3.11, i valori sperimentali di $|G^*|_{binder}$ determinati alle diverse temperature, alla frequenza di riferimento pari a 10 Hz.

Tabella 3.11: valori sperimentali del modulo complesso del bitume base e dei bitumi nano-arricchiti

Temperatura [°C]	$ G^* _{TQ}$ [kPa]	$ G^* _{NC}$ [kPa]	$ G^* _{CNTs}$ [kPa]
4	95.720	122.978	129.003
10	41.926	54.764	58.356
16	15.934	20.666	22.583
22	5.488	7.278	8.069
28	1.842	2.399	2.730
34	619	768	812
40	205	258	243

Come si può evincere da Tabella 3.11, nella modellazione del comportamento dei conglomerati studiati, la nano-modifica degli stessi è stata valutata implicitamente in questa fase, considerando come dato di input i moduli complessi del bitume base e i dei bitumi nano-modificati con nanoargille e nanotubi di carbonio.

Si riporta in Tabella 3.12 il confronto tra i risultati sperimentali (Par. 3.2.1) ed i valori di $|E^*|$ ottenuti attraverso il modello di Hirsch.

Tabella 3.12: confronto dei moduli dinamici determinati sperimentalmente e tramite modello di Hirsch

Temperatura [°C]	CURVA MAESTRA			MODELLO DI HIRSCH		
	$ E^* _{CM,TQ}$ [MPa]	$ E^* _{CM,NC}$ [MPa]	$ E^* _{CM,CNTs}$ [MPa]	$ E^* _{H,TQ}$ [MPa]	$ E^* _{H,NC}$ [MPa]	$ E^* _{H,CNTs}$ [MPa]
4	19.479	22.287	20.480	16.405	17.404	17.315
10	16.028	18.354	17.010	13.371	14.485	14.480
16	11.920	13.733	12.845	9.821	10.850	10.964
22	7.830	9.143	8.624	6.438	7.332	7.486
28	4.520	5.389	5.111	3.886	4.466	4.637
34	2.354	2.871	2.729	2.236	2.532	2.540
40	1.169	1.451	1.379	1.249	1.429	1.350

Si è computata anche la differenza relativa tra i valori contenuti nella tabella di cui sopra, attraverso l'espressione:

$$DR = \frac{|E^*|_{CM} - |E^*|_H}{|E^*|_{CM}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

In cui:

- DR corrisponde alla differenza relativa tra i valori dei moduli dinamici [%];
- $|E^*|_{CM}$ corrisponde al modulo dinamico determinato mediante la curva maestra [MPa];
- $|E^*|_H$ corrisponde al modulo dinamico stimato attraverso il modello di Hirsch [MPa].

Si presentano i risultati in Tabella 3.13.

Tabella 3.13: differenze relative in termini di E^* , tra curva maestra e modello di Hirsch

Temperatura [°C]	DR_{TQ} [%]	DR_{NC} [%]	DR_{CNTs} [%]
4	15,8	21,9	15,5
10	16,6	21,1	14,9
16	17,6	21,0	14,6
22	17,8	19,8	13,2
28	14,0	17,1	9,3
34	5,0	11,8	6,9
40	-6,8	1,5	2,1

Da Tabella 3.13, si può innanzitutto osservare che le differenze relative sono quasi sempre positive e tendono ad assottigliarsi all'aumentare della temperatura; questo significa che il modello di Hirsch tende a sottostimare la rigidità dei conglomerati in questione, in accordo con il secondo criterio di scelta enunciato in precedenza.

Nonostante la formulazione semi-empirica considerata risulti essere la più accurata, si possono notare delle differenze relativamente importanti, specialmente per quanto riguarda il conglomerato nano-rinforzato con nanoargille. Ancora, osservando Tabella 3.13 si può evincere che le differenze esistenti tra la miscela arricchita con nanoargille e quella modificata con nanotubi scompaiono con l'applicazione del modello.

I valori elevati di DR sono dovuti a diversi fattori. Innanzitutto, nel presente studio si stanno considerando dei conglomerati bituminosi innovativi, i quali non sono chiaramente compresi all'interno del database utilizzato per la taratura del modello empirico. In seconda istanza, potrebbe non essere accurato il valore del modulo elastico degli aggregati, assunto a priori pari a 4.200.000 psi. Un altro aspetto da considerare, riguarda nuovamente la banca dati di riferimento del modello: si riporta un prospetto sintetico delle caratteristiche dei conglomerati considerati per la calibrazione delle equazioni in Tabella 3.14.

Tabella 3.14: riassunto delle caratteristiche delle miscele considerate per la calibrazione del modello di Hirsch

Vuoti [%]	VMA [%]	VFB [%]	Temperatura [°C]	Frequenza [Hz]	$ G^* _{bit}$ [MPa]	$ E^* $ [MPa]
5,6 – 11,2	13,7 – 21,6	38,7 – 68,0	4,21 – 38,0	0,1 - 5	20,0 – 3.880	183 – 20.900

Si può notare come i valori relativi alla percentuale dei vuoti, di VFB, della frequenza di carico ed infine dei moduli sperimentali alle basse temperature dei conglomerati in esame, si trovino al di fuori degli intervalli indicati. Infine è necessario specificare che i moduli complessi del bitume riportati in Tabella 3.11, non considerano nessun grado di invecchiamento poiché la sperimentazione è stata condotta sul bitume vergine: questo si traduce in una sottostima $|G^*|_{binder}$, la quale genera a sua volta, una sottostima del modulo del conglomerato calcolato empiricamente.

3.3.4. Correzione del modello di Hirsch

Esaminate le cause principali per cui si riscontra una differenza relativa elevata, si è applicata una procedura per la correzione del modello semi-empirico, al fine di ridurre il valore di DR ed ottenere dei valori di $|E^*|$ maggiormente in linea con quelli sperimentali. Tale procedura si articola in due fasi.

1. Calibrazione del modulo elastico dell'aggregato, nel rispetto dell'intervallo prescritto dal modello di Hirsch.
2. Elaborazione ed applicazione di un coefficiente correttivo da applicare ai valori in output del modello di Hirsch.

3.3.4.1. Calibrazione del modulo elastico dell'aggregato

Si è notato che aumentando il valore di E_a , il modulo dinamico modellato si avvicina a quello sperimentale, con una conseguente riduzione di DR.

Sulla base di questa osservazione, si è eseguita una calibrazione del modulo elastico dell'aggregato, utilizzando lo strumento "Risolutore" di Excel, minimizzando la somma dei quadrati delle differenze tra il modulo stimato con il modello di Hirsch e quello determinato mediante la curva maestra. Inoltre al fine di rispettare i limiti prescritti dalla formulazione semi-empirica, si sono imposti dei valori di massimo e minimo di E_a rispettivamente pari a 4.500.00 psi e 3.955.050 psi (ovvero $4.230.000 \pm 6.5\%$ psi).

L'applicazione di questa procedura ha portato ad ottenere lo scarto minimo in corrispondenza di $E_a = 4.500.000$ psi, in tutti i conglomerati in analisi.

Si riportano dunque i nuovi valori dei moduli dinamici in Tabella 3.15 ed i valori delle differenze relative in Tabella 3.16.

Tabella 3.15: modello di Hirsch, considerando $E_a = 4500000$ psi

Temperatura [°C]	$ E^* _{H,TQ}$ [MPa]	$ E^* _{H,NC}$ [MPa]	$ E^* _{H,CNTs}$ [MPa]
4	17.543	18.607	18.511
10	14.306	15.495	15.490
16	10.513	11.613	11.734
22	6.893	7.851	8.015
28	4.162	4.782	4.966
34	2.395	2.712	2.721
40	1.338	1.531	1.446

Tabella 3.16: differenze relative in termini di E^* , tra curva maestra e modello di Hirsch con $E_a = 4500000$ psi

Temperatura [°C]	DR _{TQ} [%]	DR _{NC} [%]	DR _{CNTs} [%]
4	9,9	16,5	9,6
10	10,7	15,6	8,9
16	11,8	15,4	8,7
22	12,0	14,1	7,1
28	7,9	11,3	2,9
34	-1,8	5,5	0,3
40	-14,4	-5,5	-4,8

Confrontando i risultati ottenuti in Tabella 3.16 con quelli in Tabella 3.13, si può notare una riduzione dell'errore variabile tra 5,4 a 6,6 punti percentuali nell'intervallo di temperatura 4 – 34 °C. Tuttavia si osserva un incremento di DR in corrispondenza di 40 °C, particolarmente marcato nel caso della miscela TAL QUALE.

I nuovi risultati ottenuti si dimostrano decisamente più in linea con i dati sperimentali, tuttavia il distacco risulta ancora non trascurabile soprattutto nel range di temperature 4 – 22 °C. Sussiste quindi la necessità di “migliorare” ulteriormente il modello mediante l'introduzione di un coefficiente correttivo.

3.3.4.2. Formulazione del coefficiente correttivo per il modello di Hirsch

Per completare la correzione del modello, si introduce un coefficiente correttivo che verrà applicato secondo la seguente equazione:

$$|E^*|_{H,corr} = F_C \cdot |E^*|_H \quad (3.16)$$

In cui:

- $|E^*|_{H,corr}$ corrisponde al modulo dinamico corretto [MPa];
- F_C corrisponde al fattore correttivo [-];
- $|E^*|_H$ corrisponde al modulo dinamico determinato mediante il modello di Hirsch [MPa].

Definita la forma funzionale per il calcolo del modulo dinamico “corretto”, si procede ora con la determinazione del fattore correttivo.

Si può notare da Tabella 3.16 che il valore di differenza relativa muta al variare della temperatura del conglomerato. A valle di questa osservazione, si esegue l'assunzione chiave per modellare il coefficiente correttivo: si assume che la differenza relativa (DR) sia una funzione della temperatura (T): in particolare, si identifica la dipendenza da T attraverso una funzione polinomiale di terzo grado. Inoltre si ipotizza che il coefficiente correttivo (F_C) sia funzione di DR e quindi a sua volta funzione di T, come mostrato nelle equazioni sottostanti.

$$DR = f(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (3.17)$$

$$F_C = f[DR(T)] = F_C(T) \quad (3.18)$$

in cui a, b, c e d corrispondono ai coefficienti di regressione del modello assunto. Questi ultimi sono stati calibrati nell'intervallo di temperatura 4-40 °C, per ognuna delle tre miscele.

Graficando i valori di DR(T), determinati in Tabella 3.16, si può notare come, l'approssimazione ad un polinomio di terzo grado risulti accurata poiché si riscontra un valore di R^2 molto vicino all'unità (Figura 3.4).

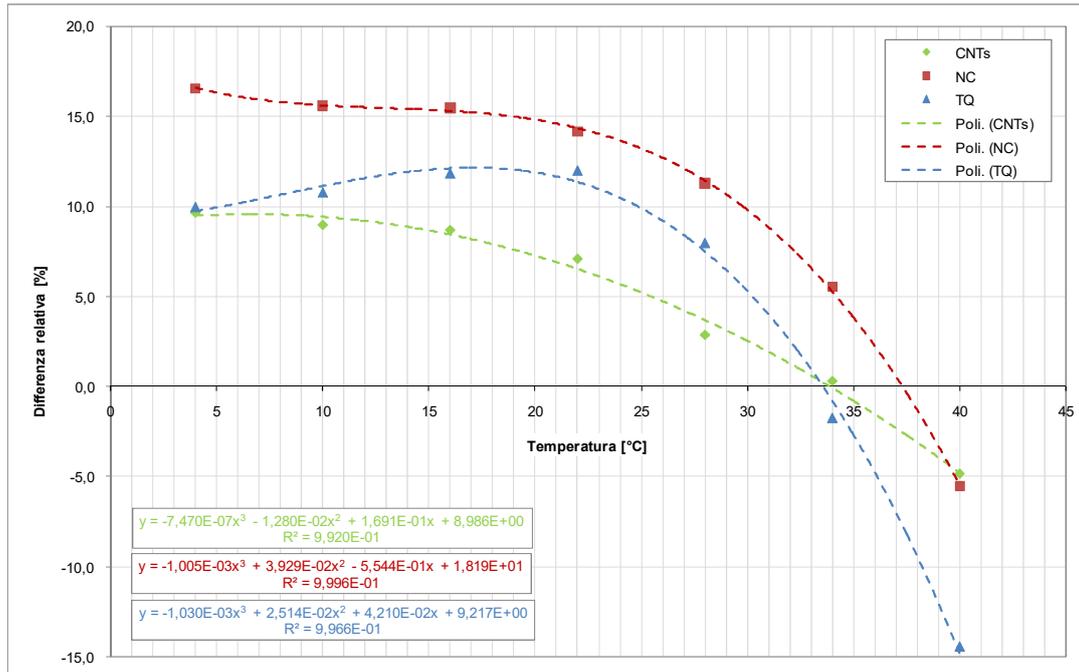


Figura 3.4: andamento di DR in funzione della temperatura

Si riportano inoltre i valori dei coefficienti calibrati in Tabella 3.17.

Tabella 3.17: valore dei coefficienti calibrati per la funzione DR(T), per le tre miscele

Miscela	a	b	c	d
TAL QUALE	-1,030E-05	2,514E-04	4,210E-04	9,217E-02
NC	-1,005E-05	3,929E-04	-5,544E-03	1,819E-01
CNTs	-7,500E-09	-1,280E-04	1,691E-03	8,986E-02

Si ricorda nuovamente che i valori di a, b, c e d sono validi unicamente nell'intervallo di temperatura 4-40 °C.

L'ultimo passo della trattazione relativa alla modellazione del modulo dinamico, consiste nel calcolo e nell'applicazione del coefficiente correttivo al modello di Hirsch. F_C si può calcolare mediante l'espressione:

$$F_C = 1 + DR = 1 + aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (3.19)$$

Applicando F_C ai moduli determinati in Tabella 3.15, si ottengono i nuovi valori di $|E^*|_{H,corr}$ e di DR (Eq. 3.16 – 3.17), presentati in Tabella 3.18, Tabella 3.19 e Tabella 3.20.

Tabella 3.18 :valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato TAL QUALE

Temperatura [°C]	F_C [-]	$ E^* _{H,corr}$ [MPa]	DR_{TQ} [%]
4	1,097	19.248	1,2
10	1,111	15.897	0,8
16	1,121	11.786	1,1
22	1,113	7.675	2,0
28	1,075	4.473	1,0
34	0,992	2.377	-1,0
40	0.852	1.140	2,5

Tabella 3.19: valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato NC

Temperatura [°C]	F_C [-]	$ E^* _{H,corr}$ [MPa]	DR_{NC} [%]
4	1,165	21.685	2,7
10	1,156	17.908	2,4
16	1,153	13.385	2,5
22	1,143	8.974	1,9
28	1,114	5.328	1,1
34	1,053	2.855	0,6
40	0,945	1.448	0,2

Tabella 3.20: valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato CNTs

Temperatura [°C]	F_C [-]	$ E^* _{H,corr}$ [MPa]	DR_{CNTs} [%]
4	1,095	20.262	1,1
10	1,094	16.945	0,4
16	1,084	12.721	1,0
22	1,065	8.536	1,0
28	1,037	5.148	-0,7
34	0,999	2.719	0,4
40	0,952	1.377	0,2

Dalle tabelle di cui sopra, si può notare una consistente riduzione di DR per tutti i conglomerati. Si osserva un errore leggermente più elevato nel caso della miscela rinforzata con nanoargille, che porta ad sottostima più consistente del modulo dinamico alle basse temperature. Tuttavia si può comunque constatare che la correzione del modello risulti efficace per ottenere una previsione dei moduli dinamici più accurata e permette di apprezzare le differenze tra le diverse miscele in termini di rigidità.

CAPITOLO 4

PROGETTO STRUTTURALE DELLA PAVIMENTAZIONE AUTOSTRADALE

Il presente capitolo è incentrato sulla progettazione strutturale di una pavimentazione autostradale e si pone l'obiettivo di comprendere gli effetti determinati dall'impiego di conglomerati bituminosi nano-rinforzati sulla sovrastruttura.

Si procederà dunque con la presentazione del caso studio di riferimento e degli scenari di progetto considerati, continuando con la caratterizzazione climatica del sito di costruzione, la modellazione del traffico di progetto e la caratterizzazione dei materiali costituenti i singoli strati della pavimentazione, concludendo con la definizione degli spessori e la verifica finale della sovrastruttura.

4.1. Definizione del caso studio e degli scenari di progetto

Il caso studio trattato nel presente lavoro di tesi consiste nella progettazione strutturale della pavimentazione dell'Autostrada A32 Torino – Bardonecchia (Sitaf S.p.A.). Il tratto di infrastruttura su cui si ipotizza la costruzione della nuova pavimentazione è sito in corrispondenza del casello di Avigliana (Figura 4.1).

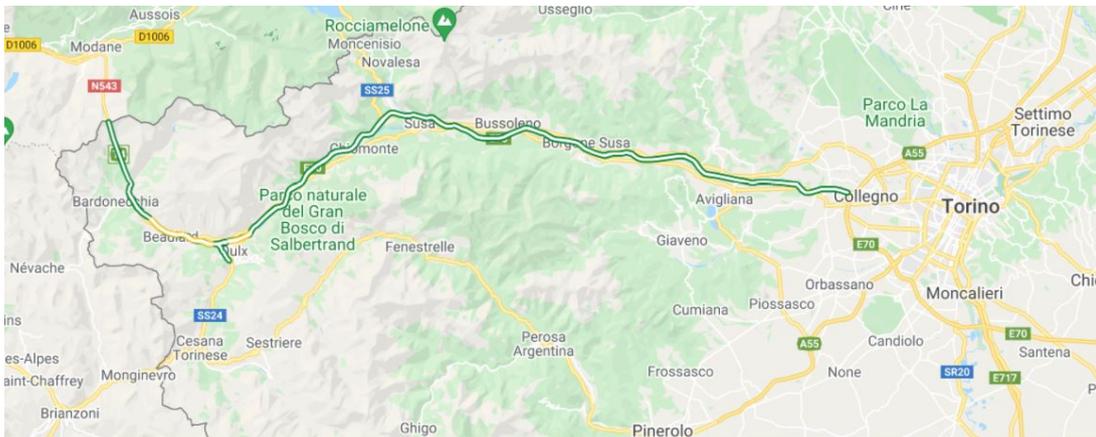


Figura 4.1: inquadramento geografico autostrada A32 (Sitaf S.p.A.)

La presente trattazione si basa su un'analisi comparativa in cui si esamina il caso studio della sovrastruttura autostradale, valutando tre scenari differenti. Per ogni scenario si prevede la tipologia strutturale di pavimentazione flessibile, caratterizzata da una configurazione "full-depth", formata dallo strato di usura, collegamento, base e strato di fondazione in misto granulare.

Le ipotesi di progetto differiscono tra di loro per l'impiego di miscele differenti per lo strato di collegamento e di base. Gli scenari in cui si articola il caso studio sono organizzati come segue.

- **S-TQ (TAL QUALE):** in questo scenario si procede al dimensionamento di una pavimentazione in cui lo strato di binder e base sono realizzati in conglomerato bituminoso tradizionale. Esso corrisponde allo scenario di riferimento poiché rappresenta la base per il confronto con le altre pavimentazioni, realizzate con materiali innovativi.
- **S-NC (Nanoclay):** in questa seconda ipotesi progettuale si considererà una sovrastruttura in cui i due strati legati inferiori verranno realizzati in miscele bituminose nano-rinforzate con nanoargille.
- **S-CNTs (Carbon Nanotubes):** in quest'ultimo scenario, si propone il dimensionamento di una pavimentazione in cui lo strato di binder e di base verranno progettati in conglomerato nano-rinforzato con nanotubi di carbonio *multi-wall*.

Indipendentemente dallo scenario, lo strato di usura è formato da conglomerato bituminoso tradizionale e fondazione in misto granulare.

Il fine ultimo della fase di progetto è quello di analizzare come variano gli spessori degli strati della pavimentazione nei tre scenari, al fine di valutare i risultati derivanti dall'impiego delle miscele innovative, dal punto di vista strutturale.

4.1.1. Premessa progettuale

La progettazione e la verifica della pavimentazione verrà eseguita nei confronti delle due principali forme di degrado indotte dal traffico veicolare: la fessurazione per fatica e accumulo di deformazioni permanenti.

La prima forma di degrado è stata considerata per gli strati legati assumendo un meccanismo di danneggiamento di tipo "*bottom-up*": significa che si suppone che le fessure indotte dagli sforzi di trazione per il carico veicolare si generano alla base degli strati in conglomerato bituminoso e si propagano verso la superficie.

La seconda forma di ammaloramento considerata corrisponde all'accumulo di deformazioni permanenti (detto anche *ormaiamento*). In questo caso, il danneggiamento della pavimentazione è imputato alle deformazioni di compressione, in direzione verticale, in sommità del sottofondo.

La metodologia di progetto adottata nel presente elaborato corrisponde ad un approccio empirico-razionale. Esso coniuga l'approccio razionale, attraverso il quale si valuta la risposta strutturale della pavimentazione, con l'impiego di leggi di degrado strutturale di natura empirica.

Come verrà meglio esposto in seguito, l'approccio progettuale è di tipo iterativo: verrà definita una stratigrafia della pavimentazione di primo tentativo, di cui si eseguirà l'analisi strutturale al fine determinare il numero ammissibile di applicazioni dei carichi veicolari mediante le funzioni di trasferimento. Si condurrà la procedura di verifica basata sul concetto di cumolazione lineare del danno per ogni tipologia di degrado analizzato. Il criterio di

verifica prescrive che la somma dei danni relativi ad ogni periodo di analisi risulti inferiore o uguale all'unità.

4.2. Caratterizzazione climatica del sito di costruzione

Il primo passo della procedura di progetto è quello di eseguire la caratterizzazione climatica del sito di costruzione dell'infrastruttura. Essa risulta particolarmente rilevante al fine di considerare l'effetto del clima sulla rigidezza dei materiali costituenti la pavimentazione.

Nel presente studio si procederà alla progettazione della sola sovrastruttura costituita dagli strati legati e dalla fondazione in misto granulare; questo significa che gli effetti delle precipitazioni possono essere trascurati poiché il grado di umidità influenza principalmente le prestazioni meccaniche del sottofondo. A tal proposito, si anticipa che si assumerà un valore del modulo elastico del sottofondo univoco per tutti i periodi di analisi, che risulterà a favore di sicurezza.

Al fine di valutare l'effetto della temperatura sulla pavimentazione, si farà riferimento a 12 periodi di analisi, coincidenti con i mesi dell'anno, all'interno dei quali è ammesso considerare condizioni meteorologiche omogenee.

I dati di temperatura dell'aria sono stati reperiti presso la banca dati ufficiale dell'ARPA Piemonte (ARPA Piemonte). Al fine di consultare il database meteorologico è stato necessario installare un applicativo scaricato dal sito dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente, sezione "Rischi Naturali". Esso ha permesso di selezionare la provincia e la stazione meteorologica di riferimento, come si può notare in Figura 4.2.

ARPA Piemonte - Banca dati meteorologica

Anagrafica stazione: TERMOGRO-PLUVIOMETERICA CON RADIMETRO
 Tipo stazione: 142
 Codice stazione: 340
 Quota sito (metri): 340
 Comune: AVOLHANA
 Provincia: (C)
 Sacco: DORA RIPARIA
 Località: GRANGIA
 Inizio pubblicazione: 1991-01-09
 Fine pubblicazione: ATTIVA

Localizzazione

Valori aggregati giornalieri

Data	Precipitazione dalle 0 alle 9	Precipitazione dalle 9 alle 18	Temperatura media (°C)	Temperatura massima (°C)	Temperatura minima (°C)	Umidità' media (%)	Umidità' massima (%)	Umidità' minima (%)	Velocità'
01/01/2020	0,0	0,0	2,9	13,0	-2,4	81	100	37	
02/01/2020	0,0	0,0	1,9	12,0	-3,0	84	100	43	
03/01/2020	0,0	0,0	1,6	9,1	-2,2	87	99	56	
04/01/2020	0,0	0,0	3,4	15,9	-1,1	78	99	34	
05/01/2020	0,0	0,0	3,3	13,3	-2,1	77	99	37	
06/01/2020	0,0	0,0	0,8	8,2	-3,4	90	100	63	
07/01/2020	0,0	0,0	0,3	8,9	-3,0	92	100	38	
08/01/2020	0,0	0,0	2,2	10,9	-3,8	83	100	38	
09/01/2020	0,0	0,0	1,7	10,5	-3,3	83	100	45	
10/01/2020	0,0	0,0	2,9	11,3	-2,7	83	99	55	
11/01/2020	0,0	0,0	3,6	13,5	-2,2	75	99	34	
12/01/2020	0,0	0,0	1,8	10,2	-3,4	78	98	37	
13/01/2020	0,0	0,0	0,5	8,2	-4,2	87	100	56	
14/01/2020	0,0	0,0	0,5	7,8	-3,8	87	100	56	
15/01/2020	0,0	0,0	1,2	9,5	-3,4	83	100	45	
16/01/2020	0,0	0,0	1,9	9,9	-3,3	83	100	50	
17/01/2020	0,0	0,0	3,4	10,5	-2,8	83	100	44	
18/01/2020	0,2	0,3	3,3	11,0	-2,3	88	100	59	
19/01/2020	0,0	0,0	1,9	9,7	-3,2	66	94	30	
20/01/2020	0,0	0,0	2,1	9,1	-2,6	70	91	34	
21/01/2020	0,0	0,0	0,7	6,4	-3,7	75	96	44	
22/01/2020	0,0	0,0	1,9	11,8	-4,3	75	97	30	
23/01/2020	0,0	0,0	1,2	10,0	-3,1	80	97	41	
24/01/2020	0,0	0,0	2,1	8,1	-3,1	79	98	50	
25/01/2020	0,0	0,0	3,6	10,5	-0,9	77	98	47	
26/01/2020	0,0	0,0	2,3	10,8	-3,1	84	100	50	
27/01/2020	0,0	0,0	2,9	10,6	-3,3	86	100	54	
28/01/2020	0,0	0,0	6,8	14,8	0,7	72	100	26	
29/01/2020	0,0	0,0	11,5	15,1	3,2	38	88	25	
30/01/2020	0,0	0,0	4,8	13,2	-1,6	69	94	35	
31/01/2020	0,0	0,0	5,2	15,4	-1,6	81	100	42	
01/02/2020	0,0	0,0	5,9	12,3	0,8	86	100	63	
02/02/2020	0,0	0,0	6,7	16,2	0,2	88	100	55	
03/02/2020	0,0	0,0	18,0	25,7	6,4	39	100	17	
04/02/2020	0,0	0,0							
05/02/2020	0,0	0,0							
06/02/2020	0,0	0,0				55	81	4	
07/02/2020	0,0	0,0	2,8	13,0	-3,4	81	90	24	
08/02/2020	0,0	0,0	3,0	11,8	-2,8	75	98	38	
09/02/2020	0,0	0,0	3,4	10,8	-2,3	78	96	46	
10/02/2020	0,0	0,0	9,8	20,6	-1,0	57	94	14	
11/02/2020	0,0	0,0	14,4	17,2	11,5	29	45	19	
12/02/2020	0,0	0,0	10,0	15,4	0,1	23	75	8	
13/02/2020	0,0	0,0	4,9	12,2	-2,4	54	91	26	
14/02/2020	0,0	0,0	6,3	16,8	-0,7	65	95	23	

Figura 4.2: dati meteorologici forniti dall'applicativo ARPA Piemonte

Nel caso specifico, si è selezionata la stazione meteorologica di Avigliana.

Come si può notare da Figura 4.2, nella parte superiore della schermata l'applicativo riporta i dati anagrafici della stazione di riferimento e la sua localizzazione (in alto a destra). Cliccando sull'icona della fotografia è permesso anche visionare il sito di installazione della stazione. Nella parte inferiore si può scegliere l'anno di riferimento per i dati meteorologici. In ultimo, nella parte centrale della schermata vengono presentati i valori giornalieri o mensili di grandezze climatiche quali: le altezze di precipitazione, le temperature massime, minime e medie giornaliere, umidità massima e minima, velocità media delle raffiche di vento e radiazione solare totale. Tutti i dati sono scaricabili in un file formato “.csv”, per l'elaborazione successiva.

Nell'ambito del presente progetto, si è considerato lo storico delle temperature massime e minime giornaliere nell'intervallo temporale 2010 – 2020. La temperatura di progetto dell'aria (T_A) è stata definita secondo la seguente procedura.

1. Si sono determinate le temperature medie massime e minime per ogni mese, relative ad ogni anno appartenente all'intervallo temporale di riferimento. In questo modo, ad esempio, per il mese di Gennaio si è ottenuta una serie di coppie di valori del tipo: $T_{\max,2010} - T_{\min,2010}$, $T_{\max,2011} - T_{\min,2011}$, $T_{\max,2012} - T_{\min,2012}$, ..., $T_{\max,2020} - T_{\min,2020}$;
2. Si è calcolata la media delle temperature massime e minime mensili definite al passo precedente, definita sull'arco temporale di riferimento. Dal punto di vista operativo, si sono divisi i valori calcolati nello step (1) per gli 11 anni considerati (2010-2020). In questo modo sono state definite T_{\max} e T_{\min} riportate in Tabella 4.1.
3. In ultimo, la temperatura di progetto dell'aria per ogni periodo di analisi è stata calcolata definendo il valore medio tra T_{\max} e T_{\min} . Si riportano i valori di T_A in Tabella 4.1.

Tabella 4.1: temperature medie massima, minima mensile e temperatura media di progetto dell'aria

Mese	T_{\max} [°C]	T_{\min} [°C]	T_A [°C]
Gennaio	8,7	-2,2	3,2
Febbraio	10,2	-1,3	4,5
Marzo	15,0	2,7	8,8
Aprile	19,5	6,8	13,2
Maggio	23,0	10,5	16,8
Giugno	27,6	14,8	21,2
Luglio	30,2	16,6	23,4
Agosto	29,6	16,2	22,9
Settembre	25,2	12,4	18,8
Ottobre	18,8	7,7	13,3
Novembre	13,0	3,1	8,0
Dicembre	9,4	-1,8	3,8

I valori di T_A saranno successivamente utilizzati per il calcolo della temperatura degli strati legati della pavimentazione attraverso l'equazione empirica proposta da Witczak (Equazione 4.1).

$$T_P = \frac{5}{9} \cdot \left[\left(\frac{9}{5} \cdot T_A + 32 \right) \left(1 + \frac{1}{\frac{z}{2,54} + 4} \right) - \frac{34}{\frac{z}{2,54} + 4} - 26 \right] \quad (4.1)$$

In cui:

- T_P corrisponde alla temperatura dello strato in conglomerato bituminoso alla profondità intermedia [°C];
- T_A corrisponde alla temperatura dell'aria [°C];
- z corrisponde alla profondità cui si intende valutare la temperatura (cm). Per ogni strato valutato, si farà riferimento ad una profondità intermedia.

Questa equazione verrà applicata in seguito nella fase di dimensionamento degli spessori della pavimentazione.

4.3. Analisi del traffico

Nel presente sotto paragrafo si è eseguito un'analisi del traffico con l'obiettivo di stimare i carichi agenti sulla sovrastruttura nell'arco della sua vita di servizio.

Si è condotto uno studio di traffico basato su rilievi reali eseguiti dalla società concessionaria dell'Autostrada A32 Torino – Bardonecchia (Sita S.p.A.). Ai fini della stima, si è considerata la vita di servizio della pavimentazione pari a 20 anni.

I volumi di traffico sono stati rilevati annualmente dal 1999 fino ad oggi, in corrispondenza di due punti dell'autostrada: Avigliana e Salbertrand. Si riporta in Figura 4.3 un esempio di report annuale dei rilievi riferito alla stazione di Avigliana.

Autostrada A32 – Dati traffico 2019

Evoluzione Mensile del Traffico nel 2019

Traffico Avigliana	Veicoli Leggeri	Veicoli Pesanti	Traffico Totale
Gennaio	293.516	103.003	396.519
Febbraio	275.661	101.516	377.177
Marzo	297.326	109.438	406.764
Aprile	241.903	101.929	343.832
Maggio	211.021	108.045	319.066
Giugno	288.219	112.773	400.992
Luglio	388.834	133.888	522.722
Agosto	440.251	98.708	538.959
Settembre	250.417	110.817	361.234
Ottobre	225.846	115.274	341.120
Novembre	202.475	102.694	305.169
Dicembre	315.448	94.111	409.559
TOTALE			
<i>Dall'inizio dell'anno</i>	3.430.917	1.292.196	4.723.113

Figura 4.3: report annuale dei volumi di traffico riferito al tratto autostradale di Avigliana

Osservando Figura 4.3, si può notare innanzitutto la suddivisione dell'anno solare in 12 periodi di rilievo, che permette di apprezzare l'evoluzione mensile del traffico veicolare. Inoltre, sulla base delle specifiche del rilievo fornite da Sitaf S.p.A., il numero di veicoli presenti per ogni periodo di analisi è comprensivo dei flussi in entrambi i sensi di marcia. In ultimo, si può osservare che è stata messa in evidenza anche la distinzione tra veicoli leggeri e veicoli pesanti generici.

Risulta necessario specificare che per “veicoli pesanti” si intendono tutti gli autoveicoli aventi massa complessiva a pieno carico, superiore a 3,5 tonnellate. Questa definizione, applicata da Sitaf S.p.A., si trova in linea con quella adottata nel presente elaborato.

Per lo svolgimento dello studio di traffico si considerano i rilievi eseguiti presso la stazione di Avigliana, riferiti all'arco temporale 1999 – 2020.

Si assume, inoltre, che il danneggiamento della pavimentazione avvenga solamente a causa dei veicoli pesanti. Sulla base di questa ipotesi, la stima del traffico di progetto verrà eseguita mediante la seguente equazione.

$$T_p = 365 \cdot TGM_1 \cdot \frac{TP}{100} \cdot F_D \cdot F_C \cdot F \quad (4.2)$$

In cui:

- T_p corrisponde al traffico di progetto, espresso come numero di veicoli pesanti in transito sulla corsia di progetto, nel periodo di riferimento di progetto;
- TGM_1 corrisponde al traffico medio giornaliero previsto al primo giorno di apertura della strada, riferito all'intera sezione (comprensivo dei flussi in entrambi i sensi di marcia);
- TP corrisponde alla percentuale di veicoli pesanti [%];
- F_D corrisponde al fattore di distribuzione del traffico per senso di marcia, il quale viene assunto pari a 0,5;
- F_C corrisponde al fattore di distribuzione del traffico per corsia, per il quale si ritiene opportuno assumere un valore pari a 0,9, in quanto si esegue la progettazione strutturale di un'autostrada a due corsie per senso di marcia;
- F corrisponde al fattore di crescita del traffico cumulato, che si può determinare attraverso l'espressione (4.3)

$$F = \frac{(1 + 0,01 \cdot r)^A - 1}{0,01 \cdot r} \quad (4.3)$$

Dove r corrisponde al tasso di crescita annuale [%] mentre A rappresenta il periodo di progetto espresso in anni.

4.3.1. Stima del tasso di crescita r

Per la determinazione di T_p è necessario determinare il tasso di crescita del traffico sulla base dei dati storici. La stima di r è eseguita applicando un procedura semplificata, basata sulle Equazioni (4.2) e (4.3).

Considerando i dati noti relativi all'intervallo 1999 – 2020, si procede con il calcolo della percentuale annuale media dei veicoli pesanti (TP), del traffico cumulato totale annuale e del traffico medio giornaliero (TGM) (Tabella 4.2).

Tabella 4.2: prospetto del traffico annuale riferito al periodo 1999-2000, in corrispondenza di Avigliana

Traffico Avigliana	Veicoli leggeri	Veicoli pesanti	N totale veicoli	TP [%]	Traffico cumulato totale	TGM (veh/giorno)
1999	2.931.404	1.396.119	4.327.523	32,3	4.327.523	11.856
2000	3.252.932	1.569.432	4.822.364	32,5	9.149.887	13.212
2001	3.436.875	1.562.095	4.998.970	31,2	14.148.857	13.696
2002	3.466.737	1.515.079	4.981.816	30,4	19.130.673	13.649
2003	3.805.538	1.287.903	5.093.441	25,3	24.224.114	13.955
2004	3.400.291	1.590.252	4.990.543	31,9	29.214.657	13.673
2005	3.433.952	1.338.371	4.772.323	28	33.986.980	13.075
2006	3.672.327	1.447.916	5.120.243	28,3	39.107.223	14.028
2007	3.702.105	1.459.124	5.161.229	28,3	44.268.452	14.140
2008	3.758.532	1.381.628	5.140.160	26,9	49.408.612	14.083
2009	3.726.470	1.174.127	4.900.597	24	54.309.209	13.426
2010	3.728.946	1.216.779	4.945.725	24,6	59.254.934	13.550
2011	3.618.355	1.222.180	4.840.535	25,2	64.095.469	13.262
2012	3.275.196	1.126.987	4.402.183	25,6	68.497.652	12.061
2013	3.188.031	1.086.254	4.274.285	25,4	72.771.937	11.710
2014	3.138.535	1.087.139	4.225.674	25,7	76.997.611	11.577
2015	3.284.187	1.115.319	4.399.506	25,4	81.397.117	12.053
2016	3.304.378	1.168.782	4.473.160	26,1	85.870.277	12.255
2017	3.494.164	1.207.592	4.701.756	25,7	90.572.033	12.882
2018	3.455.440	1.290.311	4.745.751	27,2	95.317.784	13.002
2019	3.430.917	1.292.196	4.723.113	27,4	100.040.897	12.940
2020	2.567.714	1.132.984	3.700.698	30,6	103.741.595	10.139

Il traffico di progetto annuale misurato ($T_{p,m}$) è definito utilizzando i valori ricavati in Tabella 4.2 e l'Equazione (4.2), per ogni anno. Si riportano i valori in Tabella 4.3.

Si procede ora alla determinazione del traffico di progetto annuale stimato ($T_{p,s}$). A tal fine si ipotizza un valore di primo tentativo del tasso di crescita, assunto pari a 1%. Si determina quindi il valore del fattore di crescita annuale attraverso l'Equazione (4.3), impostando come anno iniziale il 1999. Si può determinare ora $T_{p,s}$ mediante l'Equazione (4.4).

$$T_{p,s} = 365 \cdot TGM_{1999} \cdot \frac{TP_{1999}}{100} \cdot F_D \cdot F_C \cdot F_i \quad (4.4)$$

In cui:

- TGM_{1999} è il traffico medio giornaliero riferito all'anno 1999;
- TP_{1999} è la percentuale di veicoli pesanti riferita all'anno 1999;
- F_i è il fattore di crescita relativo all' i -esimo anno considerato, calcolato come

$$F_i = \frac{(1 + 0.01 \cdot r)^{(i-1999)} - 1}{0.01 \cdot r} \quad (4.5)$$

L'ultimo passo consiste nel calcolo della somma dei quadrati delle differenze dei due valori di traffico, secondo l'equazione (4.6).

$$SQ_{diff} = \sum_i (T_{P,m} - T_{P,s})^2 \quad (4.6)$$

Si applica quindi lo strumento "Risolutore" di Excel, al fine di minimizzare SQ_{diff} , considerando come variabile indipendente il tasso di crescita.

Lo svolgimento di questa procedura ha condotto ad un valore di r circa pari a zero. Questo significa che si è rilevato un numero costante di veicoli transitanti sul tratto di autostrada in corrispondenza di Avigliana. In effetti, tale andamento trova riscontro in Tabella 4.2, dove si nota una variazione molto ridotta del numero di veicoli pesanti nell'arco degli anni; talvolta in realtà si possono osservare anche delle fluttuazioni negative del traffico.

In definitiva, gli esiti dell'analisi di cui sopra hanno portato a considerare in sede progettuale un tasso di crescita costante durante la vita di servizio della pavimentazione, pari al 2%. Esso è stato assunto a favore di sicurezza ed in accordo con le indicazioni reperite in letteratura tecnica.

Quindi applicando nuovamente l'Equazione (4.4), considerando r pari a 2%, si ottengono i valori rappresentati in Tabella 4.3

Tabella 4.3: traffico stimato durante il periodo di esercizio della pavimentazione

Traffico Avigliana	F_D [-]	F_C [-]	r [%]	F [-]	$T_{P,s}$	$T_{P,m}$
1999	0,5	0,9	2	1	628.254	628.254
2000				2,02	1.269.072	1.334.498
2001				3,06	1.922.707	2.037.441
2002				4,12	2.589.415	2.719.226
2003				5,2	3.269.457	3.298.783
2004				6,31	3.963.099	4.014.396
2005				7,43	4.670.615	4.616.663
2006				8,58	5.392.281	5.268.225
2007				9,75	6.128.380	5.924.831
2008				10,95	6.879.201	6.546.564
2009				12,17	7.645.039	7.074.921
2010				13,41	8.426.193	7.622.471
2011				14,68	9.222.970	8.172.452
2012				15,97	10.035.683	8.679.596
2013				17,29	10.864.651	9.168.411
2014				18,64	11.710.197	9.657.623
2015				20,01	12.572.655	10.159.517
2016				21,41	13.452.361	10.685.469
2017				22,84	14.349.662	11.228.885
2018				24,3	15.264.909	11.809.525
2019	25,78	16.198.461	12.391.013			
2020	27,3	17.150.683	12.900.856			

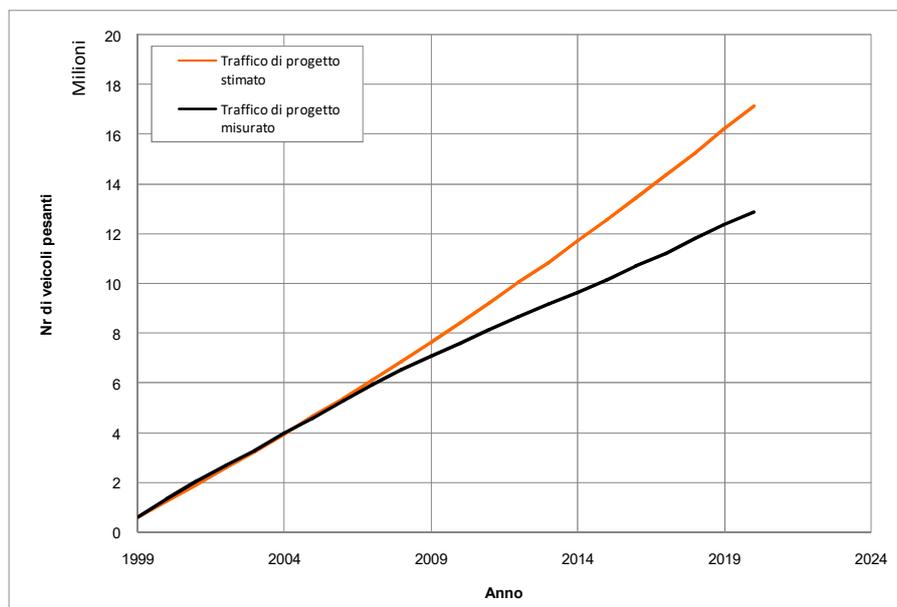


Figura 4.4: confronto tra traffico stimato e misurato nell'intervallo 1999-2000

Come si può notare da Tabella 4.3 e da Figura 4.4, l'impiego di un tasso di crescita pari al 2%, comporta una sovrastima del traffico pesante, a favore di sicurezza.

4.3.2. Determinazione del traffico di progetto

Determinato il tasso di crescita, si procede con la stima del traffico di progetto. Per maggiore chiarezza si riporta in Tabella 4.4 un prospetto riassuntivo dei parametri considerati per la determinazione di T_p .

Tabella 4.4: valori di input per la definizione del traffico di progetto

TGM₁ [veh/giorno]	TP [%]	F_D [-]	F_C [-]	r [%]
12.212	27,05	0,5	0,9	2,0

Occorre specificare che le grandezze di TGM_1 e di TP sono state assunte come media risultante dei corrispondenti valori relativi all'intervallo 2015 – 2020. Tale ipotesi è risultata necessaria al fine di ottenere dei dati di input più affidabili, eliminando l'effetto generato dalla recente pandemia COV-SARS2 che ha influenzato pesantemente il traffico nell'anno 2020.

Applicando l'Equazione (4.2) si stimano i valori del traffico di progetto riportati in Tabella 4.5.

Tabella 4.5: definizione del traffico di progetto

Anno	F [-]	T_p [veh]
1	1	542.658
2	2,02	1.096.169
3	3,06	1.660.751
4	4,12	2.236.624
5	5,2	2.824.015
6	6,31	3.423.153
7	7,43	4.034.275
8	8,58	4.657.618
9	9,75	5.293.429
10	10,95	5.941.956
11	12,17	6.603.453
12	13,41	7.278.180
13	14,68	7.966.402
14	15,97	8.668.388
15	17,29	9.384.414
16	18,64	10.114.760
17	20,01	10.859.714
18	21,41	11.619.566
19	22,84	12.394.616
20	24,3	13.185.166

4.3.3. Modellazione del traffico

Nel presente sotto paragrafo, i risultati derivanti dallo studio di traffico sono sottoposti alla procedura di modellazione. L'approccio adottato per la modellazione del traffico consiste nella conversione del traffico di progetto in numero di passaggi di assi equivalenti di riferimento.

L'asse di riferimento considerato corrisponde ad un asse singolo da 120 kN, dotato di ruote gemellate e pressione di gonfiaggio degli pneumatici pari a 800 kPa. La distanza di interasse tra le ruote è pari a 0,375 m e le aree di carico si assumono di forma circolare. Si riporta il riassunto delle caratteristiche dell'asse di riferimento in Tabella 4.6.

Tabella 4.6: caratteristiche asse di riferimento

Carico asse [kN]	Carico pneumatico [kN]	P_g [kPa]	Interasse [m]	R_{carico} [m]
120,0	30,0	800,0	0,375	0,1093

Al fine di ottenere il numero di passaggi dell'asse di riferimento, sono stati confrontati i risultati derivanti da due metodologie di calcolo, optando per la più conservativa.

Il primo approccio si basa sull'impiego dello spettro di traffico proposto dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali (Di Mascio, et al., 1993). In questa metodologia, si è proceduto alla determinazione del "Total Truck Factor" (TTF) ed alla moltiplicazione di quest'ultimo per il traffico di progetto. La procedura di calcolo, di cui si riportano i dettagli in allegato (Allegato C), ha condotto ad un valore di TTF pari a 0,61.

Il secondo approccio corrisponde ad una procedura semplificata utilizzabile in assenza di spettri di traffico specifici per la strada in analisi. In questo caso, si esegue la conversione diretta del traffico di progetto nel numero di assi equivalenti attraverso la seguente equazione:

$$N_{AE} = FEP \cdot T_P \quad (4.7)$$

In cui:

- N_{AE} corrisponde al numero di passaggi di assi equivalenti di riferimento;
- T_P corrisponde al traffico di progetto;
- FEP corrisponde al fattore di equivalenza medio tra veicolo pesante e asse di riferimento, assunto pari a 0,8.

Si riportano dunque in Tabella 4.7 i risultati ottenuti dalla modellazione del traffico mediante i due approcci.

Tabella 4.7: confronto dei risultati forniti dalla modellazione del traffico

Anno	T _p	APPROCCIO 1	APPROCCIO 2
		(TTF)	(FEP)
		N _{AE}	N _{AE}
1	542.658	329.045	434.127
2	1.096.169	664.671	876.936
3	1.660.751	1.007.009	1.328.601
4	2.236.624	1.356.194	1.789.299
5	2.824.015	1.712.363	2.259.212
6	3.423.153	2.075.655	2.738.523
7	4.034.275	2.446.213	3.227.420
8	4.657.618	2.824.182	3.726.095
9	5.293.429	3.209.711	4.234.743
10	5.941.956	3.602.950	4.753.564
11	6.603.453	4.004.054	5.282.762
12	7.278.180	4.413.180	5.822.544
13	7.966.402	4.830.489	6.373.121
14	8.668.388	5.256.143	6.934.710
15	9.384.414	5.690.311	7.507.531
16	10.114.760	6.133.162	8.091.808
17	10.859.714	6.584.871	8.687.771
18	11.619.566	7.045.613	9.295.653
19	12.394.616	7.515.570	9.915.693
20	13.185.166	7.994.926	10.548.133

Come si può notare da Tabella 4.7, l'approccio maggiormente a favore di sicurezza risulta essere quello semplificato, mediante l'impiego del FEP (evidenziato in Tabella 4.7). Il numero di applicazioni annuale dell'asse di riferimento risulta quindi pari a 10.548.133.

Per completare la modellazione del traffico, si deve suddividere il numero di passaggi dell'asse di riferimento nei diversi periodi di analisi. A tal proposito, si assume che il traffico veicolare annuale sia equamente distribuito all'interno dei 12 mesi dell'anno. Osservando i dati di traffico forniti da Sitaf S.p.A., tale ipotesi risulta giustificata poichè si è notato un valore pressoché costante di autoveicoli transitanti nella sezione di Avigliana nei diversi periodi di analisi. Si può quindi suddividere il numero di passaggi di assi equivalenti mediante l'espressione (4.8).

$$N_{AE,j} = \frac{N_{AE}}{12} = 879.011 \quad (4.8)$$

in cui $N_{AE,j}$ corrisponde al numero di passaggi dell'asse di riferimento riferito al j-esimo periodo di analisi.

4.4. Caratteristiche meccaniche dei materiali

Dopo avere eseguito la caratterizzazione climatica del sito costruttivo ed avere determinato il carico veicolare di progetto, si procede ora alla definizione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche di ciascuno strato costituente la sovrastruttura. Al fine di eseguire una valutazione della risposta tenso-deformativa della pavimentazione si assume che tutti i materiali siano caratterizzati da un comportamento elastico lineare e isotropo.

Come detto in precedenza, la configurazione stratigrafica prevista per la pavimentazione risulta comune a tutti gli scenari considerati ed è costituita da strato di usura, collegamento, base e fondazione in misto granulare.

Si specifica che, in linea con quanto esposto nel Capitolo 3, le miscele bituminose sono state definite in conformità con il Capitolato ANAS.

4.4.1. Strato di usura

Lo strato di usura corrisponde allo strato della pavimentazione direttamente a contatto con il traffico ed è esposto agli agenti atmosferici. Esso deve quindi assicurare adeguate caratteristiche di aderenza in condizioni bagnate ed adeguate resistenze ai degradi indotti dal traffico e dall'ambiente.

Si ricorda che, per ogni scenario, è previsto uno strato di usura formato da conglomerato bituminoso tradizionale. Si è definita quindi una miscela comune a tutti gli scenari.

In accordo con il Capitolato ANAS (Tabella 3.6 – Capitolo 3), sono definite la percentuale in massa di bitume rispetto alla massa totale della miscela e la percentuale dei vuoti (Tabella 4.8).

Tabella 4.8: contenuto di bitume e percentuale di vuoti della miscela tradizionale per lo strato di usura

Miscela usura	% B_{mix} [%]	v [%]
S-TQ	5,3	3,5
S-NC	5,3	3,5
S-CNTs	5,3	3,5

Ricordando che la densità del bitume tal quale e la densità dell'aggregato risultano rispettivamente pari a $997,5 \text{ kg/m}^3$ e 2.786 kg/m^3 (definiti al Par. 3.1.4.2), si possono definire gli altri parametri mediante la seguente procedura di calcolo.

Si determina la percentuale degli aggregati rispetto alla massa totale della miscela e successivamente si esegue il calcolo della massima massa volumica teorica e della massa volumica del conglomerato bituminoso attraverso le seguenti equazioni.

$$MMVT = \frac{100}{\frac{\%Agg_{mix}}{\rho_g} + \frac{\%B_{mix}}{\rho_b}} = \frac{100}{\frac{(100-5,3)}{2.786 \text{ kg/m}^3} + \frac{5,3}{997,5 \text{ kg/m}^3}} = 2.544 \text{ kg/m}^3 \quad (4.9)$$

$$MV = \left(1 - \frac{v}{100}\right) \cdot MMVT = \left(1 - \frac{3,5}{100}\right) \cdot 2.544 \text{ kg/m}^3 = 2.455 \text{ kg/m}^3 \quad (4.10)$$

Si definiscono, quindi, le percentuali di aggregato e bitume sul volume totale della miscela mediante le equazioni (4.11) e (4.12).

$$V_g(\%) = \frac{(100 - \%B_{mix}) \cdot MV}{\gamma_g} = \frac{(100 - 5,3) \cdot 2.455 \text{ kg/m}^3}{2.786 \text{ kg/m}^3} = 83,5\% \quad (4.11)$$

$$V_b(\%) = \frac{\%B_{mix} \cdot MV}{\gamma_b} = \frac{5,3 \cdot 2.455 \text{ kg/m}^3}{997,5 \text{ kg/m}^3} = 13,0\% \quad (4.12)$$

Si procede infine con la determinazione dei valori di VFA e VFB.

$$VMA = v + \left(\frac{\%B_{mix} \cdot MV}{\gamma_b}\right) = 3,5 + \left(\frac{5,3 \cdot 2.455 \text{ kg/m}^3}{997,5 \text{ kg/m}^3}\right) = 16,55\% \quad (4.13)$$

$$VFB = \left(\frac{VMA - v}{VMA}\right) \cdot 100 = \left(\frac{16,55 - 3,5}{16,55}\right) \cdot 100 = 78,85\% \quad (4.14)$$

In questo modo lo strato di usura risulta completamente definito dal punto di vista volumetrico, per i tre scenari.

La caratterizzazione meccanica del conglomerato bituminoso consiste nel definire il valore del modulo dinamico (che in questa fase verrà chiamato *modulo elastico*) della miscela ed il coefficiente di Poisson.

Ai fini della definizione del modulo elastico si impiegherà il modello di Hirsch calibrato mediante il coefficiente correttivo relativo alla miscela tal quale, come definito nel capitolo precedente. Per l'applicazione di tale modello, si fa riferimento ai dati sperimentali relativi al modulo complesso del bitume tal quale, presentati in Tabella 3.11 (Capitolo 3). Si specifica che in fase di progetto si assume una frequenza di sollecitazione di riferimento pari a 10 Hz.

Si rimanda al Paragrafo 3.3 per una trattazione dettagliata ed approfondita relativa all'applicazione del modello di Hirsch e del calcolo dei coefficienti correttivi.

Infine, per quanto riguarda il coefficiente di Poisson per il conglomerato bituminoso, si assume che il suo valore sia indipendente dalla frequenza di carico e dalla temperatura e pari a 0,35.

4.4.2. Strato di collegamento

Lo strato di collegamento riveste una funzione di natura strutturale poiché corrisponde allo strato di transizione che permette una migliore distribuzione dei carichi che vengono trasmessi alla base.

Lo scenario di riferimento prevede l'impiego di conglomerato bituminoso tradizionale mentre, nei due scenari innovativi, si considerano dei conglomerati il cui legante è stato additivato rispettivamente con nanotubi di carbonio (MWCNTs) e nanoargille (OMMT).

Le caratteristiche volumetriche delle tre miscele sono già state definite nel capitolo precedente, sulla base della trattazione di (Miglietta, et al., 2016). Per maggiore chiarezza, si riporta comunque un prospetto riassuntivo della volumetria delle miscele che verranno considerate nei diversi scenari (Tabella 4.9).

Tabella 4.9: dati volumetrici delle miscele per lo strato di collegamento

Miscela binder	%B _{mix} [%]	v [%]	γ_b [kg/m ³]	MMVT [kg/m ³]	MV [kg/m ³]	V _b [%]	V _g [%]	VMA [%]	VFB [%]
S-TQ	4,5	4,0	998	2.578	2.475	11,2	84,8	15,1	73,6
S-NC	4,5	4,0	1.035	2.589	2.485	10,8	85,2	14,8	73,0
S-CNTs	4,6	4,0	982	2.569	2.466	11,5	84,5	15,6	74,3

I moduli dinamici dei conglomerati sono stati definiti sperimentalmente (Paragrafo 3.2.1).

Come per lo strato precedente, anche in questo caso la frequenza di carico di riferimento risulta pari a 10 Hz.

Infine, si assume il medesimo coefficiente di Poisson per le tre miscele, pari a 0,35.

4.4.3. Strato di base

Lo strato di base corrisponde allo strato inferiore del pacchetto legato e la sua funzione consiste nel trasferimento del carico agli strati sottostanti.

Anche in questo caso, in sede di progetto, si considerano i tre scenari che differiscono tra loro per la composizione delle miscele in modo del tutto analogo allo strato di collegamento.

La decisione di utilizzare i conglomerati innovativi per la realizzazione della base è il risultato di analisi strutturali preliminari, condotte su stratigrafie di prova della sovrastruttura: si è notato che, all'applicazione del carico di riferimento, la base risulta essere lo strato più sollecitato a fatica.

In accordo con il Capitolato ANAS, sono state definite la percentuale di bitume rispetto alla massa totale della miscela e la percentuale dei vuoti, per le tre miscele. I valori assunti sono riportati in Tabella 4.10.

Tabella 4.10: contenuto di bitume e percentuale di vuoti in miscela per strato di base

Miscela base	%B _{mix} [%]	v [%]
S-TQ	4,5	4,5
S-NC	4,5	4,5
S-CNTs	4,5	4,5

Note le densità del bitume base, dei bitumi nano-modificati e degli aggregati dal (Par. 3.1.4.2), si possono determinare le restanti caratteristiche volumetriche delle miscele (Tabella 4.11), con la medesima procedura utilizzata al Paragrafo 4.4.1 per lo strato di usura.

Tabella 4.11: caratteristiche volumetriche delle miscele per strato di base

Miscela base	MMVT [kg/m ³]	MV [kg/m ³]	V _b [%]	V _g [%]	VMA [%]	VFB [%]
S-TQ	2.578	2.462	11,1	84,4	15,6	71,2
S-NC	2589	2.472	10,7	84,8	15,3	70,5
S-CNTs	2.573	2.458	11,3	84,2	15,8	71,4

Come per lo strato di usura, il modulo dinamico dello strato di base è stato calcolato mediante il modello di Hirsch calibrato con il coefficiente correttivo relativo alle tre miscele (Par. 3.3). Per l'applicazione di tale modello, si fa riferimento ai dati sperimentali relativi al modulo complesso dei bitumi presentati in Tabella 3.11.

Infine, il coefficiente di Poisson per i tre conglomerati si assume pari a 0,35.

4.4.4. Fondazione in misto granulare

La fondazione è lo strato inferiore della pavimentazione e si interfaccia direttamente con il sottofondo. Essa costituisce una superficie regolare per la stesa degli strati legati ed inoltre svolge la funzione di ripartizione dei carichi veicolari che vengono trasmessi in direzione del sottofondo.

Per lo strato di fondazione si prevede l'impiego di una miscela di aggregati lapidei selezionati, ossia in misto granulare non legato. Nella presente trattazione, si considererà l'utilizzo solamente di aggregati vergini.

Le caratteristiche volumetriche del misto granulare sono state estratte dalla scheda tecnica di Sitalfa e riportate in Tabella 4.12.

Tabella 4.12: caratteristiche volumetriche della fondazione

MV _{agg} [kg/m ³]	MV _{agg,compattato} [kg/m ³]	v [%]
2.700	2.170	19,63

Si prevede, inoltre, l'aggiunta di un quantitativo di acqua pari al 6,5% della massa degli aggregati, al fine del raggiungimento dell'umidità ottimale del misto granulare in situ ai fini della compattazione.

Per quanto concerne le prestazioni meccaniche, in accordo con il Capitolato ANAS si assume un modulo di deformabilità pari a 100 MPa. Il modulo elastico del misto granulare si può quindi calcolare attraverso l'Equazione (4.15).

$$E_{MG} = 2 \cdot M_d = 2 \cdot 100 = 200 \text{ MPa} \quad (4.15)$$

Si completa la caratterizzazione meccanica della fondazione assumendo il coefficiente di Poisson pari a 0,3.

La configurazione mono-strato della fondazione, adottata nel presente studio, risulta atipica rispetto all'approccio comune utilizzato per le autostrade. Solitamente, si prevede una fondazione bi-strato costituita da misto granulare non legato e misto cementato, al fine di ridurre al minimo lo spessore del pacchetto legato. Tuttavia, nella presente trattazione l'obiettivo è quello di enfatizzare al massimo le prestazioni strutturali offerte dalle tre miscele in esame per poter apprezzare al meglio le differenze che risulteranno in termini di spessori della pavimentazione di progetto.

Trascurando dunque la presenza del misto cementato, si ottiene il massimo contributo strutturale del pacchetto legato della sovrastruttura.

4.4.5. Sottofondo

L'ultimo strato da analizzare per completare la struttura della pavimentazione in progetto corrisponde al sottofondo. Esso costituisce la base di appoggio della sovrastruttura stradale definita in precedenza.

Il sottofondo risulta di norma costituito da un terreno naturale non vegetale, soggetto a preventiva compattazione. Nel rispetto del Capitolato ANAS, si assume un modulo di deformabilità pari a 50 MPa. Quindi, il modulo elastico si determina come:

$$E_S = 2 \cdot M_d = 2 \cdot 50 = 100 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

Infine, il coefficiente di Poisson per il sottofondo è assunto pari a 0,35.

Per maggiore chiarezza si riporta lo schema stratigrafico generale della sovrastruttura stradale in progetto in (Figura 4.5).

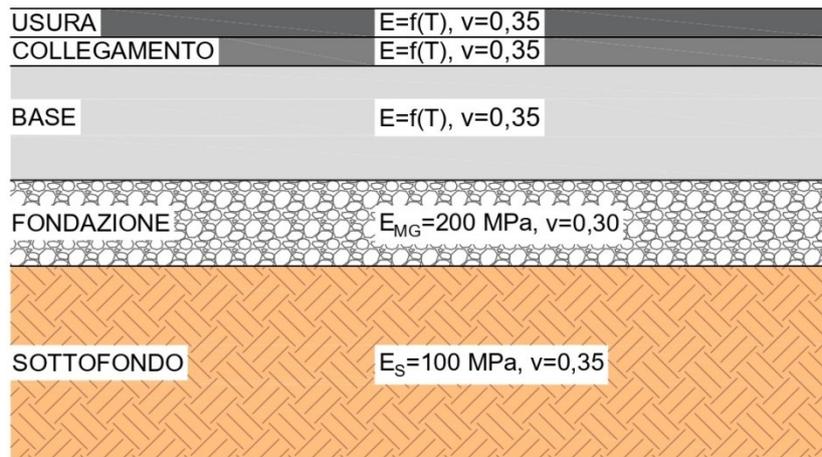


Figura 4.5: stratigrafia della pavimentazione di progetto

Si può notare, da Figura 4.5, che il modulo elastico del conglomerato bituminoso è assunto funzione unicamente della temperatura; questo perché la frequenza di carico è stata già fissata a 10 Hz.

Dall'Equazione (4.1) si evince che la temperatura degli strati legati dipende dallo spessore degli strati stessi. Questo significa, per ogni iterazione, variando gli spessori si ottiene anche una variazione del modulo elastico degli strati in conglomerato bituminoso.

4.5. Modello di calcolo ed analisi strutturale

Nel presente paragrafo si intende illustrare il modello di calcolo assunto per la valutazione della risposta tenso-deformativa della pavimentazione ed il codice di calcolo impiegato per eseguire l'analisi strutturale.

Il modello di calcolo adottato per determinare la risposta strutturale dell'infrastruttura è quello del sistema multistrato elastico lineare. Esso si basa sulle seguenti ipotesi.

- La sovrastruttura corrisponde ad un sistema di strati perfettamente orizzontali di estensione infinita e spessore costante che poggiano sul sottofondo, il quale viene modellato come un semi-spazio infinito.
- Si assume che i materiali costituenti gli strati siano omogenei, isotropi e caratterizzati da un comportamento elastico lineare, la cui risposta strutturale è definita a mezzo del modulo elastico e coefficiente di Poisson.
- Si assume completa adesione tra gli strati; in altre parole, si considerano valide le condizioni di continuità all'interfaccia dei diversi strati.
- L'impronta degli pneumatici sulla pavimentazione si assume di forma perfettamente circolare.

Definite le ipotesi di calcolo, si procede all'identificazione dell'algoritmo da impiegare per condurre l'analisi. Si sono posti a confronto due codici di calcolo: BISAR 3.0 e ALVA MASTER. Il primo è un software agli elementi finiti prodotto dalla Shell mentre il secondo

corrisponde ad uno script Matlab che permette di determinare deformazioni, tensioni e spostamenti di pavimentazioni multistrato, soggette a carichi verticali circolari.

Ambo i codici di calcolo richiedono i seguenti dati di input (Figura 4.6).

- Configurazione del carico da applicare alla pavimentazione, la quale viene definita sulla base dell'approccio adottato nella modellazione del traffico. Si ricorda che, nel presente lavoro, si è scelto di convertire tutti gli assi generici in assi equivalenti di riferimento (procedura di calcolo riportata al Par. 4.3.3). Per le caratteristiche dell'asse di riferimento adottato, si rimanda alla Tabella 4.6.
- I valori di modulo elastico e del coefficiente di Poisson degli strati della pavimentazione.
- Spessori degli strati della sovrastruttura.
- Posizione dei punti in cui si intende ottenere la risposta strutturale della pavimentazione.

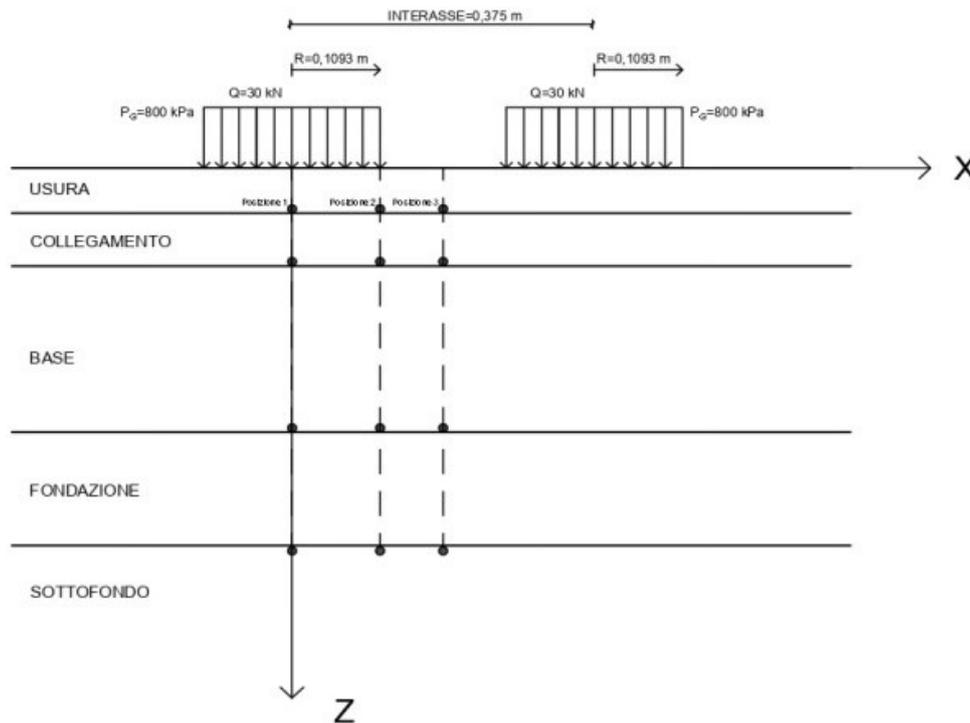


Figura 4.6: rappresentazione del carico di riferimento e dei punti di interesse per le risposte deformative

La posizione dei punti in cui si valuta la risposta tenso-deformativa è stata definita in accordo con i criteri di rottura considerati nell'ambito del presente progetto.

Per la verifica a fatica, è stata determinata la deformazione di trazione, in direzione orizzontale, alla base di ognuno degli strati in conglomerato bituminoso (per il meccanismo di danneggiamento *bottom-up*). Per la verifica nei confronti delle deformazioni permanenti, sono state determinate le deformazioni di compressione, in direzione verticale, in sommità del sottofondo (Figura 4.6).

Le risposte deformative valutate alle diverse profondità, sono state determinate lungo l'asse verticale di una delle due aree di carico, in corrispondenza del punto centrale di interasse tra le due aree di carico ed infine in corrispondenza del bordo di una delle due aree di carico (Figura 4.6). Sono sufficienti questi tre punti ad ogni livello di profondità, grazie alla simmetria del sistema.

Si precisa che la deformazione di trazione in direzione orizzontale è calcolata sia in direzione x che in direzione y; per questo motivo si è definita la combinazione delle due quantità attraverso l'Equazione (4.17).

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (4.17)$$

In cui:

- ε_t corrisponde alla deformazione di trazione risultante;
- $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ corrispondono alle deformazioni di trazione rispettivamente in direzione x e y;
- γ_{xy} corrisponde alla deformazione di taglio (che nel caso dell'asse di riferimento considerato risulta sempre nullo perché si tratta di un asse singolo).

Le deformazioni che verranno impiegate nelle verifiche degli strati corrisponderanno al massimo valore tra quelli individuati nelle tre posizioni.

4.5.1. Confronto degli output: BISAR 3.0 vs ALVA MASTER

Al fine di definire il programma che verrà utilizzato, entrambi i codici di calcolo sono stati utilizzati per l'analisi strutturale della stratigrafia di primo tentativo della pavimentazione S-TAL QUALE, la quale è stata definita sulla base delle indicazioni reperite all'interno del "Catalogo delle Pavimentazioni". In funzione delle caratteristiche meccaniche del sottofondo e del livello di traffico previsto, essa si configura come segue.

- Spessore strato di usura: 6 cm.
- Spessore strato di collegamento: 7 cm.
- Spessore strato di base: 22 cm.
- Spessore fondazione in misto granulare: 15 cm.

Noti gli spessori, si possono determinare le temperature degli strati in conglomerato bituminoso mediante l'Equazione (4.1), nonché i moduli elastici delle miscele come indicato al Paragrafo 4.4.

Si riporta in Tabella 4.13, la procedura di calcolo delle caratteristiche meccaniche del pacchetto legato con riferimento al periodo di Gennaio.

Tabella 4.13: valori del modulo complesso degli strati legati, relativi al periodo di Gennaio (S-TAL QUALE)

	Usura	Base		Binder
T_A [°C]	3,2	3,2	T_A [°C]	3,2
T_P [°C]	7,0	6,7	T_P [°C]	6,9
$ G^* _{bit,10Hz}$ [kPa]	57.847	59.805	T_P [K]	280,0
$ G^* _{bit,10Hz}$ [psi]	8.390	8.674	f [Hz]	10
P_C [-]	0,576	0,574	$\log[a(T)]$	1,542
$ E^* _{10Hz,Hirsch}$ [psi]	2.214.680	2.232.601	$a(T)$	34,80
$ E^* _{10Hz,Hirsch}$ [MPa]	15.270	15.393	f_R [Hz]	347,97
F_C [-]	1,104	1,103	$\log[E^*_{10Hz}]$	4,254
$ E^* _{10Hz}$ [MPa]	16.856	16.983	$ E^* _{10Hz}$ [Mpa]	17.944

Ora la sovrastruttura risulta completamente definita e si possono applicare i codici di calcolo per valutarne la risposta tenso-deformativa. Si riportano, quindi, i valori di deformazione valutati nei punti di interesse relativamente al periodo di analisi di Gennaio (Tabella 4.14).

Si precisa che la convenzione dei segni adottata è la seguente: valori negativi corrispondono a deformazioni di compressione, mentre i valori positivi rappresentano deformazioni di trazione.

Tabella 4.14: output deformativo fornito da BISAR 3.0 e da ALVA MASTER, nel periodo di Gennaio (S-TQ)

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [µs]	ϵ_y [µs]	ϵ_z [µs]	ϵ_t [µs]	ϵ_x [µs]	ϵ_y [µs]	ϵ_z [µs]	ϵ_t [µs]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,57	-5,35	-21,08	-	-3,62	-5,41	-21,09	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-13,06	-7,00	-0,99	-	-13,08	-7,06	-1,00	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-18,59	-10,06	13,97	-	-18,59	-10,10	13,99	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	3,03	3,54	-17,61	3,54	3,02	3,54	-17,57	3,54
	0,1093	0,0000	0,1299	-5,03	1,74	-5,82	1,74	-5,04	1,74	-5,81	1,74
	0,1875	0,0000	0,1299	-9,58	0,41	1,35	0,41	-9,60	0,41	1,37	0,41
Base	0,0000	0,0000	0,3499	18,80	24,47	-23,72	24,47	18,84	24,52	-23,78	24,52
	0,1093	0,0000	0,3499	18,97	25,48	-24,35	25,48	19,01	25,53	-24,42	25,53
	0,1875	0,0000	0,3499	18,57	25,62	-24,22	25,62	18,60	25,66	-24,24	25,66
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	21,88	26,24	-79,39	-	21,92	26,29	-79,55	-
	0,1093	0,0000	0,5001	23,39	27,14	-82,32	-	23,45	27,21	-82,58	-
	0,1875	0,0000	0,5001	23,64	27,33	-82,88	-	23,68	27,37	-82,97	-

Si può notare che le differenze tra i due algoritmi risultano decisamente ridotte; per apprezzarle al meglio, si sono computate le differenze relative tra gli output dei due software, prendendo come riferimento i valori forniti da BISAR 3.0 (Tabella 4.15), attraverso l'Equazione (4.18)

$$\Delta = \frac{\epsilon_B - \epsilon_{AM}}{\epsilon_B} \cdot 100 \quad (4.18)$$

In cui:

- ϵ_B rappresenta a deformazione di trazione determinata con BISAR 3.0 [μstrain];
- ϵ_{AM} rappresenta a deformazione di trazione determinata con ALVA MASTER [μstrain].

Tabella 4.15: differenze relative tra le deformazioni fornite da BISAR 3.0 e quelle fornite da ALVA MASTER

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-1,59	-1,18	-0,06	-
-0,17	-0,87	-0,24	-
0,00	-0,38	-0,15	-
0,15	0,00	0,20	0,00
-0,19	0,01	0,23	0,01
-0,16	-0,10	-1,27	-0,10
-0,20	-0,22	-0,23	-0,22
-0,22	-0,21	-0,27	-0,21
-0,14	-0,14	-0,08	-0,14
-0,19	-0,19	-0,21	-
-0,24	-0,25	-0,31	-
-0,15	-0,13	-0,10	-

Innanzitutto, si deve specificare che i valori Δ negativi corrispondono ad una sottostima della deformazione da parte di BISAR 3.0, viceversa in caso di positività si ha una sottostima da parte di ALVA MASTER.

Si può notare da Tabella 4.15 come i valori di differenza relativa siano effettivamente molto ridotti: si ha uno scostamento massimo (in valore assoluto) pari a 1,59% in questo caso. Tuttavia, si può osservare anche come i valori di Δ siano principalmente negativi: questo significa che ALVA MASTER fornisce dei valori di deformazione più elevati e, di conseguenza, maggiormente a favore di sicurezza.

Per una panoramica più ampia dell'analisi strutturale condotta per la scelta del software, comprensiva di tutti i periodi di analisi considerati, si rimanda all'Allegato D. In ogni caso, in tutti i periodi di analisi, valgono le osservazioni di cui sopra.

Sulla base di queste considerazioni, si è scelto di utilizzare il codice di calcolo ALVA MASTER per eseguire l'analisi strutturale delle pavimentazioni.

4.6. Funzioni di trasferimento

Le funzioni di trasferimento sono le relazioni matematiche che legano il massimo numero ammissibile di ripetizioni del carico, che porta al raggiungimento delle condizioni limite di danneggiamento, con la risposta tenso-deformativa e le proprietà meccaniche della pavimentazione sollecitata.

Si ricorda che nella presente trattazione si considerano due forme di danneggiamento: la fatica e l'accumulo di deformazioni permanenti.

4.6.1. Fatica

Per la verifica a fatica dei materiali legati, il parametro di controllo adottato per la definizione dello stato di sollecitazione indotto dal carico, corrisponde alla massima deformazione di trazione valutata alla base dello strato. La funzione di trasferimento corrispondente si presenta come in Equazione (4.19).

$$N_f = \frac{1}{F_{\text{aff}}} \cdot F_{\text{lab}} \cdot F_a \cdot f_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{f_2} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{f_3} \quad (4.19)$$

Dove:

- N_f corrisponde al numero di ripetizioni del carico che determina il raggiungimento delle condizioni limite di danneggiamento dello strato per fatica;
- F_{aff} corrisponde al fattore di affidabilità, il quale si assume pari a 4;
- F_{lab} corrisponde al fattore di traslazione che relaziona le prestazioni in laboratorio a quelle in situ, assunto pari a 10;
- F_a corrisponde al fattore di traslazione che tiene conto della capacità di autoriparazione della fase legante che, in assenza di dati sperimentali, si assume pari a 1;
- ε_t corrisponde all'ampiezza iniziale della deformazione ciclica [m/m];
- E corrisponde al modulo dinamico del conglomerato bituminoso [MPa];
- f_1, f_2, f_3 sono i parametri di regressione.

I parametri di regressione per lo strato di collegamento sono noti (Par. 3.2.2), mentre devono essere definiti quelli per i restanti strati legati, per ogni scenario. La procedura di calcolo impiegata si basa sulla formulazione proposta da (Austroads, 2017), la quale assume che f_1 sia funzione del volume di legante secondo l'equazione:

$$f_1 = (a + b \cdot V_b)^{f_2} \quad (4.20)$$

In cui:

- b rappresenta un parametro empirico, definito pari a 5,922E-03 sulla base delle indicazioni fornite da Austroads;
- a rappresenta il parametro empirico da calibrare sulla base dei dati sperimentali delle diverse miscele;
- V_b rappresenta percentuale di bitume rispetto al volume totale della miscela [%].

4.6.1.1. Calcolo del parametro a

Il parametro a, per le diverse miscele, è stato definito sulla base dei valori di f_1 ed f_2 determinati sperimentalmente per lo strato di collegamento (Par. 3.2.2).

La metodologia di calcolo si basa sulla seguente ipotesi: si assume che il parametro f_2 sia funzione unicamente della tipologia di miscela bituminosa: tradizionale, nano-modificata con nanoargille e con nanotubi di carbonio. In altre parole, questo significa che il valore del parametro definito al Par. 3.2.2 per i diversi conglomerati per strato di binder, sia uguale per le corrispondenti miscele impiegate per strati usura e base.

Si può quindi calcolare a per il conglomerato tradizionale per gli strati di usura e base, attraverso l'Equazione (4.21).

$$a = f_1^{1/f_2} - b \cdot V_b = (2,618E - 08)^{1/5} - (5,922E - 03) \cdot 11,2 = -3,587E - 02 \quad (4.21)$$

In cui f_1 ed f_2 corrispondono ai coefficienti di regressione e V_b alla percentuale di legante rispetto al volume della miscela, relativi al conglomerato tal quale per lo strato di binder.

Applicando la medesima procedura si determina l'entità del parametro a per le miscele nano-modificate (Tabella 4.16).

Tabella 4.16: parametro a, per le diverse miscele

Miscela	a
TAL QUALE	-3,587E-02
NC	-2,992E-02
CNTs	1,046E-01

Si possono quindi definire i parametri di regressione per gli strati della pavimentazione, per ogni scenario, applicando l'Equazione (4.20). Si riportano i valori in Tabella 4.17.

Tabella 4.17: valori dei parametri di regressione per le funzioni di trasferimento dei conglomerati bituminosi

Strato	S-TQ		S-NC		S-CNTs	
	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2
Usura	1,174E-07	5,000E+00	1,174E-07	5,000E+00	1,174E-07	5,000E+00
Binder	2,618E-08	5,000E+00	1,455E-08	5,338E+00	9,409E-04	3,968E+00
Base	2,373E-08	5,000E+00	1,325E-08	5,338E+00	9,155E-04	3,968E+00

Per quanto riguarda il parametro f_3 , esso viene assunto pari ad 1,8 per tutte le miscele.

4.6.2. Accumulo di deformazioni permanenti

Per la verifica per accumulo di deformazione permanenti del sottofondo, si ricorda che il parametro di controllo adottato per definire lo stato di sollecitazione indotto dal carico, corrisponde alla massima deformazione di compressione in direzione verticale, valutata in sommità dello strato. La funzione di trasferimento corrispondente si presenta come segue.

$$N_d = f_4 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{f_5} \quad (4.22)$$

Dove:

- N_d rappresenta il numero di ripetizioni del carico che determina il raggiungimento della condizione limite di ormaimento;
- f_4 rappresenta un parametro di regressione, assunto pari a $6,15 \cdot 10^{-7}$;
- f_5 rappresenta un parametro di regressione, assunto pari a 4;
- ε_c rappresenta la deformazione verticale di compressione sulla superficie del sottofondo [m/m].

4.7. Progetto e verifica della pavimentazione

Nel presente paragrafo si intende definire lo spessore di progetto di ogni strato costituente la pavimentazione, nei diversi scenari.

L'approccio progettuale seguito è di natura iterativa: ciò significa che è stata definita una stratigrafia di primo tentativo della pavimentazione, sulla quale è stata eseguita l'analisi strutturale ed il computo del danno. In funzione dell'entità di quest'ultimo, la procedura di calcolo è stata ripetuta variando gli spessori, fino ad ottenere la stratigrafia di progetto. La soluzione ottimale corrisponde alla pavimentazione che presenta un danno totale inferiore o uguale all'unità e definita attraverso i seguenti criteri.

1. Minimizzazione dello spessore del pacchetto legato.
2. Valore di danno per lo strato più sollecitato il più vicino possibile all'unità.

La stratigrafia di primo tentativo risulta la stessa per tutti gli scenari ed è stata definita sulla base delle indicazioni fornite dal "Catalogo delle Pavimentazioni", come indicato in Tabella 4.18.

Tabella 4.18: stratigrafia di primo tentativo

Scenario	Usura	Binder	Base	Fondazione	S _{PL}	S _{PAV}
S-TQ	6 cm	7 cm	22 cm	15 cm	35 cm	50 cm
S-NC	6 cm	7 cm	22 cm	15 cm	35 cm	50 cm
S-CNTs	6 cm	7 cm	22 cm	15 cm	35 cm	50 cm

Si specifica che S_{PL} e S_{PAV} corrispondono rispettivamente allo spessore del pacchetto legato ed allo spessore totale della pavimentazione.

Dopo numerose iterazioni si è pervenuti alla soluzione progettuale della sovrastruttura autostradale, per ciascun scenario. Si riportano i risultati della procedura in Tabella 4.19.

Tabella 4.19: spessori di progetto della pavimentazione autostradale

Scenario	Usura	Binder	Base	Fondazione	S_{PL}	S_{PAV}
S-TQ	5 cm	6 cm	22 cm	15 cm	33 cm	48 cm
S-NC	6 cm	5 cm	12 cm	15 cm	23 cm	38 cm
S-CNTs	6 cm	5 cm	18 cm	15 cm	29 cm	44 cm

In questo modo è stata definita la pavimentazione stradale di progetto.

Da Tabella 4.19 si può notare che lo spessore della fondazione è rimasto invariato durante la procedura iterativa. Per motivi costruttivi non è stato possibile ridurlo al di sotto dei 15 cm per evitare l'eventuale rottura degli aggregati costituenti il misto granulare, in fase di compattazione della miscela.

Inoltre, osservando la stratigrafia di progetto si può notare una configurazione atipica degli strati legati negli scenari innovativi, la quale presenta uno spessore dello strato di usura più elevato rispetto a quello dello strato di collegamento. Tale decisione progettuale è stata presa al fine di minimizzare gli spessori degli strati in conglomerato bituminoso nano-rinforzato per limitarne gli impatti ambientali.

Si procederà ora alla verifica strutturale.

4.7.1. Verifica strutturale

La verifica strutturale è stata eseguita nei confronti di ogni tipologia di ammaloramento considerato ed il danno è stato computato adottando una legge lineare di sovrapposizione, mediante l'Equazione (4.23).

$$D_{f,d} = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{N_k} \quad (4.23)$$

In cui:

- $D_{f,d}$ corrisponde al danno per fatica (f) o accumulo di deformazioni permanenti (d);
- n_k corrisponde al numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo di climatico k ;
- N_k corrisponde al numero di applicazioni di assi equivalenti nel generico periodo di analisi k che determina il raggiungimento delle condizioni limite di danneggiamento per fatica o deformazioni permanenti.

Le verifiche si intendono soddisfatte qualora il danno $D_{f,d}$ risulti inferiore o uguale all'unità.

4.7.1.1. Verifica per fatica

Nel presente sotto paragrafo si intende verificare che tutti gli strati in conglomerato bituminoso della nuova pavimentazione autostradale presentino un valore del danno per fatica inferiore all'unità. Si riportano i calcoli di verifica in Tabella 4.20, Tabella 4.21 e Tabella 4.22.

Tutti i calcoli condotti nelle tabelle indicate sono già stati esplicitati in modo dettagliato in precedenza.

Tabella 4.20: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-TAL QUALE

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Strato di usura in conglomerato bituminoso tradizionale												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	7,0	8,5	13,7	18,9	23,2	28,6	31,2	30,6	25,7	19,0	12,8	7,7
 E* [MPa]	16.848	16.157	12.819	9.318	6.691	4.087	3.109	3.307	5.368	9.229	13.447	16.511
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_{f,TOT}	0,000E+00											
Strato di collegamento in conglomerato bituminoso tradizionale												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,9	8,3	13,3	18,2	22,3	27,4	29,8	29,3	24,6	18,3	12,3	7,5
 E* [MPa]	17.931	17.105	13.841	10.397	7.654	4.809	3.736	3.962	6.271	10.308	14.472	17.554
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	2,202E-06	2,323E-06	3,035E-06	5,719E-06	6,143E-06	1,094E-05	1,429E-05	1,322E-05	7,910E-06	4,297E-06	2,832E-06	2,263E-06
N_f	2,791E+13	2,324E+13	8,939E+12	6,292E+11	7,639E+11	9,836E+10	4,082E+10	5,406E+10	3,090E+11	2,669E+12	1,165E+13	2,528E+13
D_f	3,150E-08	3,782E-08	9,833E-08	1,397E-06	1,151E-06	8,936E-06	2,153E-05	1,626E-05	2,845E-06	3,294E-07	7,543E-08	3,477E-08
D_{f,TOT}	5,273E-05											
Strato di base in conglomerato bituminoso tradizionale												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,8	8,1	12,8	17,4	21,3	26,2	28,5	28,0	23,5	17,6	11,9	7,4
 E* [MPa]	16.978	16.321	13.385	10.302	7.789	5.084	4.100	4.334	6.462	10.211	13.998	16.658
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	2,824E-05	2,917E-05	3,435E-05	4,254E-05	5,308E-05	7,331E-05	8,591E-05	8,261E-05	6,128E-05	4,283E-05	3,314E-05	2,868E-05
N_f	8,043E+07	7,336E+07	4,630E+07	2,549E+07	1,393E+07	5,973E+06	3,981E+06	4,383E+06	9,506E+06	2,501E+07	5,115E+07	7,696E+07
D_f	1,093E-02	1,198E-02	1,899E-02	3,449E-02	6,308E-02	1,472E-01	2,208E-01	2,005E-01	9,247E-02	3,515E-02	1,719E-02	1,142E-02
D_{f,TOT}	8,642E-01											

Tabella 4.21: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-NC

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Strato di usura in conglomerato bituminoso tradizionale												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	7,0	8,5	13,7	18,8	23,1	28,5	31,0	30,4	25,5	18,9	12,7	7,7
 E* [MPa]	16.856	16.168	12.856	9.380	6.765	4.155	3.165	3.366	5.433	9.291	13.483	16.521
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_{f,TOT}	0,000E+00											
Strato di collegamento in conglomerato nano-rinforzato con nanoargilla												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,9	8,3	13,2	18,1	22,2	27,3	29,7	29,2	24,5	18,2	12,3	7,5
 E* [MPa]	20.520	19.583	15.912	12.061	8.988	5.761	4.524	4.786	7.426	11.962	16.619	20.092
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	4,802E-06	4,974E-06	5,881E-06	7,084E-06	8,502E-06	1,280E-05	1,566E-05	1,468E-05	1,014E-05	7,141E-06	5,628E-06	4,890E-06
N_f	1,555E+13	1,402E+13	8,328E+12	5,079E+12	3,256E+12	8,163E+11	4,295E+11	5,486E+11	1,793E+12	4,941E+12	9,745E+12	1,467E+13
D_f	5,654E-08	6,268E-08	1,056E-07	1,731E-07	2,699E-07	1,077E-06	2,047E-06	1,602E-06	4,901E-07	1,779E-07	9,020E-08	5,994E-08
D_{f,TOT}	6,212E-06											
Strato di base in conglomerato nano-rinforzato con nanoargilla												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,8	8,1	12,9	17,6	21,6	26,5	28,8	28,3	23,8	17,7	12,0	7,4
 E* [MPa]	19.141	18.389	15.068	11.650	8.949	5.871	4.720	4.995	7.423	11.553	15.747	18.776
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	4,548E-05	4,695E-05	5,503E-05	6,747E-05	8,272E-05	1,123E-04	1,308E-04	1,260E-04	9,496E-05	6,790E-05	5,317E-05	4,618E-05
N_f	9,842E+07	8,925E+07	5,472E+07	2,930E+07	1,587E+07	6,631E+06	4,344E+06	4,799E+06	1,064E+07	2,874E+07	6,071E+07	9,392E+07
D_f	8,932E-03	9,849E-03	1,606E-02	3,000E-02	5,539E-02	1,326E-01	2,024E-01	1,832E-01	8,263E-02	3,058E-02	1,448E-02	9,359E-03
D_{f,TOT}	7,754E-01											

Tabella 4.22: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-CNTs

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Strato di usura in conglomerato bituminoso "tradizionale"												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	7,0	8,5	13,7	18,8	23,1	28,5	31,0	30,4	25,5	18,9	12,7	7,7
 E* [MPa]	16.856	16.168	12.856	9.380	6.765	4.155	3.165	3.366	5.433	9.291	13.483	16.521
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_{f,TOT}	0,000E+00											
Strato di collegamento in conglomerato nano-rinforzato con nanotubi di carbonio												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,9	8,3	13,2	18,1	22,2	27,3	29,7	29,2	24,5	18,2	12,3	7,5
 E* [MPa]	18.930	18.102	14.820	11.317	8.479	5.462	4.296	4.543	7.023	11.226	15.457	18.552
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	2,125E-06	2,221E-06	2,793E-06	3,711E-06	5,034E-06	8,509E-06	1,094E-05	9,970E-06	6,330E-06	3,755E-06	2,625E-06	2,172E-06
N_f	1,526E+12	1,387E+12	7,999E+11	4,212E+11	2,111E+11	5,804E+10	3,303E+10	4,313E+10	1,194E+11	4,077E+11	9,499E+11	1,449E+12
D_f	5,761E-07	6,337E-07	1,099E-06	2,087E-06	4,163E-06	1,514E-05	2,661E-05	2,038E-05	7,363E-06	2,156E-06	9,254E-07	6,067E-07
D_{f,TOT}	8,175E-05											
Strato di base in conglomerato bituminoso in nano-rinforzato con nanotubi di carbonio												
T_A [°C]	3,2	4,5	8,8	13,2	16,8	21,2	23,4	22,9	18,8	13,3	8,0	3,8
T_P [°C]	6,8	8,1	12,8	17,5	21,4	26,3	28,6	28,1	23,6	17,6	12,0	7,4
 E* [MPa]	18.150	17.485	14.449	11.242	8.660	5.781	4.691	4.974	7.246	11.149	15.083	17.829
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
ε_t	3,316E-05	3,419E-05	4,000E-05	4,907E-05	6,038E-05	8,200E-05	9,564E-05	9,184E-05	6,926E-05	4,939E-05	3,864E-05	3,365E-05
N_f	2,944E+07	2,788E+07	2,109E+07	1,472E+07	1,034E+07	6,354E+06	5,026E+06	5,313E+06	8,268E+06	1,456E+07	2,238E+07	2,869E+07
D_f	2,985E-02	3,153E-02	4,168E-02	5,971E-02	8,500E-02	1,383E-01	1,749E-01	1,654E-01	1,063E-01	6,037E-02	3,927E-02	3,064E-02
D_{f,TOT}	9,631E-01											

Ogni strato in conglomerato bituminoso risulta quindi verificato per fatica.

Come si può notare dai calcoli di verifica, si riscontra un danneggiamento progressivo della sovrastruttura con la profondità. Si osserva che lo strato di usura presenta un grado danneggiamento nullo perché, dall'analisi strutturale, esso è risultato in compressione in tutto il suo spessore, in tutti gli scenari.

Si può inoltre notare come il comportamento globale della sovrastruttura sia influenzato in modo marcato dallo strato di base. Quest'ultimo presenta il grado di danneggiamento più elevato e, per questo motivo, si è ritenuta opportuna la sua realizzazione in conglomerato nano-rinforzato.

Infine, si può osservare che, negli scenari S-TAL QUALE ed S-NC, sono ancora presenti delle riserve di resistenza. Tuttavia, le iterazioni svolte ipotizzando uno spessore inferiore degli strati legati hanno condotto ad un esito negativo della verifica per fatica. Quindi, la configurazione stratigrafica riportata in Tabella 4.19 definisce gli spessori minimi consentiti per il rispetto della verifica strutturale.

4.7.1.2. Verifica per accumulo di deformazioni permanenti

Analogamente a quanto svolto per il fenomeno di fatica, si computa il danno per accumulo di deformazioni permanenti, nei tre scenari di progetto. Si riportano i calcoli di verifica in Tabella 4.23.

Tabella 4.23: verifica per accumulo di deformazioni permanenti della pavimentazione di progetto

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
N_{AE}	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011	879.011
S-TAL QUALE												
 E* _{USURA} [MPa]	16.848	16.157	12.819	9.318	6.691	4.087	3.109	3.307	5.368	9.229	13.447	16.511
 E* _{BINDER} [MPa]	17.931	17.105	13.841	10.397	7.654	4.809	3.736	3.962	6.271	10.308	14.472	17.554
 E* _{BASE} [MPa]	16.978	16.321	13.385	10.302	7.789	5.084	4.100	4.334	6.462	10.211	13.998	16.658
E_{MG} [MPa]	200											
E_S [MPa]	100											
ε_c	9,167E-05	9,409E-05	1,072E-04	-4,246E-05	-5,203E-05	-6,981E-05	2,236E-04	2,167E-04	1,705E-04	1,280E-04	1,042E-04	9,282E-05
N_f	8,709E+09	7,848E+09	4,653E+09	1,892E+11	8,392E+10	2,590E+10	2,461E+08	2,787E+08	7,280E+08	2,290E+09	5,212E+09	8,287E+09
D_f	1,009E-04	1,120E-04	1,889E-04	4,646E-06	1,047E-05	3,394E-05	3,572E-03	3,154E-03	1,207E-03	3,839E-04	1,687E-04	1,061E-04
D_{f,TOT}	9,044E-03											
S-NC												
 E* _{USURA} [MPa]	16.856	16.168	12.856	9.380	6.765	4.155	3.165	3.366	5.433	9.291	13.483	16.521
 E* _{BINDER} [MPa]	20.520	19.583	15.912	12.061	8.988	5.761	4.524	4.786	7.426	11.962	16.619	20.092
 E* _{BASE} [MPa]	19.141	18.389	15.068	11.650	8.949	5.871	4.720	4.995	7.423	11.553	15.747	18.776
E_{MG} [MPa]	200											
E_S [MPa]	100											
ε_c	1,580E-04	1,619E-04	1,829E-04	2,143E-04	2,509E-04	3,159E-04	3,549E-04	3,452E-04	2,785E-04	2,153E-04	1,782E-04	1,598E-04
N_f	9,866E+08	8,955E+08	5,492E+08	2,918E+08	1,553E+08	6,172E+07	3,875E+07	4,330E+07	1,022E+08	2,862E+08	6,095E+08	9,419E+08
D_f	8,909E-04	9,816E-04	1,600E-03	3,013E-03	5,661E-03	1,424E-02	2,269E-02	2,030E-02	8,601E-03	3,072E-03	1,442E-03	9,332E-04
D_{f,TOT}	8,342E-02											
S-CNTs												
 E* _{USURA} [MPa]	16.856	16.168	12.856	9.380	6.765	4.155	3.165	3.366	5.433	9.291	13.483	16.521
 E* _{BINDER} [MPa]	18.930	18.102	14.820	11.317	8.479	5.462	4.296	4.543	7.023	11.226	15.457	18.552
 E* _{BASE} [MPa]	18.150	17.485	14.449	11.242	8.660	5.781	4.691	4.974	7.246	11.149	15.083	17.829
E_{MG} [MPa]	200											
E_S [MPa]	100											
ε_c	1,108E-04	-1,135E-04	1,286E-04	1,513E-04	1,785E-04	2,272E-04	2,569E-04	2,491E-04	1,990E-04	1,521E-04	1,252E-04	1,121E-04
N_f	4,081E+09	3,702E+09	2,251E+09	1,172E+09	6,054E+08	2,307E+08	1,412E+08	1,598E+08	3,924E+08	1,149E+09	2,507E+09	3,896E+09
D_f	2,154E-04	2,374E-04	3,905E-04	7,499E-04	1,452E-03	3,811E-03	6,225E-03	5,500E-03	2,240E-03	7,653E-04	3,507E-04	2,256E-04
D_{f,TOT}	2,216E-02											

I tre scenari di progetto risultano verificati per ormaiamento.

Osservando Tabella 4.23, si può notare come il grado di danneggiamento del sottofondo risulti particolarmente ridotto, nei tre scenari; questo è da imputare principalmente alla presenza dello strato di fondazione in misto granulare che permette di distribuire al meglio i carichi strutturali al sottofondo.

Il grado danneggiamento più elevato si riscontra nello scenario S-NC, in cui si ha un valore di pari a 0,08. Questo si spiega con il fatto che la sovrastruttura progettata per questo scenario è più snella rispetto alle altre.

La pavimentazione risulta a questo punto completamente definita e verificata.

4.8. Considerazioni finali sul progetto strutturale

Confrontando i valori di danno per fatica con quelli per accumulo di deformazioni permanenti, si può intuire come il dimensionamento sia stato realizzato con principale riguardo nei confronti della fatica.

Per quanto riguarda le differenze tra i singoli scenari, si può notare come il S-NC abbia permesso di ottenere degli spessori inferiori ed un grado di danneggiamento inferiore rispetto agli altri casi. Questo si può spiegare grazie al comportamento meccanico del conglomerato nano-rinforzato con nanoargille; questa miscela risulta essere la più rigida in tutti i periodi di analisi considerati, limitando le deformazioni indotte dai carichi veicolari. Inoltre, è caratterizzata da un comportamento a fatica migliore come si può evincere dal calcolo di N_f . Si ottiene quindi un decremento dello spessore del pacchetto legato di 10 cm, rispetto allo scenario di riferimento. Il valore di danno ottenuto per questo scenario, seppur distante dall'unità, non ha permesso una ulteriore riduzione degli strati legati (in particolar modo della base). Lo spessore della fondazione non è stato ridotto al di sotto di 15 cm per motivi costruttivi. Considerando la distanza del danno dall'unità, si è eseguita un'iterazione del tutto teorica riducendo lo spessore dello strato di fondazione a 10 cm: questa configurazione ha permesso la validazione della pavimentazione. Tuttavia, tale soluzione non risulta praticabile dal punto di vista costruttivo, per i motivi esplicitati in precedenza.

Per quanto concerne la pavimentazione realizzata con conglomerato nano-rinforzato con nanotubi di carbonio, si ottiene una riduzione meno marcata dello spessore del pacchetto legato: 4 cm in meno rispetto allo scenario di riferimento. Il valore di danno totale risulta decisamente vicino all'unità (pari a 0,96) e questo significa che le riserve di resistenza della struttura vengono sfruttate quasi interamente.

Confrontando ora gli scenari innovativi, si può osservare come la prestazione strutturale offerta dalla pavimentazione S-NC sia decisamente migliore rispetto alla sovrastruttura S-CNTs. Non solo perché si riscontra una differenza di spessore nel pacchetto legato di 6 cm, ma anche grazie al grado di danneggiamento inferiore riscontrato nel primo scenario.

In ultimo, si può notare che il danneggiamento per lo scenario S-TAL QUALE, S-NC e S-CNTs risulta rispettivamente pari a 0,87, 0,77 e 0,96: questa differenza è indicativa del fatto che le pavimentazioni innovative necessiteranno di una minore manutenzione durante la loro vita in esercizio.

In definitiva, l'impiego di conglomerati nano-rinforzati nella pavimentazione autostradale ha permesso di ottenere un incremento importante delle prestazioni strutturali della sovrastruttura rispetto allo scenario di riferimento.

CAPITOLO 5

VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DELLA PAVIMENTAZIONE AUTOSTRADALE

Definita la struttura della pavimentazione dell'autostrada A32 Torino – Bardonecchia si propone ora, per ogni scenario, la valutazione del ciclo di vita della sovrastruttura mediante la metodologia LCA.

Nel capitolo precedente si è dimostrato che l'impiego di conglomerati bituminosi nano-rinforzati nelle pavimentazioni autostradali risulta in un miglioramento delle prestazioni strutturali, rispetto allo scenario di riferimento.

Lo scopo del presente capitolo è quello di stabilire se la nano-modifica mediante nanoargille e nanotubi di carbonio risulta essere efficace dal punto di vista ambientale, permettendo di ottenere un'infrastruttura maggiormente eco-compatibile, rispetto allo scenario di riferimento.

5.1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

L'obiettivo del presente studio LCA è quello di quantificare gli impatti generati nel ciclo di vita di miscele innovative impiegate nelle pavimentazioni autostradali. In particolare, con riferimento al Capitolo 4, si intende definire l'onere ambientale della sovrastruttura progettata per l'autostrada A32 Torino – Bardonecchia, in ogni scenario analizzato (di cui si trova un prospetto riassuntivo in Tabella 5.)**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Tabella 5.1: prospetto degli scenari di progetto considerati per il caso studio di riferimento

Strato	S-TAL QUALE	S-NC	S-CNTs
Usura	Conglomerato bituminoso TRADIZIONALE	Conglomerato bituminoso TRADIZIONALE	Conglomerato bituminoso TRADIZIONALE
Binder	Conglomerato bituminoso TRADIZIONALE	Conglomerato bituminoso MODIFICATO CON NANOARGILLE (CLOISITE 15A)	Conglomerato bituminoso MODIFICATO CON NANOTUBI DI CARBONIO (MWCNTs)
Base	Conglomerato bituminoso TRADIZIONALE	Conglomerato bituminoso MODIFICATO CON NANOARGILLE (CLOISITE 15A)	Conglomerato bituminoso MODIFICATO CON NANOTUBI DI CARBONIO (MWCNTs)
Fondazione	Misto granulare non legato	Misto granulare non legato	Misto granulare non legato

L'unità funzionale di riferimento di questa analisi corrisponde alla costruzione di una corsia di lunghezza pari ad 1 km di sovrastruttura autostradale. La quantificazione degli impatti è stata eseguita utilizzando l'applicativo PaLATE 2.0.

In accordo con (Celauro, et al., 2017), si richiamano le cinque fasi del ciclo di vita delle infrastrutture stradali, descritte nel Capitolo 1.

1. *Produzione dei materiali*: si considerano tutti i processi di produzione, dall'estrazione delle materie prime fino alla formazione del prodotto finale (e.g. produzione degli aggregati).
2. *Costruzione della pavimentazione*: si valutano tutte le lavorazioni che concorrono alla realizzazione della sovrastruttura.
3. *Uso*: questa fase considera il consumo di energia legato al deterioramento progressivo della pavimentazione e valuta l'effetto ambientale dei cambiamenti in termini di volumi e composizione del traffico.
4. *Manutenzione*: si considerano tutte le opere necessarie al ripristino della pavimentazione.
5. *Fine vita (End-of-life)*: all'interno di questa fase, si definisce la destinazione finale di tutti i componenti della sovrastruttura.

Nel presente lavoro di tesi, si intende adottare un approccio “*cradle-to-laid*”: questo significa che la quantificazione degli impatti coinvolge le prime due delle cinque fasi appena definite: la produzione dei materiali costituenti la pavimentazione e la fase di costruzione della sovrastruttura.

Precedentemente alla procedura di calcolo, sono stati effettuati degli aggiornamenti dell'applicativo PaLATE 2.0 sulla base dell'analisi dettagliata eseguita da Zuccalà et al. (2020) nell'ambito del suo lavoro di tesi di laurea magistrale “Studio del Ciclo di Vita di Strade di Servizio ad Alto Contenuto di Materiali di Riciclo”.

5.2. Analisi d'inventario

Definito l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio LCA, si procede con l'analisi di inventario (*Life Cycle Inventory – LCI*). In questa fase si sono identificati i differenti flussi di input/output necessari alla produzione dei materiali che concorrono formano la pavimentazione, nei diversi scenari di progetto analizzati. Si individuano, inoltre, anche i mezzi necessari per la fase di trasporto e costruzione, nonché le loro caratteristiche specifiche utili ai fini del calcolo dell'impatto che deriva dal loro impiego.

5.2.1. Considerazioni generali sull'analisi d'inventario

Prima di procedere con la redazione del LCI devono essere fatte alcune considerazioni riguardanti i confini di sistema assunti, al fine di eliminare le ambiguità legate alla valutazione degli impatti, in particolare quello energetico.

Nel presente studio LCA, si è optato per includere il fabbisogno di elettricità nella medesima categoria di impatto in cui si è considerato il consumo di energia derivante dall'impiego di qualsiasi forma di combustibile: il *Gross Energy Requirement* (GER).

Quindi, qualora fosse disponibile il consumo elettrico legato alla produzione di un materiale o ad una lavorazione, esso verrà accorpato all'interno del GER secondo l'Equazione (5.1).

$$\begin{aligned}
 \text{GER [MJ/short ton]} & \\
 &= \frac{\text{Energia [MJ/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} \\
 &+ \frac{\text{Energia elettrica [kWh/ton]} \cdot \text{conversione [MJ/kWh]}}{\text{conversione [short ton/ton]}}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Inoltre, l'impatto legato alla produzione dell'energia elettrica è considerato al di fuori dei confini di sistema. Questo perché si è riscontrata poca chiarezza all'interno di alcuni studi reperiti in letteratura (su cui si basa l'inventario) nella definizione della categoria "Energy". Tale ambiguità si è verificata perché non è stato specificato, in tali articoli, se l'energia elettrica fosse inclusa in questa categoria e, in caso affermativo, quale fosse la quota parte di quest'ultima rispetto alla voce complessiva. In questo modo, è risultato impossibile valutare l'impatto relativo alla sua produzione poiché, in alcuni casi, non sono note le quantità di elettricità impiegate.

Al contrario, per quanto riguarda l'onere ambientale legato al consumo di acqua, si è considerato l'impatto derivante dall'impiego di questa risorsa e quello dovuto all'approvvigionamento, il quale rientra dunque all'interno dei confini di sistema. Analogamente, per quanto riguarda il gasolio, si è definito sia l'impatto derivato dalla combustione di quest'ultimo, sia quello generato durante la sua produzione.

5.2.2. Bitume base

Per quanto riguarda la produzione di bitume, i dati sono stati raccolti dalla versione più recente del "Life Cycle Inventory for Bitumen" redatta da Eurobitume (Eurobitume, 2020). I flussi sono stati definiti per la produzione di 1 tonnellata di bitume, considerando anche quelli associati alla costruzione dell'infrastruttura (Figura 5.1). In particolare, l'entità delle voci d'inventario è stata determinata considerando le seguenti unità di processo: estrazione del petrolio, trasporto presso la raffineria, raffinazione del greggio di petrolio e stoccaggio del bitume.

Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	26	1,0	0,054	0,082	27
Crude oil	kg	11,2	9,5	1,2	0,54	22
Consumption of non-energy resources						
Water ⁹⁾	L	811	90	206	7,2	1 115
Emissions to air						
CO ₂	g	130 157	33 258	19 278	6 650	189 343
SO ₂	g	486	384	48	22	940
NO _x	g	549	646	20	8,3	1 224
CO	g	385	96	11,0	2,3	494
CH ₄	g	486	42	4,3	2,7	535
NM VOC	g	411	39	3,0	0,98	455
Particulates	g	159	102	6,3	3,2	271
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	19 257	2 241	40	5,7	21 544
Biological Oxygen Demand	g	19 098	2 232	16	5,4	21 352
Suspended solids	g	260	34,2	7,22	0,55	302
Hydrocarbon (crude oil)	g	33,5	30	4,3	1,7	69,5
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	31,7	38	4,0	1,8	75

Figura 5.1: inventario per la produzione di 1 ton di bitume (Eurobitume, 2020)

Come si può notare dall’inventario riportato in Figura 5.1, non sono definiti esplicitamente il GWP (*Global Warming Potential*) ed il GER (*Gross Energy Requirement*). Essi quindi sono calcolati come segue.

Due contributi presenti nel LCI concorrono alla formazione del GWP: l’anidride carbonica (CO₂) e il metano (CH₄). Considerando che 1 kg di CH₄ è equivalente a 25 kg di CO₂, il *Global Warming Potential* si può determinare mediante l’Equazione (5.2).

$$\begin{aligned} \text{GWP} &= \text{CO}_2 \text{ [g/ton]} + 25 \cdot \text{CH}_4 \text{ [g/ton]} = 189.343 + 25 \cdot 535 \\ &= 202.718 \text{ g/ton} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Tuttavia, PaLATE richiede in input dei valori di emissione normalizzati rispetto alle tonnellate corte “*short ton*” (o tonnellate americane) per cui vale l’equivalenza:

$$1 \text{ ton} \cong 1,102 \text{ short ton} \quad (5.3)$$

Si procede dunque alla conversione dell’indicatore calcolato in Equazione (5.2) mediante l’espressione (5.3)

$$\begin{aligned} \text{GWP [g/short ton]} &= \frac{\text{GWP [g/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} = \frac{202.718 \text{ g/ton}}{1,102 \text{ short ton/ton}} \\ &= 183.955 \text{ g/short ton} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Il *Gross Energy Requirement* può essere determinato aggregando i consumi energetici legati all'impiego di "Natural gas" e "Crude oil". Il calcolo consiste nella conversione delle due quantità, indicate in Figura 5.1, in MJ attraverso il loro potere calorifico (PC). Si riportano in Tabella 5.2 i poteri calorifici dei combustibili comunemente impiegati, i cui valori sono stati reperiti all'interno di (Eurobitume, 2020).

Tabella 5.2: poteri calorifici dei combustibili

Combustibile	PC
Petrolio	43,0 MJ/kg
Gas naturale	49,4 MJ/kg
Carbone	18,0 MJ/kg
Uranio	560.000 MJ/kg

Il GER viene quindi calcolato come indicato nell'Equazione (5.4).

$$\begin{aligned} \text{GER} &= \sum_i \text{CR}_i \cdot \text{PC}_i = 27 \text{ kg/ton} \cdot 49,4 \text{ MJ/kg} + 22 \text{ kg/ton} \cdot 43,0 \text{ MJ/kg} \\ &= 2279,8 \text{ MJ/ton} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Si precisa che CR_i corrisponde alla consistenza consumata dell'*i*-esima risorsa.

Si deve quindi convertire l'unità di normalizzazione, come quanto eseguito nella formulazione riportata in Equazione (5.5).

$$\begin{aligned} \text{GER [MJ/short ton]} &= \frac{\text{GER [MJ/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} = \frac{2391,1 \text{ MJ/ton}}{1,102 \text{ short ton/ton}} \\ &= 2068,8 \text{ MJ/short ton} \end{aligned} \quad (5.5)$$

L'ultimo valore che necessita un'elaborazione corrisponde al "*Water consumption*". In questo caso, l'applicativo richiede in input un valore di consumo idrico espresso in [g/short ton]. Si esegue tale conversione mediante l'espressione (5.6).

$$\begin{aligned} \text{Consumo idrico [g/short ton]} &= \frac{\text{Consumo idrico [l/ton]} \cdot \text{conversione [g/l]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} \\ &= \frac{1115 \text{ l/ton} \cdot 1000 \text{ g/l}}{1,102 \text{ short ton/ton}} = 1.011.797 \text{ g/short ton} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Le restanti voci di inventario considerate necessitano solo della conversione dell'unità di normalizzazione da tonnellate metriche a tonnellate corte.

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 \text{ [g/short ton]} &= \frac{\text{SO}_2 \text{ [g/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} = \frac{940 \text{ g/ton}}{1,102 \text{ short ton/ton}} \\ &= 853 \text{ g/short ton} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_x \text{ [g/short ton]} &= \frac{\text{NO}_2 \text{ [g/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} = \frac{1.224 \text{ g/ton}}{1,102 \text{ short ton/ton}} \\ &= 1.111 \text{ g/short ton} \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \text{PM}_{10} \text{ [g/short ton]} &= \frac{\text{PM}_{10} \text{ [g/ton]}}{\text{conversione [short ton/ton]}} = \frac{271 \text{ g/ton}}{1,102 \text{ short ton/ton}} \\ &= 246 \text{ g/short ton} \end{aligned} \quad (5.9)$$

La procedura di calcolo per definire i dati di input di PaLATE è stata esplicitata a titolo di esempio. Essa è la medesima per le restanti voci di inventario del caso studio.

5.2.3. Emulsione bituminosa

Anche per quanto riguarda l'emulsione bituminosa si fa riferimento all'inventario fornito da Eurobitume. In questo caso, si considera la versione rilasciata nel 2012 perché nell'inventario più recente il LCI di questo materiale non è presente. I flussi sono stati definiti per la produzione di 1 tonnellata di bitume residuo (Figura 5.2), considerando le medesime unità di processo definite per la produzione del bitume.

Production of bitumen emulsion - 1 tonne of residual bitumen (process with infrastructure)	Unit	Bitumen	Emulsifier (production & transport)	HCl (production & transport)	Hot water (water & energy)	Emulsion milling	Total
Raw material							
Crude oil	kg	1000	1,1				1001,1
Consumption of energy resources							
Natural gas	kg	22,5	0,22	0,34	0,08	1,21	24,3
Crude oil	kg	50,5	1,4	0,4	1,8	0,4	54,4
Coal	kg	10,92	0,30	0,67	0,07	3,25	15,21
Uranium	kg	0,00026	0,00002	0,00004	0,00000	0,00023	0,0006
Consumption of non energy resources							
Water ¹⁾	l	1239	15	62	608	149	2073
Emissions to air							
CO ₂	g	226167	4602	3985	5459	15455	255669
SO ₂	g	899	7,1	16	19	53	993
NO _x	g	1142	20	10	7,7	27	1207
CO	g	1040	4,9	41	2,9	5	1057
CH ₄	g	719	6,0	77	3,7	28	764
Hydrocarbon	g	52,4	14,0	0,3	0,5	1,0	68
NM VOC	g	404	09	1,4	2,3	21	410
Particulates	g	300,6	3,0	4,2	1,9	15,2	324,9
Emissions to water							
Chemical Oxygen Demand	g	675	93	6,3	24	6,7	806
Biological Oxygen Demand	g	511	1,4	4,4	24	6,3	547
Suspended solids	g	224	2,1	79	1,9	22	258
Hydrocarbon	g	150	0,4	11	7,7	1,9	162
Phosphorous compounds	g	77,41	4,40	10,76	0,82	48,92	142,3
Nitrogen compounds	g	23,70	5,03	4,35	0,29	14,85	48,22
Sulphur compounds	g	1801,0	127,1	319,7	21,5	1212,8	3482
Emissions to soil							
Hydrocarbon (oils)	g	155	0,2	1,2	8,1	2,0	167

Figura 5.2: inventario per la produzione di 1 ton di bitume residuo (Eurobitume, 2012)

La composizione dell'emulsione bituminosa definita da (Eurobitume, 2012) prevede un dosaggio di bitume pari al 65% ed il restante 35% corrisponde alla quantità di acqua (ed agenti emulsionanti) presente. L'unità funzionale degli impatti descritti in Figura 5.2 corrisponde ad 1 tonnellata di bitume residuo: questo significa che, in realtà, essi sono riferiti ad 1,54 tonnellate di emulsione bituminosa. Al fine di normalizzare gli impatti rispetto ad 1 tonnellata di emulsione, le voci di inventario fornite da Eurobitume sono state divise per 1,54. Ancora, la procedura di calcolo e conversione delle unità di misura, per ottenere i dati di input per l'applicativo, è la medesima presentata per il bitume. Si riportano dunque direttamente i risultati finali di inventario in Tabella 5.3.

Tabella 5.3: LCI per la produzione di 1 short ton di emulsione bituminosa

GWP	[g/short ton]	161.907
CO	[g/short ton]	623
NO_x	[g/short ton]	711
SO₂	[g/short ton]	585
PM10	[g/short ton]	191
GER	[MJ/short ton]	2.445
Consumo idrico	[g/short ton]	1.221.510

5.2.4. Aggregati naturali

La definizione delle emissioni e dei consumi relativi alla produzione degli aggregati è stata eseguita mediante la modellazione dei dati reperiti nel lavoro di (Blengini, et al., 2010) attraverso il software OpenLCA.

L'analisi di inventario include gli oneri ambientali legati all'estrazione delle materie prime dalla cava ed alla frantumazione e vagliatura degli aggregati, adottando dunque un approccio *cradle-to-gate*. Si riportano in Tabella 5.4 le voci di inventario assunte per la produzione degli aggregati vergini, già riferite all'unità di riferimento impiegata da PaLATE.

Tabella 5.4: LCI per la produzione di 1 short ton di aggregati naturali

GWP	[g/short ton]	2.467,9
CO	[g/short ton]	3,98
NO_x	[g/short ton]	8,80
SO₂	[g/short ton]	6,52
PM10	[g/short ton]	1,18
GER	[MJ/short ton]	25,10
Consumo idrico	[g/short ton]	1.261.434

5.2.5. Approvvigionamento idrico

I dati relativi alla fornitura idrica sono necessari per considerare l'impatto legato all'impiego dell'acqua nella fase di costruzione dello strato di fondazione della pavimentazione.

Le voci di inventario per questa risorsa sono state definite direttamente sulla base dei dati forniti dal database Ecoinvent. Si riportano in Tabella 5.5 gli impatti legati all'approvvigionamento di 1 tonnellata corta di acqua.

Tabella 5.5: LCI per l'approvvigionamento di 1 short ton di acqua

GWP	[g/short ton]	145,0
CO	[g/short ton]	1,05
NO_x	[g/short ton]	0,34
SO₂	[g/short ton]	0,37
PM10	[g/short ton]	0,12
GER	[MJ/short ton]	5,00
Consumo idrico	[g/short ton]	-

Occorre specificare che per quanto riguarda il consumo idrico legato all'approvvigionamento dell'acqua, nello studio LCA, si è considerato il quantitativo di acqua necessario alla realizzazione dello strato di fondazione.

5.2.6. Produzione del gasolio

Il *Life Cycle Inventory* relativo alla produzione del gasolio risulta necessaria per la valutazione di una parte degli impatti dovuti all'impiego dei mezzi di cantiere.

Come nel caso dell'acqua, anche per la produzione del gasolio, i dati sono stati forniti dal database Ecoinvent, il quale presenta i valori mostrati nel prospetto sintetico in Tabella 5.6.

Tabella 5.6: LCI per la produzione di 1 short ton di gasolio

GWP	[g/short ton]	543.404
CO	[g/short ton]	694,45
NO_x	[g/short ton]	2.055,68
SO₂	[g/short ton]	2.752
PM10	[g/short ton]	199,13
GER	[MJ/short ton]	44.180
Consumo idrico	[g/short ton]	327.092

5.2.7. Nanomateriali

Per quanto riguarda il LCI dei materiali, l'ultima voce di inventario corrisponde ai nano-additivi impiegati per il rinforzo delle miscele bituminose.

L'analisi di inventario per i nanomateriali è già stata parzialmente eseguita al Capitolo 2, con l'identificazione degli impatti legati alla produzione di 1 kg di CNTs e di 1 kg di OMMT.

Tra tutti i valori reperiti in letteratura, risulta ora necessaria la scelta di quale considerare ai fini dello studio LCA. In generale, poiché si è riscontrata una grande variabilità nell'entità degli impatti (soprattutto per i nanotubi di carbonio), l'approccio adottato consiste nella selezione di almeno due fonti al fine di delineare un intervallo di variazione che definisce l'eco-profilo degli agenti nano-rinforzanti, nonché poi delle miscele bituminose modificate.

5.2.7.1. Nanotubi di carbonio

In conformità con la sperimentazione eseguita nel lavoro di (Miglietta, et al., 2016) (Capitolo 3), la scelta è ricaduta sui dati relativi ai nanotubi *multi-wall*, prodotti mediante la tecnica CVD.

A causa dell'incertezza sulla tipologia di tecnica CVD impiegata, sono stati considerati tre studi di riferimento che presentano tre tecniche differenti. Si riportano in Tabella 5.7 le voci di inventario per i CNTs.

Tabella 5.7: LCI per la produzione di 1 short ton di MWCNTs via CVD

GWP [g/short ton]	GER [MJ/short ton]	Consumo idrico [g/short ton]
MWCNTs via Fixed bed CVD (Trompeta, et al., 2016)		
191.560.799	1.001.815	10.798.548.094
MWCNTs via Floating Catalyst CVD (Griffiths, et al., 2013)		
149.773.920	44.464.610	1.525.820.928
MWCNTs via Fluidized Bed CVD (Roes, et al., 2010)		
9.981.851	86.570	-

Gli impatti esposti in Tabella 5.7 sono già stati convertiti nelle unità di misura adottate in PaLATE, in modo del tutto analogo a quanto fatto per i precedenti materiali.

Come si può notare, le tecniche di riferimento comportano diversi livelli di efficienza ambientale e di conseguenza incidono in modo differente sull'impatto complessivo della pavimentazione.

5.2.7.2. Nanoargille

Per quanto riguarda le nanoargille, la fase di inventario risulta più semplice a causa della scarsità di dati reperiti in letteratura. Si riportano in Tabella 5.8 le voci di impatto per la produzione di 1 tonnellata corta di OMMT.

Tabella 5.8: LCI per la produzione di 1 short ton di OMMT

GWP [g/short ton]	CO [g/short ton]	NO_x [g/short ton]	SO₂ [g/short ton]	PM10 [g/short ton]	GER [MJ/short ton]
OMMT (Joshi, 2008)					
1.385.500	2.813	4.701	4.986	1.034	36.369
OMMT (Roes, et al., 2010)					
3.221.416	-	-	-	-	63.249
OMMT (Schrijvers, et al. 2014)					
2.949.183	-	-	-	-	66.062

5.2.8. Inventario dei mezzi

L'inventario dei mezzi è stato implementato sulla base delle lavorazioni necessarie alla produzione del materiale da posare in opera ed alla costruzione della sovrastruttura. Le attività che sono state considerate sono le seguenti.

1. Trasporto del bitume e dell'emulsione bituminosa.
2. Carico e trasporto degli aggregati.
3. Trasporto dei nanomateriali.
4. Produzione del bitume nano-modificato.
5. Produzione del conglomerato bituminoso.
6. Trasporto dei materiali in cantiere.
7. Stesa del misto granulare.

8. Aggiunta di acqua al misto granulare per il raggiungimento dell'umidità ottimale.
9. Compattazione della fondazione.
10. Applicazione dell'emulsione bituminosa sulla superficie degli strati fondazione, base e collegamento.
11. Stesa degli strati in conglomerato bituminoso.
12. Compattazione degli strati in conglomerato bituminoso.

La fase (3) risulta chiaramente compresa solo nello studio degli scenari innovativi; mentre le restanti sono valide per tutti gli scenari.

I dati di riferimento per il *Life Cycle Inventory* dei mezzi impiegati sono stati ricavati principalmente dall'articolo di (Celauro, et al., 2017). Si riportano in Tabella 5.9 e Tabella 5.10, i prospetti rispettivamente dei mezzi di trasporto e dei macchinari impiegati per ogni attività e le relative caratteristiche tecniche.

Tabella 5.9: inventario dei mezzi di trasporto

Mezzo	Tipo	Capacità [short ton]	Consumo carburante [l/km]	Attività
Dumper truck	4 assi IVECO	25	0,33	2,6
Tanker truck	3 assi MAN	20	0,2	1,6

Tabella 5.10: inventario dei mezzi impiegati per la costruzione della sovrastruttura

Macchinario	Tipo/Marca	Potenza motore [hp]	Produttività [short ton/h]	Consumo carburante [l/h]	Attività
Grader	CAT 12M2	176	5.992	40	5
Finitrice	Bomag BF 600	163	1.344	43,1	9
Rullo gommato	Bomag BW 226 dh-4	201	1.198	37,6	7
Rullo compattatore	Bomag BW 203 ad-4	134	448	33	10
Spruzzatrice	Wirtgen SW 16 MC	360	165	2	6,8
Impianto di produzione del conglomerato bituminoso	Fabric Filter-Controlled Batch-mix	-	214	-	4

I dati relativi ai mezzi di trasporto sono stati forniti direttamente da Sitalfa S.p.A. (co-gestore dell'autostrada A32 Torino - Bardonecchia), mentre le specifiche riguardanti l'impianto di produzione del conglomerato bituminoso sono state ricavate da PaLATE 2.0; le caratteristiche dei restanti mezzi derivano dallo studio di (Celauro, et al., 2017).

Come si può notare da Tabella 5.9 e Tabella 5.10, non sono stati ancora presentati i macchinari per il carico degli aggregati e per la produzione dei bitumi nano-modificati perché essi hanno richiesto un'analisi più approfondita.

5.2.8.1. Definizione delle caratteristiche della pala gommata

Si assume che le operazioni di carico del dumper vengano eseguite a mezzo di una pala gommata del tipo CAT 950K. Tale modello è stato scelto perché presenta delle caratteristiche del tutto simili a quelle del mezzo utilizzato nell'impianto Sitalfa S.p.A..

Sono state definite la produttività oraria e i consumi del macchinario, con riferimento ai dati forniti dal “*Caterpillar Performance Handbook*” (Caterpillar Inc., 2012). Si riportano le caratteristiche della pala CAT 950K definite per lo studio LCA in Tabella 5.11.

Tabella 5.11: caratteristiche tecniche della pala gommata CAT 950K

Macchinari	Tipo	Potenza motore [hp]	Produttività [short ton/h]	Consumo carburante [l/h]	Attività
Pala gommata	CAT 950K	212	560	17	2

5.2.8.2. Produzione del bitume nano-modificato

Al fine di completare l’analisi di inventario è necessaria la caratterizzazione del processo di nano-modifica del bitume. Esso è stato descritto nel dettaglio al Par. 3.1.3 ma, per maggiore chiarezza, ne si farà un breve richiamo.

La procedura di produzione del composto costituito da bitume e nano-additivo prevede una prima fase di miscelazione meccanica ed una seconda fase di miscelazione ad ultrasuoni, attraverso l’impiego di un sonicatore. Si sono analizzati quindi separatamente i due step, ai fini della modellazione e della definizione dei flussi che caratterizzano il processo.

LCI DEL PROCESSO DI MISCELAZIONE MECCANICA DEL BITUME NANO-MODIFICATO

In questa prima fase, la miscelazione del bitume con il nano-additivo viene eseguita mediante *shear mixer*, per una durata di 90 minuti alla velocità 1.550 rpm.

Si ipotizza, in modo del tutto ragionevole, che la tecnica di miscelazione meccanica del bitume nano-modificato sia del tutto simile a quella adottata per la miscelazione del bitume modificato con polimero (PMB). Sulla base di questa assunzione dunque, si suppone che le due tecniche siano caratterizzate dal medesimo inventario. I dati relativi a questa lavorazione sono stati reperiti all’interno dell’inventario (Eurobitume, 2012) per la miscelazione di 1 tonnellata di bitume modificato con polimero: “*PMB milling*” (Figura 5.3).

Production of 1 tonne of PMB (process with infrastructure)	Unit	Bitumen	SBS (production & transport)	PMB milling	Total
Raw material					
Crude oil	kg	965	22,6		988
Consumption of energy resources					
Natural gas	kg	217	29,8	0,78	52,3
Crude oil	kg	487	20,1	0,3	691
Coal	kg	10,5	5,4	2,1	18,0
Uranium	kg	0,00025	0,00000	0,00015	0,0004
Consumption of non energy resources					
Water ⁷⁾	l	1195	6.843	97	8.135
Emissions to air					
CO ₂	g	218.252	117.719	10.046	346.016
SO ₂	g	867	842	34	1.744
NO _x	g	1.102	614	18	1.734
CO	g	1.004	76	3	1.083
CH ₄	g	694	493	18	1.205
Hydrocarbon	g	50,5	1.017	1	1.068
NM VOC	g	390	10	1	401
Particulates	g	2901	99,8	9,9	400
Emissions to water					
Chemical Oxygen Demand	g	652	42	4	698
Biological Oxygen Demand	g	493	8	4	506
Suspended solids	g	216	56,6	14,4	287
Hydrocarbon	g	145,2	10,2	1,3	157
Phosphorous compounds	g	7470	0,85	31,80	107,3
Nitrogen compounds	g	22,87	0,89	9,66	33,42
Sulphur compounds	g	1.738	35	788	2.561
Emissions to soil					
Hydrocarbon (oils)	g	149,8	19	1,3	163

Figura 5.3: inventario relativo alla miscelazione di 1 ton di PMB

Analogamente a quanto eseguito nei paragrafi precedenti, si aggregano le voci legate al consumo di risorse energetiche e si convertono i valori di emissione per ottenere le voci di inventario riferite alla miscelazione di 1 tonnellata corta di bitume modificato, da inserire nell'applicativo (Tabella 5.12).

Tabella 5.12: LCI per la miscelazione di 1 short ton bitume nano-modificato

GWP	[g/short ton]	9.525
CO	[g/short ton]	2,7
NO_x	[g/short ton]	16
SO₂	[g/short ton]	31
PM10	[g/short ton]	9,0
GER	[MJ/short ton]	157,2
Consumo idrico	[g/short ton]	88.022

LCI DELL'IMPIANTO DI SONICAZIONE

La seconda fase di miscelazione consiste nella sonicazione del bitume modificato per ottenere la dispersione ottimale del nano-materiale nella matrice bituminosa. La durata della miscelazione ad ultrasuoni è pari a 60 minuti. Si devono valutare gli impatti legati a questo processo.

Sulla base delle indicazioni fornite gentilmente dalla Seneco s.r.l., un'azienda specializzata nel campo dei miscelatori ultrasonici, si è eseguita una proiezione industriale della procedura di sonicazione eseguita in laboratorio. Si ipotizza un impianto costituito dalle seguenti componenti.

- Impianto di carico costituito da un sistema di pompe e condotte. Esso è indispensabile per convogliare il bitume modificato (pre-miscelato) all'interno del sonicatore e successivamente nel serbatoio di stoccaggio.
- Scambiatore di calore. Esso è impiegato al fine di mantenere costante la temperatura del materiale durante l'intero trattamento. Si ricorda che la temperatura del legante deve essere pari a 150 °C, come da indicazioni riportate al Par. (3.1.3).
- Sonicatore, all'interno del quale avviene la miscelazione ad ultrasuoni.
- Serbatoio di stoccaggio, in cui viene depositato il bitume nano-modificato a seguito del processo di sonicazione.

Nel presente studio sono state fatte diverse considerazioni, seguendo le prescrizioni ed i dati forniti dalla Seneco s.r.l., al fine di modellare il processo di sonicazione ed ottenere dei risultati realistici.

Innanzitutto, ponendo particolare attenzione nei confronti del miscelatore ad ultrasuoni, si riporta in Figura 5.4 il suo schema di funzionamento.

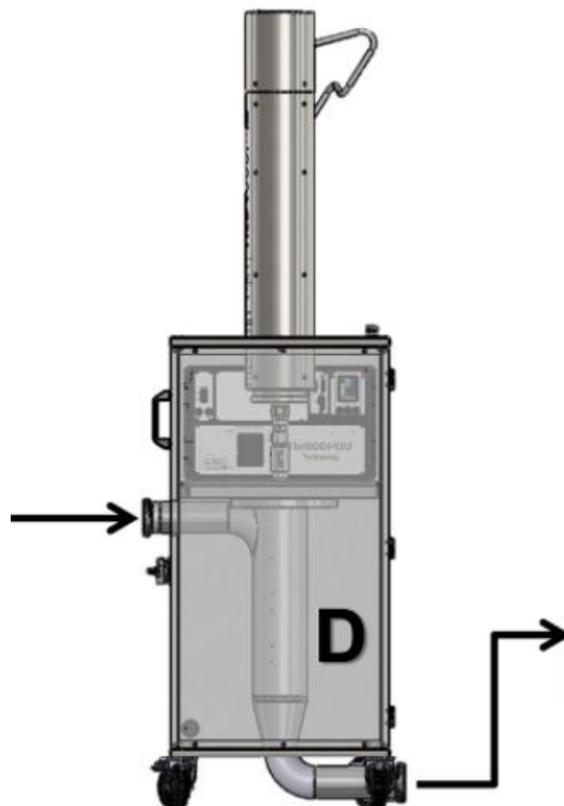


Figura 5.4: macchina per la miscelazione ad ultrasuoni (Servili, et al., 2019)

Da Figura 5.4 si può notare come il sonicatore sia caratterizzato da un funzionamento in condizioni di flusso del materiale. Il bitume pre-miscelato è spinto nella cella di cavitazione, mediante una pompa, all'interno della quale è investito da onde ultrasoniche emesse dal sonotrodo. Completato il processo di miscelazione del legante, il materiale è convogliato all'esterno della macchina, verso il serbatoio di stoccaggio.

Tuttavia, al fine di ottenere una dispersione dell'agente nano-modificante simile a quella ottimale ottenuta in laboratorio, nella sperimentazione di (Santagata, et al., 2019), non risulta sufficiente un solo passaggio del materiale all'interno della cella di sonicazione. A tal proposito, la Seneco s.r.l. ha definito, in modo empirico, un numero di passaggi pari a 5 per ottenere un livello di dispersione comparabile ai 60 minuti di sonicazione della miscela eseguita in laboratorio, con sonicatore "ad immersione". Occorre comunque specificare che, la stima fornita dalla Seneco s.r.l. è stata eseguita in modo del tutto empirico e che l'azienda consultata prescrive delle prove strutturate per eseguire un calcolo puntuale e preciso.

Riassumendo, ai fini del presente studio LCA si assume la configurazione dell'impianto di sonicazione come descritto in precedenza e si definisce pari a 5 il numero di passaggi nella macchina ad ultrasuoni che conduce alla dispersione ottimale del nanomateriale all'interno della matrice bituminosa.

Modellato l'impianto di miscelazione ad ultrasuoni, si procede ora alla definizione degli impatti legati alla procedura di sonicazione.

Per quanto riguarda il sonicatore, sulla base dei dati forniti dall'azienda di riferimento, si è definito un consumo di potenza elettrica del macchinario pari a 4 kW ed una produttività oraria pari a 2 ton/h, con singolo passaggio. Tale stima è stata eseguita sulla base delle caratteristiche di impianti simili, realmente in esercizio per la produzione, ad esempio, di pasta di olive (Servili, et al., 2019). Tuttavia, considerando che il materiale dovrà essere processato 5 volte, la produttività oraria è stata calcolata mediante l'Equazione (5.10).

$$\begin{aligned} \text{Produttività processo} &= \frac{\text{Produttività sonicatore [ton/h]}}{\text{Numero di passaggi}} = \frac{2 \text{ ton/h}}{5} \\ &= 0,4 \text{ ton/h} = 0,44 \text{ short ton/h} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Si può quindi determinare il consumo di energia elettrica per tonnellata corta di materiale processato, attraverso la seguente espressione.

$$\begin{aligned} \text{GER [MJ/short ton]} &= \frac{\text{Potenza elettrica [kW]} \cdot \text{conversione [MJ/kWh]}}{\text{Produttività processo [short ton/h]}} \\ &= \frac{4 \text{ kW} \cdot 3,6 \text{ MJ/kWh}}{0,44 \text{ short ton/h}} = 32,7 \text{ MJ/short ton} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Si precisa che il consumo elettrico assunto corrisponde al valore massimo possibile. Tale approccio risulta a favore di sicurezza perché, tipicamente il macchinario lavora in regimi di consumo inferiori. Si assume, in modo del tutto ragionevole, che l'unico impatto generato dal sonicatore sia derivato dall'energia elettrica impiegata per alimentarlo.

Per la restante parte di infrastruttura costituita dall'impianto di carico, lo scambiatore di calore ed il serbatoio di stoccaggio si applica un criterio di similitudine, come nel caso della miscelazione meccanica: si assume che gli impatti legati all'attività della restante parte dell'impianto di sonicazione corrispondano all'inventario fornito da (Eurobitume, 2020) relativo allo stoccaggio del bitume (Figura 5.5).

Production of 1 tonne of bitumen (process with infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
Raw material						
Crude oil	kg	1 000				1 000
Consumption of energy resources						
Natural gas	kg	26	1,0	0,054	0,082	27
Crude oil	kg	11,2	9,5	1,2	0,54	22
Consumption of non-energy resources						
Water ¹⁾	L	811	90	206	7,2	1 115
Emissions to air						
CO ₂	g	130 157	33 258	19 278	6 650	189 343
SO ₂	g	486	384	48	22	940
NO _x	g	549	646	20	8,3	1 224
CO	g	385	96	11,0	2,3	494
CH ₄	g	486	42	4,3	2,7	535
NM VOC	g	411	39	3,0	0,98	455
Particulates	g	159	102	6,3	3,2	271
Emissions to water						
Chemical Oxygen Demand	g	19 257	2 241	40	5,7	21 544
Biological Oxygen Demand	g	19 098	2 232	16	5,4	21 352
Suspended solids	g	260	34,2	7,22	0,55	302
Hydrocarbon (crude oil)	g	33,5	30	4,3	1,7	69,5
Emissions to soil						
Hydrocarbon (crude oil)	g	31,7	38	4,0	1,8	75

Figura 5.5: LCI per lo stoccaggio di 1 tonnellata di bitume

Questa approssimazione si ritiene accettabile perché le lavorazioni previste nei due sistemi comparati risultano molto simili. Ancora, tale assunzione risulta a favore di sicurezza perché, nell'impianto di stoccaggio analizzato da Eurobitume, si assume una temperatura di processo del materiale pari a 175 °C mentre la temperatura di miscelazione prevista per il processo di sonicazione risulta essere pari a 150 °C. Si procede quindi alla conversione delle voci di impatto riportate in Figura 5.5, al fine di ottenere l'inventario per lo stoccaggio di 1 short ton di bitume nell'impianto di sonicazione (Tabella 5.12). Anche in questo caso, poiché risulta necessario processare il bitume modificato cinque volte, tutti gli impatti sono stati moltiplicati per il numero di passaggi.

Tabella 5.13: LCI per lo stoccaggio di 1 tonnellata corta di bitume nell'impianto di sonicazione

GWP	[g/short ton]	30.480
CO	[g/short ton]	10,5
NO_x	[g/short ton]	37,5
SO₂	[g/short ton]	100
PM10	[g/short ton]	14,5
GER	[MJ/short ton]	455
Consumo idrico	[g/short ton]	32.670

Si precisa che la voce d'inventario relativa al consumo energetico definita in Tabella 5.12 è stata calcolata considerando il valore di GER pari a 100 MJ/ton, reperito all'interno di (Eurobitume, 2020) (Figura 5.6).

Bitumen tank			Heat losses		
Volume	m ³	6 200	Bitumen storage	MJ/t	70,1
Temperature	°C	175	Pipelines		
Annual throughput	t	40 000	- bitumen	MJ/t	20,2
Outside conditions			- heating oil	MJ/t	
Temperature	°C	10	Total storage	MJ/t	90,3
Wind	m/s	5	Energy need	MJ/t	90,3
Annual use	h	8 000	Fuel for Hot oil		
Heating oil efficiency	%	85	Energy need	MJ/t	9,7
Pumps	kW	11	Electricity		
Annual usage time	h	8 760	Total energy	MJ/t	100,0

Figura 5.6: calcolo dell'energia necessaria per lo stoccaggio del bitume (Eurobitume, 2020)

Si è riscontrato che tale valore non è in linea con quello derivante dalla somma dei contributi energetici riportati in Figura 5.5, la quale risulta essere pari a 27,3 MJ/ton. Attraverso un ulteriore controllo nella versione precedente di Eurobitume, si è invece riscontrato nuovamente un fabbisogno energetico prossimo a 100 MJ/ton.

Sulla base di quanto riportato nei documenti di Eurobitume ed adottando un approccio conservativo, si è scelto di considerare all'interno del presente inventario il valore di GER più elevato: 100 MJ/ton.

5.3. Valutazione dell'impatto ambientale

Definito l'inventario dei materiali e dei mezzi che concorrono alla costruzione della sovrastruttura, si procede ora con la terza fase dello studio LCA: la valutazione dell'impatto ambientale o *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). In questo passaggio sono stati quantificati gli impatti legati alla realizzazione di una corsia dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia, di lunghezza pari ad 1 km.

La trattazione è stata sviluppata analizzando singolarmente gli scenari previsti in fase di progetto, al fine di eseguire un confronto finale dei risultati ottenuti. Come detto in precedenza, lo strumento utilizzato per lo svolgimento della fase di LCIA è l'applicativo PaLATE 2.0.

La logica seguita nella trattazione di ogni scenario si basa sull'organizzazione dell'applicativo PaLATE in fogli di lavoro; si espliciteranno tutti i dati di input, nonché i risultati ambientali forniti dall'applicativo, per ogni scenario.

5.3.1. Analisi dello scenario S-TAL QUALE

Il presente sotto paragrafo si pone l'obiettivo di valutare gli impatti generati dalla costruzione della pavimentazione autostradale nello scenario S-TAL QUALE, in cui si è previsto l'impiego di conglomerato bituminoso tradizionale per tutti gli strati legati.

5.3.1.1. Design S-TAL QUALE

Il primo foglio di calcolo che presenta PaLATE corrisponde al foglio di “*Design*”; esso richiede in input le dimensioni geometriche dell’infrastruttura, nonché le densità dei materiali impiegati.

Per quanto riguarda le dimensioni geometriche, la lunghezza di autostrada analizzata è pari a 1000 m. Come detto in precedenza, si valuta la costruzione di una sola corsia la quale, ai sensi del D.M. 6792/2001 “*Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade*”, è caratterizzata da una larghezza pari 3,75 m. Gli spessori dei diversi strati corrispondono a quelli di progetto definiti al capitolo precedente e presentati Tabella 5.14.

Tabella 5.14: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-TQ

Strato	Larghezza [m]	Lunghezza [m]	Spessore [m]	Volume [m ³]
Usura	3,75	1000	0,05	187,5
Binder	3,75	1000	0,06	225,0
Base	3,75	1000	0,22	825,0
Fondazione	3,75	1000	0,15	562,5

Come si può evincere da Tabella 5.15, le consistenze delle diverse dimensioni della sovrastruttura sono state convertite nelle unità di misura del sistema metrico USC (“*United States Customary*”), come richiesto dall’applicativo.

Tabella 5.15: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-TQ – PaLATE 2.0

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
USURA	12,295	0,622	1,969	245
BINDER	12,295	0,622	2,362	294
BASE	12,295	0,622	8,661	1.079
FONDAZIONE	12,295	0,622	5,906	735
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			18,898	2.353

Nel presente scenario è previsto l’impiego dei seguenti materiali: bitume base, aggregati per la formazione del misto granulare e delle miscele bituminose, conglomerato bituminoso tradizionale, emulsione bituminosa ed acqua. Tutte le masse volumiche sono note dal capitolo precedente, ad eccezione dell’emulsione bituminosa, per la quale si assume un valore corrispondente a quello del bitume: 997,5 kg/m³. Anche in questo caso deve essere eseguita la conversione dell’unità di misura, come riportato in Tabella 5.16.

Tabella 5.16: densità principalmente utilizzate nella LCIA

Materiale	Densità [ton/m³]	Densità [short ton/yd³]
Bitume	0,998	0,84
Aggregati	2,786	2,34
Misto granulare	2,700	2,27
Conglomerato bituminoso per strato di usura (MMVT)	2,544	2,14
Conglomerato bituminoso per strato di binder (MMVT)	2,578	2,17
Conglomerato bituminoso per strato di base (MMVT)	2,578	2,17
Emulsione bituminosa	0,998	0,84
Acqua	1,000	0,84

5.3.1.2. Initial construction S-TAL QUALE

Definite le caratteristiche geometriche della sovrastruttura e le masse volumiche dei materiali, nella sezione “*Initial construction*” l’applicativo prevede l’inserimento dei seguenti dati:

- volumi dei singoli materiali necessari alla formazione di una corsia di lunghezza pari ad 1 km della sovrastruttura;
- distanze di trasporto “*one-way*” dei materiali.

COMPUTO DEI VOLUMI DEI MATERIALI

Si procede dunque alla definizione delle quantità per i diversi materiali costituenti gli strati della pavimentazione. Si ricorda che i dati volumetrici delle miscele sono noti dal capitolo precedente.

STRATO DI USURA

A partire dalle grandezze volumetriche definite al Par. 4.4.1, si calcolano i volumi necessari di bitume e aggregati attraverso le Equazioni rispettivamente (5.12) e (5.13).

$$V_B = V_{USURA} \cdot V_b(\%) = 187,5 \text{ m}^3 \cdot 13,0\% = 24,5 \text{ m}^3 = 32,0 \text{ yd}^3 \quad (5.12)$$

$$V_G = V_{USURA} \cdot V_g(\%) = 187,5 \text{ m}^3 \cdot 83,5\% = 156,5 \text{ m}^3 = 204,9 \text{ yd}^3 \quad (5.13)$$

Il volume del conglomerato bituminoso è calcolato automaticamente da PaLATE sommando questi due valori. Si può notare che la somma di essi non corrisponde al volume dello strato di usura ma risulta inferiore perché non sono considerati i vuoti nella miscela. Poiché l’applicativo, in fase di valutazione degli impatti, convertirà i volumi dei materiali in masse, la densità di input adottata per i conglomerati bituminosi coincide con la MMVT, per tenere conto del fatto che il volume dei vuoti sia stato trascurato.

STRATO DI COLLEGAMENTO

Nel caso dello strato di collegamento, si ricorda che la percentuale di bitume e di aggregati rispetto al volume totale della miscela sono rispettivamente pari a 11,2 e 84,8% (Par. 4.4.2). Ne si calcolano i volumi impiegati mediante le espressioni (5.14) e (5.15).

$$V_B = V_{\text{BINDER}} \cdot V_b(\%) = 225,0 \text{ m}^3 \cdot 11,2\% = 25,1 \text{ m}^3 = 32,9 \text{ yd}^3 \quad (5.14)$$

$$V_G = V_{\text{BINDER}} \cdot V_g(\%) = 225,0 \text{ m}^3 \cdot 84,8\% = 190,9 \text{ m}^3 = 250,0 \text{ yd}^3 \quad (5.15)$$

In conformità con il Capitolato ANAS, è stata definita anche la massa per unità di superficie di emulsione bituminosa. Le norme tecniche prescrivono che, per mano d'attacco, sia prevista una quantità di bitume residuo pari a 0,8 – 1,2 kg/m². Si considera dunque un valore medio pari a 1,0 kg/m².

Ipotizzando la composizione dell'emulsione bituminosa come 65% bitume e 35% acqua, in linea con quanto definito durante la fase di LCI, si può determinarne il dosaggio corrispondente ad 1,0 kg/m² di bitume residuo mediante l'Equazione (5.16).

$$Q_E = \frac{Q_{\text{BR}}}{Q_B(\%)} = \frac{1,0 \text{ kg/m}^2}{0,65} = 1,54 \text{ kg/m}^2 \quad (5.16)$$

In cui:

- Q_E rappresenta la consistenza per unità di superficie di emulsione bituminosa [kg/m²];
- Q_{BR} rappresenta la quantità di bitume residuo dopo la rottura dell'emulsione [kg/m²];
- $Q_B(\%)$ rappresenta la percentuale di bitume rispetto alla massa totale dell'emulsione bituminosa [%].

Si può quindi calcolare il volume di emulsione da applicare sulla superficie dello strato di collegamento mediante l'Equazione (5.17).

$$V_E = \frac{Q_E \cdot S_{\text{BINDER}}}{\gamma_E} = \frac{1,54 \text{ kg/m}^2 \cdot (3,75 \text{ m} \cdot 1000 \text{ m})}{998 \text{ kg/m}^3} = 5,8 \text{ m}^3 \\ = 7,6 \text{ yd}^3 \quad (5.17)$$

Dove:

- V_E rappresenta il volume di emulsione bituminosa [m³];
- S_{BINDER} rappresenta la superficie di stesa [m²];
- γ_E rappresenta la densità dell'emulsione bituminosa [kg/m³].

STRATO DI BASE

Analogamente a quanto fatto per gli strati precedenti, si procede alla determinazione dei volumi dei diversi materiali che compongono lo strato di base.

$$V_B = V_{BASE} \cdot V_b(\%) = 825,0 \text{ m}^3 \cdot 11,1\% = 92,6 \text{ m}^3 = 120,0 \text{ yd}^3 \quad (5.18)$$

$$V_G = V_{BASE} \cdot V_g(\%) = 825,0 \text{ m}^3 \cdot 84,4\% = 696,2 \text{ m}^3 = 911,8 \text{ yd}^3 \quad (5.19)$$

Per il volume di emulsione bituminosa valgono le medesime considerazioni eseguite per lo strato di collegamento. Si determina, quindi, in Equazione (5.20) il volume di emulsione per lo strato di base.

$$V_E = \frac{Q_E \cdot S_{BINDER}}{\gamma_E} = \frac{1,54 \text{ kg/m}^2 \cdot (3,75 \text{ m} \cdot 1000 \text{ m})}{998 \text{ kg/m}^3} = 5,8 \text{ m}^3 \\ = 7,6 \text{ yd}^3 \quad (5.20)$$

FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE

Lo strato di fondazione, definito al Par 4.4.4, prevede l'impiego di aggregati e acqua. Ricordando che la percentuale dei vuoti (v) è pari a 19,63%, si procede con la definizione della percentuale di aggregati rispetto al volume totale del misto granulare, nell'espressione (5.21).

$$V_g(\%) = 100 - v(\%) = 100 - 19,63 = 80,37\% \quad (5.21)$$

Si determina dunque il volume degli aggregati attraverso la seguente formulazione.

$$V_G = V_{FONDAZIONE} \cdot V_g(\%) = 562,5 \text{ m}^3 \cdot 80,37\% = 452,1 \text{ m}^3 = 592,1 \text{ yd}^3 \quad (5.22)$$

Per quanto riguarda il quantitativo di acqua previsto per il raggiungimento dell'umidità ottimale della miscela in situ, si applica l'Equazione (5.23).

$$V_{ACQUA} = \frac{V_G \cdot MV_{agg} \cdot m_{acqua}(\%)}{\gamma_{ACQUA}} = \frac{452,1 \text{ m}^3 \cdot 2.700 \text{ kg/m}^3 \cdot 6,5\%}{1000 \text{ kg/m}^3} \\ = 79,3 \text{ m}^3 = 103,9 \text{ yd}^3 \quad (5.23)$$

Risulta necessario specificare che, per lo strato di fondazione si è computata anche la MMVT relativa alla miscela di acqua e aggregati come in espressione (5.24).

$$\begin{aligned}
MMVT_{\text{FONDAZIONE}} &= \frac{100}{\left[\frac{100 - \text{macqua}(\%)}{MV_{\text{agg}}} + \frac{\text{macqua}(\%)}{\gamma_{\text{ACQUA}}} \right]} = \frac{100}{\frac{100 - 6,5}{2700 \text{ kg/m}^3} + \frac{6,5}{1000 \text{ kg/m}^3}} \quad (5.24) \\
&= 2431 \text{ kg/m}^3 = 2,05 \text{ short ton/yd}^3
\end{aligned}$$

La determinazione di tale grandezza risulta necessaria perché il volume di misto granulare considerato da PaLATE, per la fase di compattazione della fondazione, risulta essere la somma dei volumi di aggregati e acqua rispettivamente definiti nelle Equazioni (5.22) e (5.23).

In ultimo, si procede alla definizione della quantità di emulsione bituminosa necessaria per realizzare la mano di ancoraggio. In questo caso, il Capitolato ANAS prescrive un dosaggio di bitume residuo pari a $1 - 2 \text{ kg/m}^2$. In linea con il criterio adottato per il dosaggio relativo alla mano di attacco, si assume il valore medio: $1,5 \text{ kg/m}^2$. Analogamente a quanto fatto in precedenza, si procede al calcolo del dosaggio per unità di superficie e del volume impiegato di emulsione bituminosa rispettivamente nelle Equazioni (5.25) e (5.26)

$$Q_E = \frac{Q_{BR}}{Q_B(\%)} = \frac{1,5 \text{ kg/m}^2}{0,65} = 2,31 \text{ kg/m}^2 \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned}
V_E &= \frac{Q_E \cdot S_{\text{FONDAZIONE}}}{\gamma_E} = \frac{2,31 \text{ kg/m}^2 \cdot (3,75 \text{ m} \cdot 1000 \text{ m})}{998 \text{ kg/m}^3} = 8,7 \text{ m}^3 \quad (5.26) \\
&= 11,4 \text{ yd}^3
\end{aligned}$$

COMPUTO DELLE DISTANZE DI TRASPORTO

Le distanze di trasporto dei singoli materiali sono state definite assumendo come base logistica l'impianto Sitalfa S.p.A., sito a Salbertrand (TO).

Per ognuno degli strati della pavimentazione, sono determinate le distanze di trasporto dal luogo di produzione delle materie prime all'impianto Sitalfa e da quest'ultimo al cantiere.

AGGREGATI

Gli aggregati sono estratti dalla cava Mollieres, situata nel comune di Cesana Torinese. La distanza che intercorre tra il sito di estrazione e l'impianto Sitalfa corrisponde a 14,5 km.

Per quanto riguarda il filler, esso è fornito dalla Nicem s.r.l., la quale dista 280 km dalla base logistica.

Nella definizione della distanza di trasporto del sistema costituito da aggregati e filler, si è seguito il seguente approccio semplificato: la distanza di trasporto della miscela è definita mediante un calcolo proporzionale, basato sulle percentuali dei due materiali impiegati nel conglomerato bituminoso.

Per lo strato di usura si ipotizza una miscela costituita dal 7% di filler e dal 93% di aggregati. La distanza di trasporto si calcola quindi come:

$$D_{\text{agg,USURA}} = 14,5 \text{ km} \cdot 93\% + 280 \cdot 7\% = 33,09 \text{ km} = 20,56 \text{ mi} \quad (5.27)$$

Per quanto concerne il mezzo, qualora si trattasse con il trasporto di due materiali differenti come in questo caso, PaLATE prescrive di scegliere quello “predominante”. Il mezzo “predominante” risulta quindi il *dumper truck* impiegato per il trasporto degli aggregati.

Analogamente a quanto eseguito per lo strato di usura, si determinano le distanze di trasporto per gli aggregati per la formazione dello strato di collegamento e base (Eq. 5.28 - 5.29) per i quali si prevede una presenza di filler rispettivamente pari al 6,4% (Par. 3.1.4.1) e 5%, nel rispetto del Capitolato ANAS.

$$D_{\text{agg,BINDER}} = 14,5 \text{ km} \cdot 93,6\% + 280 \cdot 6,4\% = 31,49 \text{ km} = 19,57 \text{ mi} \quad (5.28)$$

$$D_{\text{agg,BASE}} = 14,5 \text{ km} \cdot 95\% + 280 \cdot 5\% = 27,78 \text{ km} = 17,26 \text{ mi} \quad (5.29)$$

In ultimo, per gli aggregati necessari alla formazione del misto granulare, si assume che siano trasportati dalla cava di estrazione all’impianto Sitalfa e successivamente dallo stabilimento al cantiere. La distanza di trasporto risultante è definita mediante l’espressione (5.30).

$$D_{\text{agg,FONDAZIONE}} = 14,5 \text{ km} + 51,2 \text{ km} = 65,70 \text{ km} = 40,83 \text{ mi} \quad (5.30)$$

BITUME

Il bitume è fornito dalla raffineria Iplom S.p.A. situata a Busalla (GE). In questo scenario, il legante è consegnato direttamente in stabilimento. La distanza di trasporto risulta essere dunque pari a 229 km (142,32 mi).

Il trasporto del bitume avviene a mezzo di un *tanker truck*.

EMULSIONE BITUMINOSA

L’emulsione bituminosa è prodotta dalla Bitem s.r.l., la cui sede si trova a Modena. Il materiale dunque verrà recapitato allo stabilimento Sitalfa (372 km) e successivamente trasportato in cantiere (51,2 km). La distanza di trasporto complessiva per l’emulsione risulta quindi essere pari a 423,2 km (263,02 mi) ed il trasporto viene eseguito mediante *tanker truck*.

CONGLOMERATO BITUMINOSO

Lo stabilimento Sitalfa è dotato di un proprio impianto di produzione del conglomerato bituminoso. Questo significa che la distanza di trasporto delle miscele è pari alla distanza che intercorre tra lo stabilimento ed il cantiere, ovvero 51,2 km (31,82 mi).

Il trasporto del conglomerato bituminoso è eseguito a mezzo di un *dumper truck*.

ACQUA

Si assume che l'impianto Sitalfa sia dotato inoltre delle proprie riserve idriche in loco, quindi quanto stabilito per la distanza di trasporto del conglomerato bituminoso è valido anche per questa risorsa.

L'acqua è trasportata dall'impianto al cantiere mediante un *tanker truck*.

Le distanze di trasporto dei materiali risultano quindi completamente definite per il presente scenario. Per maggiore chiarezza, si riporta un prospetto riassuntivo in Tabella 5.17.

Tabella 5.17: prospetto riassuntivo delle distanze di trasporto considerate – S-TAL QUALE

Materiali	Distanze di trasporto	
	[km]	[mi]
Aggregati usura	33,09	20,56
Aggregati binder	31,49	19,57
Aggregati base	27,78	17,26
Bitume	229,00	142,32
Emulsione	280,20	174,15
Conglomerato bituminoso	51,20	31,82
Misto granulare	65,70	40,83

5.3.1.3. Equipment S-TAL QUALE

All'interno del foglio di lavoro "Eqmt" si definiscono i macchinari impiegati per la posa in opera della pavimentazione. Le attività ed i macchinari previsti nel presente scenario sono i medesimi indicati al Par. 5.2.8, ad esclusione della nano-modifica del bitume.

5.3.1.4. EMF transport S-TAL QUALE

In ultimo, per quanto riguarda gli input per lo studio LCA in PaLATE, nel foglio "*EMF transport*" si riportano le analisi di inventario prodotte per i seguenti materiali: aggregati, bitume, emulsione bituminosa, produzione del conglomerato bituminoso, acqua e produzione del gasolio.

Ai fini della valutazione degli impatti ambientali, sono state effettuate le seguenti ipotesi:

- Il *Life Cycle Inventory* relativo al filler coincide con quello definito per gli aggregati.
- Il consumo idrico legato al trasporto dei materiali è dovuto all'impiego dell'acqua per la produzione del gasolio.
- Il GER è definito includendo al suo interno anche l'energia elettrica.

5.3.1.5. Environmental results S-TAL QUALE

Definiti i dati di input che caratterizzano lo scenario S-TAL QUALE, si procede con l'illustrazione dei risultati ambientali forniti da PaLATE, descritti nel foglio di lavoro "Env Results" dell'applicativo.

Si riportano in Tabella 5.18 gli impatti ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di una corsia di lunghezza pari ad 1 km di autostrada.

Tabella 5.18: impatti ambientali relativi allo scenario S-TAL QUALE

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.252.027	6.001.920	100	411	63	309	712
Materials Transportation	183.932	1.576	16	1.176	198	84	110
Processes (Equipment)	14.617	125	1	25	3	3	6
Total	1.450.576	6.003.621	118	1.613	264	396	827

Da Tabella 5.18 si può immediatamente notare che per il GER, il consumo di acqua, il GWP e la formazione di monossido di carbonio (CO) e di SO₂ risulta preponderante il contributo legato alla produzione dei materiali. Per quanto riguarda le voci di impatto legate alla produzione di NO_x e particolato, il maggiore contributo è dovuto al trasporto.

In Figura 5.7 si riportano, in particolare, i consumi e le emissioni relative al GER e al GWP valutando in modo più approfondito l'incidenza delle varie fasi sul valore totale degli impatti.

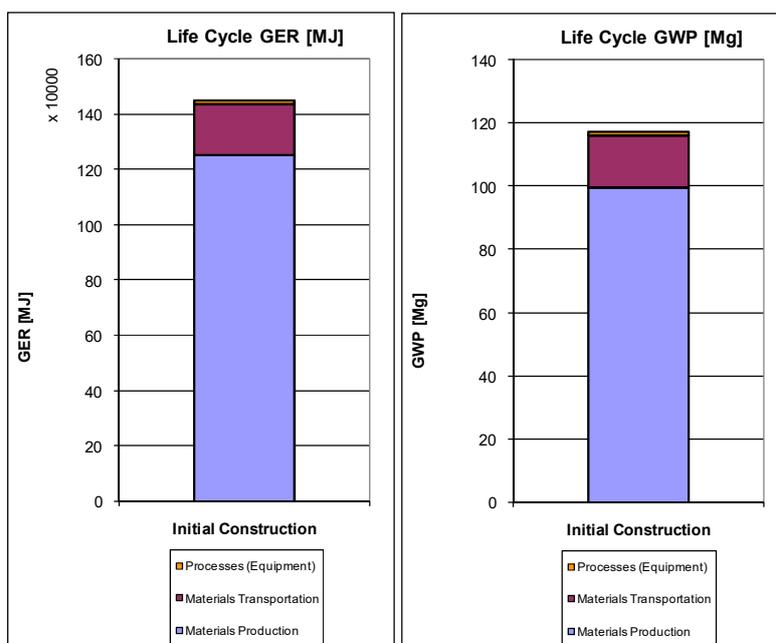


Figura 5.7: GER e GWP per lo scenario S-TAL QUALE

Per quanto riguarda il GER, la fase di costruzione che genera il maggiore impatto corrisponde alla produzione dei materiali, la quale presenta un'incidenza pari all'86% sul valore totale. La fase di trasporto e di realizzazione della pavimentazione risultano decisamente meno consistenti, essendo caratterizzate da valori rispettivamente pari al 13% e 1%.

Le emissioni di CO_{2,eq} rispecchiano il medesimo modello seguito dal GER: la produzione dei materiali risulta essere la fase più impattante presentando un'incidenza dell'85% sul valore totale, mentre la quota parte dei costi ambientali legati al trasporto ed alla realizzazione della pavimentazione risultano rispettivamente pari al 14% e 1% rispetto all'emissione totale.

I risultati ambientali relativi allo scenario di riferimento risultano fondamentali per la discussione e l'analisi dei risultati ottenuti per gli scenari innovativi.

5.3.2. Analisi dello scenario S-NC

Nel presente sotto paragrafo si intende eseguire l'analisi LCIA relativa alle prime due fasi del ciclo della pavimentazione autostradale, progettata nello scenario S-NC. Si ricorda che in questo scenario gli strati di collegamento e base sono realizzati in conglomerato bituminoso nano-rinforzato con nanoargille, mentre lo strato di usura è formato da conglomerato tradizionale.

Si procede in modo del tutto analogo a quanto eseguito per lo scenario S-TAL QUALE.

5.3.2.1. Design S-NC

Come nello scenario precedente, lunghezza e larghezza del segmento di riferimento della pavimentazione sono rispettivamente pari 1000 m e 3,75 m. Gli spessori degli strati corrispondono a quelli di progetto definiti al Capitolo 4 e presentati schematicamente in Tabella 5.19.

Tabella 5.19: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-NC

Strato	Larghezza [m]	Lunghezza [m]	Spessore [m]	Volume [m ³]
Usura	3,75	1000	0,06	225,0
Binder	3,75	1000	0,05	187,5
Base	3,75	1000	0,12	450,0
Fondazione	3,75	1000	0,15	562,2

Convertendo le dimensioni geometriche della sovrastruttura nelle unità di misura del sistema metrico USC si ottengono i dati geometrici di input per l'applicativo (Tabella 5.20).

Tabella 5.20: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-NC, PaLATE 2.0

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
USURA	12,295	0,622	2,362	294
BINDER	12,295	0,622	1,969	245
BASE	12,295	0,622	4,724	588
FONDAZIONE	12,295	0,622	5,906	735
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			14,961	1.863

In questo scenario si prevede l'impiego dei seguenti materiali: bitume base, aggregati per la formazione del misto granulare e delle miscele bituminose, nanoargille (OMMT), bitume nano-modificato, conglomerato bituminoso tradizionale e nano-rinforzato, emulsione bituminosa, acqua e produzione del gasolio. Si riportano le densità utilizzate nella procedura di calcolo in Tabella 5.21.

Tabella 5.21: densità principalmente utilizzate nella LCIA per lo scenario S-NC

Materiale	Densità [ton/m³]	Densità [short ton/yd³]
Bitume	0,998	0,84
Aggregati	2,786	2,34
Misto granulare	2,700	2,27
Conglomerato bituminoso per strato di usura (MMVT)	2,544	2,14
Conglomerato bituminoso per strato di binder (MMVT)	2,589	2,18
Conglomerato bituminoso per strato di base (MMVT)	2,589	2,18
Emulsione bituminosa	0,998	0,84
Acqua	1,000	0,84

5.3.2.2. Initial construction S-NC

Nella valutazione del presente scenario si è scelto di considerare, per i nanomateriali ed i bitumi modificati, direttamente le masse come input dell'applicativo. In relazione ai risultati finali, tale input non genera differenza poiché PaLATE, in fase di quantificazione degli impatti, converte i volumi definiti per i diversi materiali, in masse per moltiplicarle per i fattori di emissione.

Si procede quindi alla definizione dei volumi e delle masse dei materiali necessari alla realizzazione della pavimentazione ed alla definizione delle distanze di trasporto unidirezionali.

COMPUTO DEI VOLUMI E DELLE MASSE DEI MATERIALI

Come eseguito nel sotto Paragrafo (5.3.1.2), sono state valutate le quantità dei materiali strato per strato.

STRATO DI USURA

Con riferimento al Paragrafo 4.4.1 si calcolano i volumi di bitume e aggregati, necessari per la realizzazione dello strato di usura, attraverso le Equazioni (5.31) e (5.32).

$$V_B = V_{USURA} \cdot V_b(\%) = 225 \text{ m}^3 \cdot 13,0\% = 29,4 \text{ m}^3 = 38,4 \text{ yd}^3 \quad (5.31)$$

$$V_G = V_{USURA} \cdot V_g(\%) = 225 \text{ m}^3 \cdot 83,5\% = 187,8 \text{ m}^3 = 245,9 \text{ yd}^3 \quad (5.32)$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

Lo strato di collegamento è formato da conglomerato bituminoso nano-rinforzato quindi si dovranno definire le quantità di bitume base e nano-modificato, nanoargille e aggregati.

Si procede al calcolo del volume degli aggregati e della massa di bitume nano-modificato presenti nella miscela mediante le Equazioni (5.33) e (5.34).

$$V_G = V_{BINDER} \cdot V_g(\%) = 187,5 \text{ m}^3 \cdot 85,2\% = 159,7 \text{ m}^3 = 209,2 \text{ yd}^3 \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} M_{B,NM} &= V_{BINDER} \cdot MV_{BINDER} \cdot m_{B,NM}(\%) \\ &= 187,5 \text{ m}^3 \cdot 2,485 \text{ ton/m}^3 \cdot 4,5\% = 20,97 \text{ ton} \\ &= 23,11 \text{ short ton} \end{aligned} \quad (5.34)$$

In cui $M_{B,NM}$ corrisponde alla massa del bitume nano-modificato e $m_{B,NM}(\%)$ corrisponde alla percentuale di quest'ultimo rispetto alla massa totale della miscela.

Il dosaggio di nanoargille, rispetto alla massa di bitume, si ricorda essere pari a 3%. Per definire la percentuale del nanomateriale sulla massa totale del bitume nano-modificato (m_{NC}) si applica la seguente espressione.

$$m_{NC}(\%) = \frac{m_{NC,B}(\%)}{\left(1 + \frac{m_{NC,B}(\%)}{100}\right)} = \frac{3}{\left(1 + \frac{3}{100}\right)} = 2,91\% \quad (5.35)$$

Si può quindi calcolare la massa di OMMT richiesta per la miscela attraverso la formulazione riportata in Equazione (5.36).

$$M_{NC} = M_{B,NM} \cdot \frac{m_{NC}(\%)}{100} = 20,97 \text{ ton} \cdot \frac{2,91}{100} = 0,61 \text{ ton} = 0,67 \text{ short ton} \quad (5.36)$$

Si determina, ancora, la quantità di bitume base mediante la seguente espressione.

$$V_B = \frac{1}{\gamma_b} [M_{B,NM} \cdot (1 - m_{NC})] = \frac{1}{0,998 \text{ ton/m}^3} [20,97 \text{ ton} \cdot (1 - 0,0291)] \quad (5.37)$$

$$= 20,4 \text{ m}^3 = 26,7 \text{ yd}^3$$

In ultimo, per quanto riguarda l'emulsione bituminosa, il volume previsto coincide con quello calcolato per lo strato di collegamento nello scenario di riferimento.

STRATO DI BASE

La procedura di calcolo per la definizione delle quantità dei materiali per lo strato di collegamento si ripete anche per lo strato di base. Essa viene riportata nelle Equazioni (5.37), (5.38), (5.39) e (5.40).

$$V_G = V_{BASE} \cdot V_g(\%) = 450,0 \text{ m}^3 \cdot 84,8\% = 381,4 \text{ m}^3 = 499,5 \text{ yd}^3 \quad (5.37)$$

$$M_{B,NM} = V_{BASE} \cdot MV_{BASE} \cdot m_{B,NM}(\%) = 450,0 \text{ m}^3 \cdot 2,472 \text{ ton/m}^3 \cdot 4,5\% \quad (5.38)$$

$$= 50,07 \text{ ton} = 55,18 \text{ short ton}$$

$$M_{NC} = M_{B,NM} \cdot \frac{m_{NC}(\%)}{100} = 50,07 \text{ ton} \cdot \frac{2,91}{100} = 1,46 \text{ ton} = 1,61 \text{ short ton} \quad (5.39)$$

$$V_B = \frac{1}{\gamma_b} [M_{B,NM} \cdot (1 - m_{NC})] = \frac{1}{0,998 \text{ ton/m}^3} [50,07 \text{ ton} \cdot (1 - 0,0291)] \quad (5.40)$$

$$= 48,7 \text{ m}^3 = 63,8 \text{ yd}^3$$

Infine, il volume di emulsione bituminosa per la mano d'attacco risulta pari a 5,8 m³ o 7,6 yd³, analogamente a quanto definito per lo scenario di riferimento.

FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE

La fondazione nello scenario S-NC è caratterizzata dal medesimo spessore e dalle medesime caratteristiche volumetriche di quella definita per lo scenario S-TAL QUALE. Il volume degli aggregati, dell'acqua, di emulsione bituminosa e la MMVT risultano essere quindi uguali a quelli definiti rispettivamente nelle Equazioni (5.22), (5.23), (5.24) e (5.26).

COMPUTO DELLE DISTANZE DI TRASPORTO

Le distanze di trasporto per i materiali, ad esclusione di quella del bitume per gli strati di collegamento e base, sono le medesime definite nello scenario S-TAL QUALE.

BITUME PER STRATO DI COLLEGAMENTO E BASE

Per quanto riguarda il legante per le miscele di binder e base, in questo scenario è prevista la nano-modifica, per la quale è necessario un impianto dotato di un'infrastruttura adeguata. A questo proposito, si assume che la nano-modifica avvenga presso lo stabilimento Bitumtec s.r.l., sito a Volpiano (TO). Tale azienda fa parte del Gruppo API ed è specializzata nella

produzione di emulsioni e bitumi modificati. Si ipotizza dunque che la Bitumtec sia dotata dell'impianto di miscelazione meccanica e di sonicazione per additivare i nanomateriali al bitume. Sulla base di questa ipotesi, il bitume TAL QUALE viene trasportato dalla raffineria Iplom S.p.A. allo stabilimento Bitumtec s.r.l., per una distanza pari a 176 km (109,36 mi).

NANOMATERIALI

Anche il trasporto dei nanomateriali ha come destinazione lo stabilimento Bitumtec s.r.l. per la produzione dei bitumi nano-modificati. Tuttavia la distanza di trasporto, in questo caso, è caratterizzata da un'aleatorietà intrinseca poiché si è assunto, a priori, un valore pari a 1000 km (621,37 mi) per ambo i nanomateriali. Tale ipotesi è stata definita sulla base della localizzazione degli stabilimenti di produzione dei nanotubi di carbonio e nanoargille utilizzati nella sperimentazione di (Miglietta, et al., 2016). Tuttavia si tratta di una distanza del tutto indicativa, che corrisponde al raggio di spostamento ritenuto più ragionevole per il trasporto di questi materiali presso l'impianto considerato per la modifica del bitume. Si precisa che il trasporto è previsto a mezzo di *dumper truck*.

BITUME NANO-MODIFICATO

In ultimo, si deve considerare il trasporto del bitume nano-modificato dalla Bitumtec s.r.l. allo stabilimento Sitalfa S.p.A. per la produzione del conglomerato bituminoso. La distanza che intercorre tra i due impianti corrisponde a 94,1 km (58,47 mi). Il trasporto avviene mediante *tanker truck*.

Le distanze di trasporto lo scenario S-NC risultano quindi completamente definite. Per maggiore chiarezza, si riporta un prospetto riassuntivo in Tabella 5.22.

Tabella 5.22: prospetto riassuntivo delle distanze di trasporto considerate – S-NC

Materiali	Distanze di trasporto	
	[km]	[mi]
Aggregati usura	33,09	20,56
Aggregati binder	31,49	19,57
Aggregati base	27,78	17,26
Bitume base per usura	229,00	142,32
Bitume base per binder e base	176,00	109,38
MWCNTs	1000,00	621,50
Bitume nano-modificato	94,10	58,48
Emulsione bituminosa	280,20	174,15
Conglomerato bituminoso	51,20	31,82
Misto granulare	65,70	40,83

5.3.2.3. Equipment S-NC

Come detto in precedenza, in questa fase si definiscono i macchinari impiegati per la produzione dei materiali e per la posa in opera della pavimentazione. Le attività ed i macchinari previsti nel presente scenario comprendono la totalità di quelli indicati al Par. 5.2.8.

5.3.2.4. EMF transport S-NC

In ultimo, per quanto riguarda gli input per lo studio LCA in PaLATE, nel foglio “*EMF transport*” si riportano le analisi di inventario prodotte per le seguenti voci: aggregati, bitume base, nanoargille, miscelazione del bitume nano-modificato, emulsione bituminosa, conglomerato bituminoso tradizionale e nano-modificato, acqua e produzione del gasolio.

Si precisa che in fase di calcolo dei “*risultati ambientali*”, l’impatto legato alla produzione del bitume nano-modificato deriva dalla somma dei contributi forniti dalla miscelazione meccanica e dalla sonicazione (Par. 5.2.8.2).

Infine, valgono tutte le ipotesi già enunciate per lo scenario di riferimento (Par. 5.3.1.4).

5.3.2.5. Environmental results S-NC

Definiti i dati di input che caratterizzano lo scenario S-NC, si procede con l’illustrazione dei risultati ambientali forniti da PaLATE, descritti nel foglio “Env Results” dell’applicativo. Si ricorda che negli scenari innovativi, non sono stati definiti dei valori puntuali degli impatti ambientali, ma bensì degli intervalli, al fine di considerare la variabilità dei dati riscontrati in letteratura. In questo modo si potranno trarre delle conclusioni più solide ed attendibili.

Si precisa inoltre che, nell’analisi d’inventario relativa alle nanoargille sono stati considerati i tre studi di riferimento reperiti in letteratura. Si riportano in Tabella 5.23, Tabella 5.24 e Tabella 5.25 i risultati ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di una corsia di lunghezza pari ad 1 km di autostrada, considerando come input dello studio LCIA rispettivamente gli studi di (Satish, 2008), (Roes, et al., 2010) e (Schrijvers, et al., 2014).

Tabella 5.23: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Satish, 2008)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.034.687	-	78	311	50	244	511
Materials Transportation	145.561	1.247	13	932	156	66	87
Processes (Equipment)	10.812	93	1	19	2	2	5
Total	1.191.060	-	92	1.262	208	313	602

Tabella 5.24: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Roes, et al., 2010)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.095.976	-	82	-	-	-	-
Materials Transportation	145.561	1.247	13	932	156	66	87
Processes (Equipment)	10.812	93	1	19	2	2	5
Total	1.252.348	-	96	-	-	-	-

Tabella 5.25: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Schrijvers, et al., 2014)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.102.390	-	82	-	-	-	-
Materials Transportation	145.561	1.247	13	932	156	66	87
Processes (Equipment)	10.812	93	1	19	2	2	5
Total	1.258.762	-	96	-	-	-	-

Si può notare, innanzitutto, che i risultati più completi sono quelli ottenuti considerando lo studio di (Satish, 2008), grazie ad un inventario più ampio rispetto agli altri articoli. Tuttavia, a causa della mancanza di informazioni, si focalizzerà l'attenzione principalmente sui consumi e sulle emissioni relativi al GER e al GWP, i quali comunque caratterizzano in modo esaustivo le prestazioni ambientali della pavimentazione nano-rinforzata, delineandone l'eco-profilo.

La seconda considerazione vuole evidenziare che si riscontrano delle differenze in termini di impatto, tra i tre studi eseguiti, solo nella fase di produzione dei materiali: questo perché la discriminante presente tra diversi inventari considerati risiede negli oneri ambientali legati alla produzione del nano-materiale.

Come detto in precedenza, si intende definire una sorta di involucro degli impatti ambientali generati dalla pavimentazione realizzata con conglomerati bituminosi nano-modificati con nanoargille. A tale scopo, considerando le categorie di GER e di GWP si prendono in esame i valori minimi e massimi riscontrati nell'ambito delle tre analisi eseguite. Si riportano i risultati in Tabella 5.26.

Tabella 5.26: intervallo di variazione degli impatti legati al GER e al GWP valutati nello scenario S-NC

	GER _{min} [MJ]	GER _{max} [MJ]	GWP _{min} [Mg]	GWP _{max} [Mg]
Materials Production	1.034.687	1.102.390	78	82
Materials Transportation	145.561	145.561	13	13
Processes (Equipment)	10.812	10.812	1	1
Total	1.191.060	1.258.762	92	96

In Figura 5.8 si riportano i consumi e le emissioni relative al GER e al GWP, valutando in modo più approfondito l'intervallo di variazione di queste categorie e l'incidenza delle varie fasi sul valore totale degli impatti.

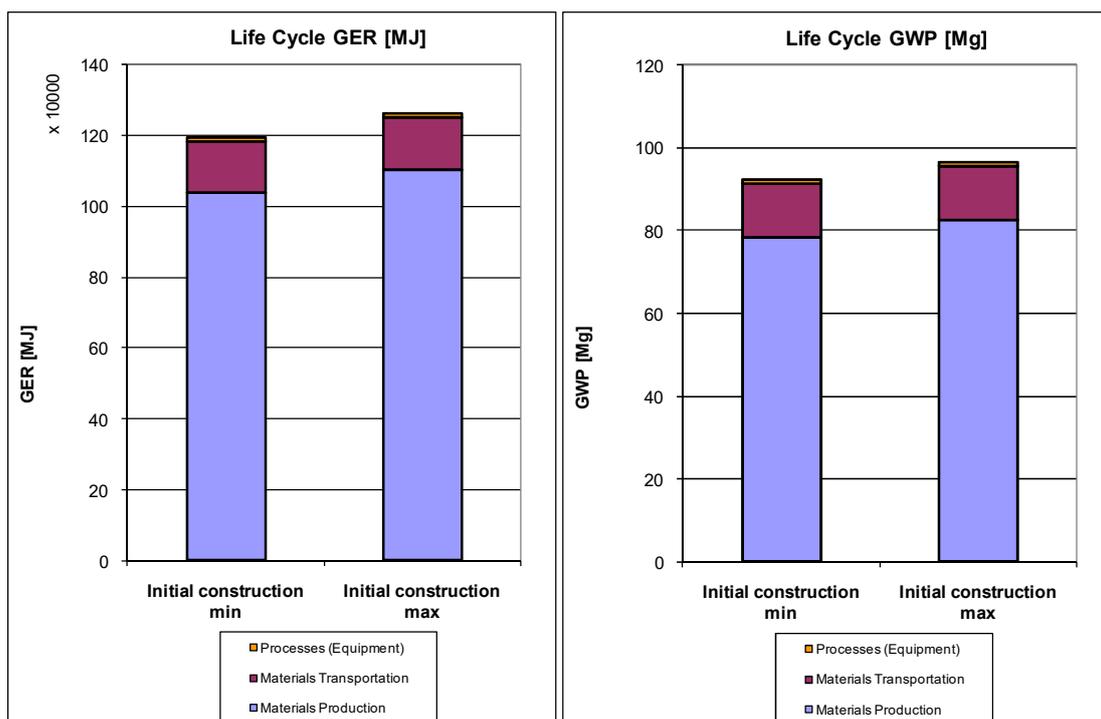


Figura 5.8: intervalli di variazione del GER e del GWP, per lo scenario S-NC

Da Tabella 5.26 e Figura 5.8 si può osservare che l'intervallo di variazione (Δ) delle due categorie di impatto considerate è caratterizzato da un'ampiezza ridotta.

$$\Delta_{\text{GER}} = \text{GER}_{\text{max}} - \text{GER}_{\text{min}} = 1.258.762 \text{ MJ} - 1.191.060 \text{ MJ} = 67.702 \text{ MJ} \quad (5.37)$$

$$\Delta_{\text{GWP}} = \text{GWP}_{\text{max}} - \text{GWP}_{\text{min}} = 96 \text{ Mg} - 92 \text{ Mg} = 4 \text{ Mg} \quad (5.38)$$

In ambo gli estremi dell'intervallo delineato per il GER, si nota che la fase di produzione dei materiali è quella maggiormente incidente sul valore totale dell'indicatore: nel caso dell'estremo inferiore, si riscontra infatti un'incidenza pari all'86% mentre, per l'estremo superiore risulta un valore pari all'88%. Come nello scenario S-TAL QUALE, anche in questo caso la fase caratterizzata dalla minor quota di consumi energetici è quella di realizzazione della pavimentazione che presenta, in entrambi gli estremi, un valore leggermente inferiore all'1%.

Le emissioni minime e massime di $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ rispecchiano il medesimo modello seguito dal GER: la produzione dei materiali risulta essere la fase più impattante presentando un'incidenza superiore al 85% del valore totale in ambo gli estremi di intervallo. La quota parte dei costi ambientali legati alla realizzazione della pavimentazione si attesta circa all'1% rispetto all'emissione totale e la restante parte è causata dal trasporto.

5.3.3. Analisi dello scenario S-CNTs

Si procede, infine, alla valutazione degli impatti ambientali dello scenario di progetto S-CNTs, per il quale è prevista la realizzazione degli strati di collegamento e base in conglomerato bituminoso nano-rinforzato mediante nanotubi di carbonio *multi-wall*.

Il processo di produzione dei materiali e l'iter costruttivo della pavimentazione risultano del tutto analoghi a quanto già esposto per lo scenario S-NC. Nello studio del presente scenario dunque, si riportano unicamente i dati di input relativi alle dimensioni geometriche e la definizione delle consistenze dei materiali necessari alla formazione della sovrastruttura, poiché le distanze di trasporto, l'inventario dei mezzi e le considerazioni relative al calcolo degli impatti ambientali legati alla produzione del bitume nano-modificato combaciano perfettamente con quanto esplicitato per lo scenario S-NC.

5.3.3.1. Design S-CNTs

Le caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-CNTs differiscono rispetto ai precedenti esclusivamente in termini di stratigrafia. Sulla base di quanto definito in fase di progetto, si riportano gli spessori della sovrastruttura in Tabella 5.27 e le caratteristiche geometriche di input per l'analisi in Tabella 5.28.

Tabella 5.27: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-CNTs

Strato	Larghezza [m]	Lunghezza [m]	Spessore [m]	Volume [m ³]
Usura	3,75	1000	0,06	225,0
Binder	3,75	1000	0,05	187,5
Base	3,75	1000	0,18	675,0
Fondazione	3,75	1000	0,15	562,2

Tabella 5.28: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-CNTs, PaLATE 2.0

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
USURA	12,295	0,622	2,362	294
BINDER	12,295	0,622	1,969	245
BASE	12,295	0,622	7,087	882
FONDAZIONE	12,295	0,622	5,906	735
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			17,323	2.157

I materiali considerati nel presente scenario sono i seguenti: bitume base, aggregati per la formazione del misto granulare e delle miscele bituminose, nanotubi di carbonio (*MWCNTs*), bitume nano-modificato, conglomerato bituminoso tradizionale e nano-rinforzato, emulsione

bituminosa, acqua e produzione del gasolio. Si riportano le densità utilizzate in PaLATE in Tabella 5.29.

Tabella 5.29: densità principalmente utilizzate nella LCIA per lo scenario S-CNTs

Materiale	Densità [ton/m ³]	Densità [short ton/yd ³]
Bitume	0,998	0,84
Aggregati	2,786	2,34
Misto granulare	2,700	2,27
Conglomerato bituminoso per strato di usura (MMVT)	2,544	2,14
Conglomerato bituminoso per strato di binder (MMVT)	2,569	2,16
Conglomerato bituminoso per strato di base (MMVT)	2,573	2,17
Emulsione bituminosa	0,998	0,84
Acqua	1,000	0,84

5.3.3.2. Initial construction S-CNTs

I valori di input necessari, da inserire nel foglio di lavoro “*Initial construction*” di PaLATE, sono le caratteristiche volumetriche dei materiali costituenti la pavimentazione e le distanze di trasporto. Si ricorda che la procedura di calcolo delle quantità si basa sulle caratteristiche volumetriche delle miscele definite al Paragrafo 4.4.

STRATO DI USURA

Analogamente agli scenari precedentemente analizzati, lo strato di usura è formato da conglomerato bituminoso tradizionale. Si calcolano i volumi di bitume e aggregati attraverso le Equazioni (5.39) e (5.40).

$$V_B = V_{USURA} \cdot V_b(\%) = 225 \text{ m}^3 \cdot 13,0\% = 29,4 \text{ m}^3 = 38,4 \text{ yd}^3 \quad (5.39)$$

$$V_G = V_{USURA} \cdot V_g(\%) = 225 \text{ m}^3 \cdot 83,5\% = 187,8 \text{ m}^3 = 245,9 \text{ yd}^3 \quad (5.40)$$

STRATO DI COLLEGAMENTO

Per lo strato di collegamento in conglomerato bituminoso nano-rinforzato si procede in modo analogo a quanto fatto per lo scenario S-NC.

Si definiscono il volume di aggregati e la massa bitume nano-modificato attraverso le espressioni (5.41) e (5.42).

$$V_G = V_{BINDER} \cdot V_g(\%) = 187,5 \text{ m}^3 \cdot 84,5\% = 158,4 \text{ m}^3 = 207,4 \text{ yd}^3 \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned}
M_{B,NM} &= V_{BINDER} \cdot MV_{BINDER} \cdot m_{B,NM}(\%) \\
&= 187,5 \text{ m}^3 \cdot 2,466 \text{ ton/m}^3 \cdot 4,6\% = 21,27 \text{ ton} \\
&= 23,44 \text{ short ton}
\end{aligned} \tag{5.42}$$

Ricordando che il dosaggio di nanotubi rispetto alla massa bitume è pari a 0,5%, si può calcolare la percentuale del nanomateriale sulla massa totale del bitume nano-modificato e quindi la massa di *MWCNTs* richiesta per la miscela mediante le formulazioni riportate in Equazione (5.43) e (5.44).

$$m_{CNTs}(\%) = \frac{m_{CNTs,B}(\%)}{\left(1 + \frac{m_{CNTs,B}(\%)}{100}\right)} = \frac{0,5}{\left(1 + \frac{0,5}{100}\right)} \cong 0,5\% \tag{5.43}$$

$$M_{NC} = M_{B,NM} \cdot \frac{m_{NC}(\%)}{100} = 21,27 \text{ ton} \cdot \frac{0,5}{100} = 0,11 \text{ ton} = 0,12 \text{ short ton} \tag{5.44}$$

Si definisce la quantità di bitume base mediante la seguente espressione.

$$\begin{aligned}
V_B &= \frac{1}{\gamma_b} [M_{B,NM} \cdot (1 - m_{NC})] = \frac{1}{0,998 \text{ ton/m}^3} [21,27 \text{ ton} \cdot (1 - 0,005)] \\
&= 21,2 \text{ m}^3 = 27,8 \text{ yd}^3
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Infine, per quanto riguarda l'emulsione bituminosa, il volume previsto coincide con quello calcolato per gli scenari precedenti.

STRATO DI BASE

I dati di input di PaLATE per lo strato di base formato da conglomerato nano-rinforzato con *MWCNTs* vengono determinati mediante le seguenti formulazioni.

$$V_G = V_{BASE} \cdot V_g(\%) = 675,0 \text{ m}^3 \cdot 84,2\% = 568,6 \text{ m}^3 = 744,7 \text{ yd}^3 \tag{5.46}$$

$$\begin{aligned}
M_{B,NM} &= V_{BASE} \cdot MV_{BASE} \cdot m_{B,NM}(\%) = 675,0 \text{ m}^3 \cdot 2,458 \text{ ton/m}^3 \cdot 4,5\% \\
&= 74,66 \text{ ton} = 82,28 \text{ short ton}
\end{aligned} \tag{5.47}$$

$$M_{NC} = M_{B,NM} \cdot \frac{m_{NC}(\%)}{100} = 74,66 \text{ ton} \cdot \frac{0,5}{100} = 0,37 \text{ ton} = 0,41 \text{ short ton} \tag{5.48}$$

$$\begin{aligned}
V_B &= \frac{1}{\gamma_b} [M_{B,NM} \cdot (1 - m_{NC})] = \frac{1}{0,998 \text{ ton/m}^3} [74,66 \text{ ton} \cdot (1 - 0,005)] \\
&= 74,4 \text{ m}^3 = 97,5 \text{ yd}^3
\end{aligned} \tag{5.49}$$

Infine, il volume di emulsione bituminosa per la mano d'attacco risulta pari a 5,8 m³ o 7,6 yd³, analogamente a quanto definito per gli altri scenari.

FONDAZIONE IN MISTO GRANULARE

La fondazione nello scenario S-CNTs è caratterizzata dal medesimo spessore e dalle medesime caratteristiche volumetriche di quella definita per gli scenari precedenti. Il volume degli aggregati, dell'acqua, di emulsione bituminosa e la MMVT risultano essere quindi uguali a quelli definiti rispettivamente nelle Equazioni (5.22), (5.23), (5.24) e (5.26).

5.3.3.3.Environmental results S-CNTs

Si procede ora con la presentazione dei risultati ambientali relativi all'ultimo scenario analizzato per la pavimentazione autostradale. Analogamente allo S-NC, anche in questo scenario innovativo sono stati definiti degli intervalli di variazione degli impatti, focalizzandosi principalmente sul consumo energetico e sull'emissione di CO_{2,eq}.

Si ricorda che, nell'analisi d'inventario relativa ai MWCNTs, sono stati considerati tre studi di riferimento: (Roes, et al., 2010), (Trompeta, et al., 2016) e (Griffiths, et al., 2013). Si riportano in Tabella 5.30, Tabella 5.31 e Tabella 5.32 i risultati ambientali prodotti durante le varie fasi di costruzione di una corsia di lunghezza pari ad 1 km di autostrada.

Tabella 5.30: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Roes, et al., 2010)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.225.199	-	98	-	-	-	-
Materials Transportation	169.184	1.449	15	1.085	181	77	101
Processes (Equipment)	13.063	112	1	23	3	3	6
Total	1.407.446	-	114	-	-	-	-

Tabella 5.31: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Trompeta, et al., 2016)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	1.706.539	11.176.474	194	-	-	-	-
Materials Transportation	169.184	1.449	15	1.085	181	77	101
Processes (Equipment)	13.063	112	1	23	3	3	6
Total	1.888.786	11.178.035	210	-	-	-	-

Tabella 5.32: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Griffiths, et al., 2013)

	GER [MJ]	Consumo di acqua [kg]	GWP [Mg]	NO_x [kg]	PM10 [kg]	SO₂ [kg]	CO [kg]
Materials Production	24.563.081	6.300.062	172	-	-	-	-
Materials Transportation	169.184	1.449	15	1.085	181	77	101
Processes (Equipment)	13.063	112	1	23	3	3	6
Total	24.745.328	6.301.624	188	-	-	-	-

Si può osservare che, anche in questo scenario, si è riscontrata una carenza di dati relativi alla produzione dei MWCNTs in merito alle seguenti voci: NO_x, PM10, SO₂ e CO. Ciò non ha quindi permesso la quantificazione delle emissioni relative a queste categorie di impatto, per la costruzione della pavimentazione.

Come detto in precedenza, si intende definire un involucro degli impatti ambientali generati dalla pavimentazione realizzata con conglomerati bituminosi nano-modificati con MWCNTs. A tale scopo, considerando le categorie di GER e di GWP, si prendono in esame i valori minimi e massimi riscontrati nell'ambito delle tre analisi eseguite. Si riportano i risultati in Tabella 5.33.

Tabella 5.33: intervallo di variazione degli impatti legati al GER e al GWP valutati nello scenario S-CNTs

	GER_{min} [MJ]	GER_{max} [MJ]	GWP_{min} [Mg]	GWP_{max} [Mg]
Materials Production	1.225.199	24.563.081	98	194
Materials Transportation	169.184	169.184	15	15
Processes (Equipment)	13.063	13.063	1	1
Total	1.407.446	24.745.328	114	210

In Figura 5.9 e Figura 5.10 si riportano i consumi e le emissioni relative al GER e al GWP, valutando in modo più approfondito l'intervallo di variazione di queste categorie e l'incidenza delle varie fasi sul valore totale degli impatti.

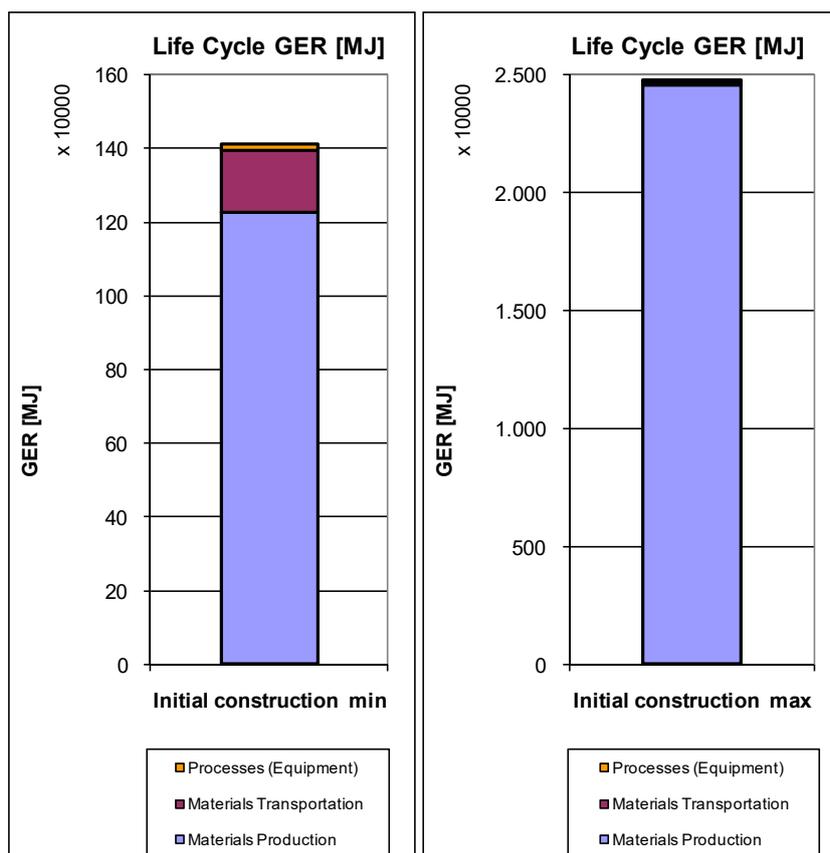


Figura 5.9: intervallo di variazione del GER per lo scenario S-CNTs

Da Tabella 5.33 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Figura 5.9 si può notare subito la consistente differenza tra il valore minimo ed il valore massimo del GER ottenuti. Questa discrepanza è dovuta al considerevole fabbisogno energetico per la produzione dei MWCNTs delineato nello studio di (Griffiths, et al., 2013).

L'estremo inferiore dell'intervallo identificato per il consumo energetico è composto per l'87% dal contributo legato alla produzione dei materiali, per il 12% dai consumi dovuti alla fase trasporto ed infine l'1% rimanente è imputato alla realizzazione della sovrastruttura.

Per quanto riguarda il valore massimo del GER, si può notare come quasi il 100% del consumo energetico sia legato alla sola produzione dei materiali, in particolare dei nanotubi di carbonio.

Si calcola l'ampiezza dell'intervallo mediante l'Equazione (5.50).

$$\begin{aligned} \Delta_{GER} &= GER_{max} - GER_{min} = 24.745.328 \text{ MJ} - 1.407.446 \text{ MJ} \\ &= 23.337.882 \text{ MJ} \end{aligned} \quad (5.50)$$

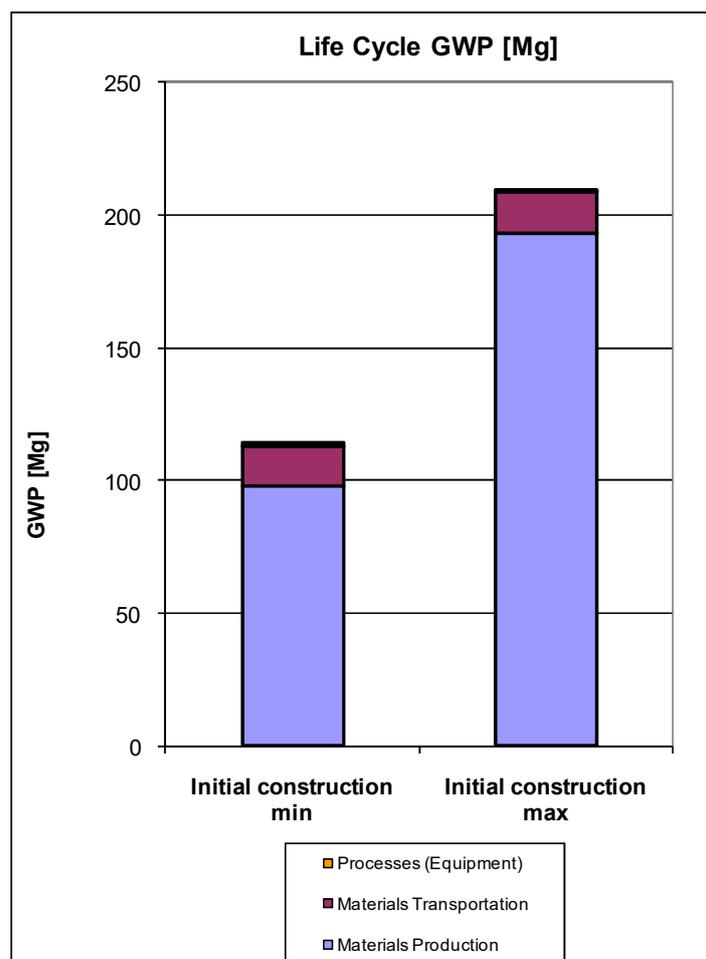


Figura 5.10: intervalli di variazione del GWP per lo scenario S-CNTs

In ultimo, per quanto riguarda il *Global Warming Potential*, i valori estremi dell'intervallo delle emissioni di $CO_{2,eq}$ sono 114 Mg e 210 Mg. In ambo i casi, l'impatto legato alla realizzazione della pavimentazione risulta essere circa pari all'1% rispetto al valore totale. Come in tutti gli scenari analizzati, la produzione dei materiali risulta essere il contributo preponderante presentando, in questo caso, per l'estremo inferiore un'incidenza pari all'86% e per l'estremo superiore un valore uguale a 92%.

5.4. Analisi dei risultati

I risultati dello studio LCA relativo ad una corsia di lunghezza pari ad 1 km dell'autostrada A32 Torino – Bardonecchia, svolto secondo un approccio *cradle-to-laid*, sono stati analizzati all'interno del presente paragrafo, in cui si è svolto uno studio comparativo degli scenari di progetto. L'obiettivo è quello di delineare l'eco-profilo delle sovrastrutture stradali innovative, rapportandolo allo scenario di riferimento in cui si prevede l'impiego di conglomerato bituminoso tradizionale.

L'analisi è stata articolata in due parti:

- Parte 1: in questa prima fase, lo studio si è focalizzato sulla definizione e sul confronto degli impatti ambientali relativi alla produzione dell'unità di volume dei conglomerati bituminosi analizzati.
- Parte 2: in questo secondo livello di analisi sono stati valutati gli oneri ambientali legati a tutti i processi a partire dalla produzione delle materie prime, fino alla costruzione dell'infrastruttura.

Come detto nel paragrafo precedente, gli impatti di riferimento considerati nel presente studio, per caratterizzare le prestazioni ambientali della sovrastruttura nei diversi scenari, sono il GER e il GWP.

5.4.1. Analisi comparativa: parte 1

Nel presente livello di analisi si intende comparare gli impatti ambientali dovuti alla produzione di 1 m³ di miscela tradizionale, modificata con nanoargille e con nanotubi di carbonio. L'obiettivo è quello di identificare, inoltre, gli oneri ambientali legati alle singole unità di processo che costituiscono le miscele in analisi.

In accordo con l'approccio adottato durante la fase di LCIA, anche in questo caso si definiranno degli intervalli di variazione dei consumi e delle emissioni generate dai conglomerati bituminosi nano-rinforzati.

Ancora, il confronto è stato eseguito considerando come riferimento le tre miscele che formano lo strato di collegamento della pavimentazione.

5.4.1.1. Confronto tra scenario S-TAL QUALE e S-NC

Gli oneri ambientali per unità di volume delle miscele negli scenari S-TAL QUALE e S-NC sono stati definiti rapportando gli impatti ottenuti per la produzione dei materiali che formano lo strato di collegamento al volume di riferimento dello strato stesso.

Si riportano in Figura 5.11, due grafici che rappresentano il confronto tra: i valori di GER e GWP ottenuti per lo scenario di riferimento e gli intervalli relativi ai medesimi impatti, ottenuti per lo scenario S-NC.

In questa prima comparazione si è omissa il contributo legato al trasporto dei materiali.

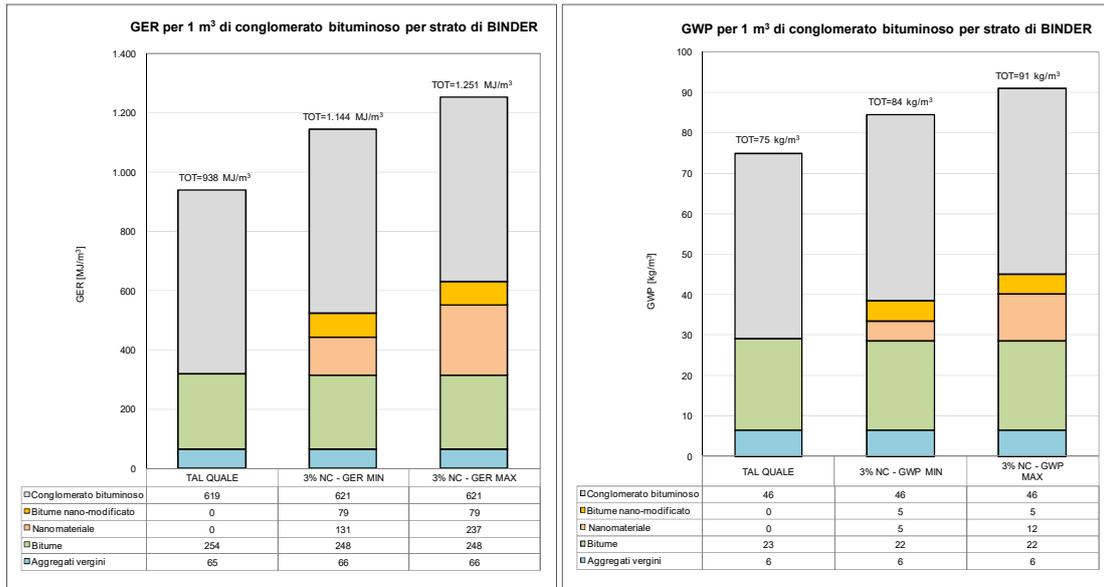


Figura 5.11: confronto tra GER e GWP relativi alla produzione dei materiali per 1 m³ di conglomerato bituminoso

Osservando i grafici riportati in Figura 5.11, si è ottenuta una panoramica generale della differenza di impatto che presentano le due miscele in esame. Ancora, è stato possibile evidenziare i contributi dei singoli dei materiali e l'incidenza di ognuno di essi sul valore globale del GER e del GWP: questo ha permesso di identificare le discriminanti che hanno condotto a questa differenza di costi ambientali richiesti per la produzione di 1 m³ dei conglomerati.

Innanzitutto, considerando il grafico relativo al GER, si può notare come il consumo energetico totale legato per la formazione dell'unità di volume di miscela TAL QUALE, per cui si è stimato un valore pari a 938 MJ, risulta inferiore all'intervallo delineato per la miscela NC, di estremi 1.144 MJ – 1.251 MJ.

Valutando le singole componenti che costituiscono il consumo energetico, si evidenzia, inoltre, che il contributo per la produzione degli aggregati risulta essere quello minore, mentre il contributo legato alla produzione del conglomerato bituminoso risulta essere quello più incidente.

Analizzando più da vicino la miscela innovativa modificata con il 3% di nanoargille, si è osservato che la maggiorazione del GER deriva chiaramente dalla produzione del nanomateriale e del bitume nano-modificato. Si riscontra un fabbisogno energetico minimo di 131 MJ e massimo di 273 MJ per la produzione della OMMT mentre per quanto concerne il bitume modificato si osserva un valore comune pari a 79 MJ, sottolineando che risulta essere decisamente meno impattante rispetto alla produzione del conglomerato bituminoso.

Anche per quanto riguarda il GWP, si osserva una produzione di CO_{2,eq} per unità di volume di miscela TAL QUALE inferiore rispetto alle emissioni stimate per la produzione della miscela innovativa. L'intervallo di variazione del GWP delineato per il conglomerato innovativo è caratterizzato da valori di estremo pari a 84 kg – 91 kg, mentre si è stimata un'emissione di 75 kg di CO_{2,eq} per il conglomerato bituminoso di riferimento. Relativamente al contributo delle singole voci, valgono le medesime considerazioni eseguite per il GER.

In ultimo, si osservano delle leggere differenze tra le voci comuni delle due miscele analizzate: produzione degli aggregati, produzione del bitume base e produzione del conglomerato bituminoso. Esse sono dovute alla diversità delle miscele, in termini di caratteristiche volumetriche, come evidenziato in (Tabella 4.9 – Capitolo 4).

Per ottenere un quadro completo, si riportano in Figura 5.12 gli stessi grafici appena analizzati includendo, questa volta, anche la componente di trasporto.

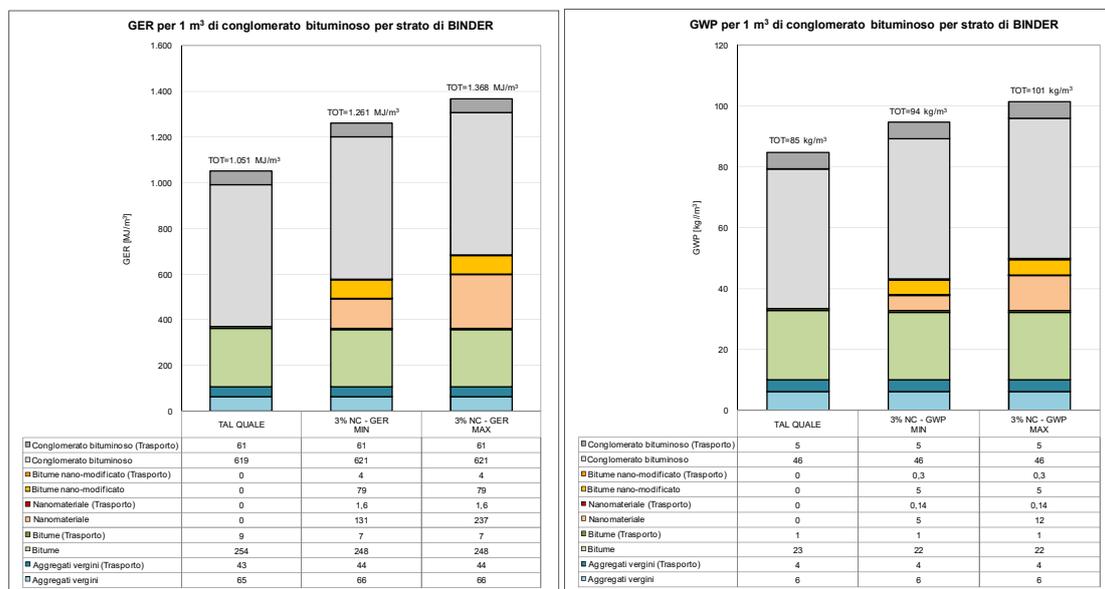


Figura 5.12: confronto di GER e GWP per la produzione e il trasporto dei materiali per 1 m³ di miscela

Osservando i grafici in Figura 5.12, si può notare che sia per il consumo energetico che per le emissioni, il contributo dovuto al trasporto è risultato consistente principalmente per gli aggregati ed il conglomerato bituminoso. Per quanto riguarda il trasporto dei nanomateriali, esso è risultato essere molto ridotto: rispetto all’impatto totale legato alla produzione ed al trasporto delle nanoargille, l’incidenza legata al trasporto è dell’ordine dell’1% per il GER e del 2-3% per il GWP. Questo risultato rende più solida l’analisi eseguita perché significa che i risultati sono debolmente dipendenti dall’assunzione eseguita per la distanza di trasporto relativa ai nano-additivi.

In conclusione, anche considerando la componente di trasporto nell’analisi, si osserva il medesimo risultato espresso in precedenza: il GER e il GWP valutati per unità di volume di conglomerato bituminoso risultano inferiori per la miscela TAL QUALE rispetto all’intervallo delineato per la miscela innovativa.

5.4.1.2. Confronto tra scenario S-TAL QUALE e S-CNTs

Analogamente a quanto fatto in precedenza, si procede ora con il confronto degli oneri ambientali causati dalla produzione dell’unità di volume delle miscele per strato di collegamento, negli scenari S-TAL QUALE e S-CNTs.

Si riporta in Figura 5.13 il confronto grafico tra: i valori di GER e GWP ottenuti per lo scenario di riferimento e gli intervalli relativi ai medesimi impatti, ottenuti per lo scenario S-CNTs.

In questa prima comparazione si è omesso il contributo legato al trasporto dei materiali.

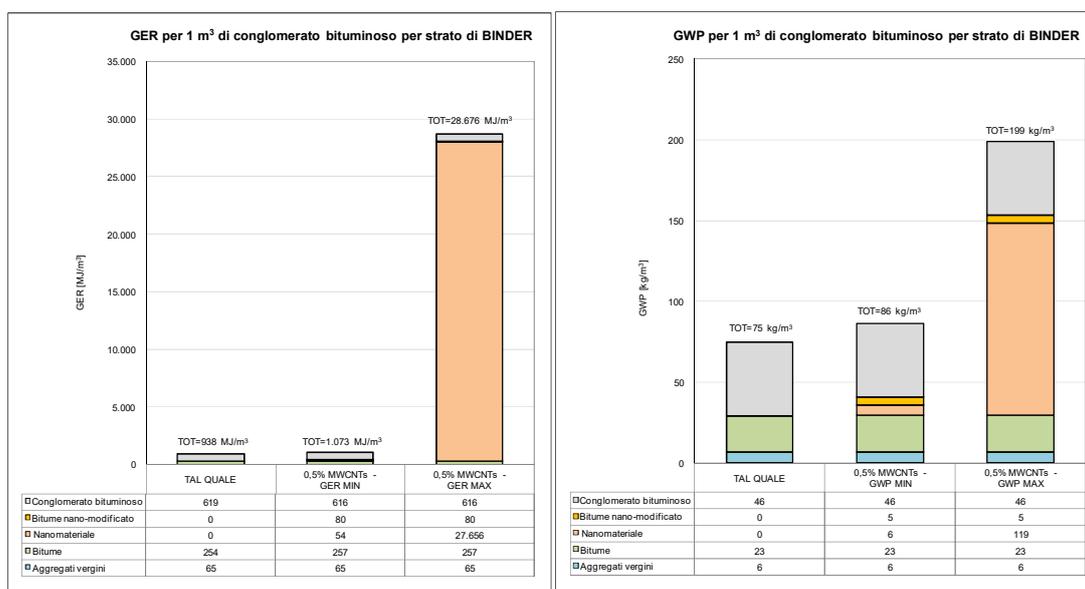


Figura 5.13: confronto di GER e GWP relativi alla produzione dei materiali per 1 m³ di conglomerato bituminoso

Per maggiore chiarezza si riportano i risultati energetici in Tabella 5.34 perché in questo caso risulta difficile rappresentare in modo chiaro ed esaustivo gli estremi dell'intervallo stimati per la miscela CNTs, a causa della differenza di ordine di grandezza che essi presentano.

Tabella 5.34: confronto del GER stimato per S-TQ e S-CNTs: produzione dei materiali per 1 m³ di miscela

Materiale	S-TQ - GER [MJ]	S-CNTs - GER _{MIN} [MJ]	S-CNTs - GER _{MAX} [MJ]
Aggregati vergini	65	65	65
Bitume	254	257	257
Nanomateriale (MWCNTs)	-	54	27.656
Bitume nano-modificato	-	80	80
Conglomerato bituminoso	619	616	616
Totale	938	1.073	28.676

Da Figura 5.13 e da Tabella 5.34 si può osservare che anche in questo caso, l'unità di volume del conglomerato bituminoso TAL QUALE risulta più prestante rispetto alla miscela modificata con MWCNTs.

Ancora, il materiale innovativo in analisi è caratterizzato da una "forbice" di impatto molto ampia, in particolare dal punto di vista energetico, all'interno della quale ricadono tutte le tecniche di produzione CVD (*fixed bed, floating catalyst e fluidized bed CVD*) dei nanotubi di carbonio *multi-wall*, analizzate al Capitolo 2.

Si può inoltre osservare che le differenze in termini di impatto sono generate principalmente dalla produzione del nanomateriale e del bitume modificato, anche in questo caso.

Considerando ora anche la componente di trasporto nell'analisi, si ottengono i risultati riportati in Figura 5.14 e Tabella 5.35.

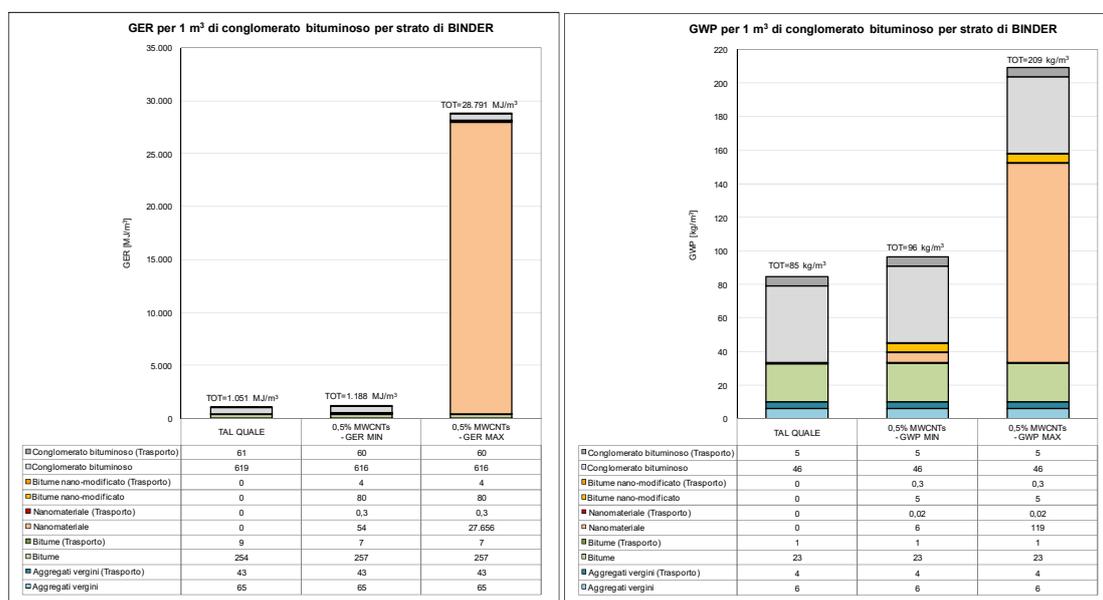


Figura 5.14: confronto di GER e GWP per la produzione e il trasporto dei materiali per 1 m³ di miscela

Tabella 5.35: confronto del GER stimato per gli scenari S-TQ e S-CNTs: trasporto dei materiali per 1 m³ di miscela

Materiale	S-TQ - GER [MJ]	S-CNTs - GER _{MIN} [MJ]	S-CNTs - GER _{MAX} [MJ]
Aggregati vergini (Trasporto)	43	43	43
Bitume (Trasporto)	9	7	7
Nanomateriale (Trasporto)	-	0,3	0,3
Bitume nano-modificato (Trasporto)	-	4	4
Conglomerato bituminoso (Trasporto)	61	60	60
Total	113	115	115

In conclusione, in questa prima parte di analisi in cui si sono valutati gli impatti per unità di volume dei conglomerati bituminosi innovativi e confrontati con la miscela di riferimento, si nota che il carico ambientale è principalmente legato alla produzione delle materie prime e che il conglomerato bituminoso tradizionale risulta essere più vantaggioso rispetto agli altri materiali indagati.

5.4.2. Analisi comparativa: parte 2

La seconda parte dell'analisi si focalizza sul confronto dei risultati ambientali relativi ai tre scenari, valutati secondo l'approccio *cradle-to-laid*.

Lo studio comparativo è stato condotto confrontando i due scenari innovativi con quello di riferimento, in modo separato.

L'elemento aggiuntivo di questa fase di analisi, rispetto alla precedente, è che in questo caso si considererà anche il beneficio strutturale (in termini di spessore) ottenuto grazie alle migliori prestazioni dei conglomerati bituminosi nano-rinforzati. Al fine di una maggiore chiarezza di esposizione, si richiamano in Tabella 5.36 gli spessori dei diversi strati della pavimentazione nelle tre configurazioni in esame.

Tabella 5.36: spessori risultanti dalla progettazione della pavimentazione, nei tre scenari

Scenario	Usura	Collegamento	Base	Fondazione	S _{PL}
S-TAL QUALE	5 cm	6 cm	22 cm	15 cm	33 cm
S-NC	6 cm	5 cm	12 cm	15 cm	23 cm
S-CNTs	6 cm	5 cm	18 cm	15 cm	29 cm

5.4.2.1. Confronto tra scenario S-TAL QUALE e S-NC

In questo primo confronto, si intende porre l'attenzione principalmente sui consumi energetici e le emissioni valutate per la produzione delle materie prime e la costruzione della sovrastruttura autostradale negli scenari S-TAL QUALE e S-NC.

Per quanto riguarda il GER, si riportano due grafici in Figura 5.15: il grafico sulla sinistra rappresenta il consumo energetico totale definito per la fase di "Initial construction" della pavimentazione progettata, mentre quello disposto sulla destra definisce il contributo all'impatto totale, in termini assoluti, apportato dalle unità di processo considerate: la produzione dei materiali, il trasporto e la realizzazione della pavimentazione.

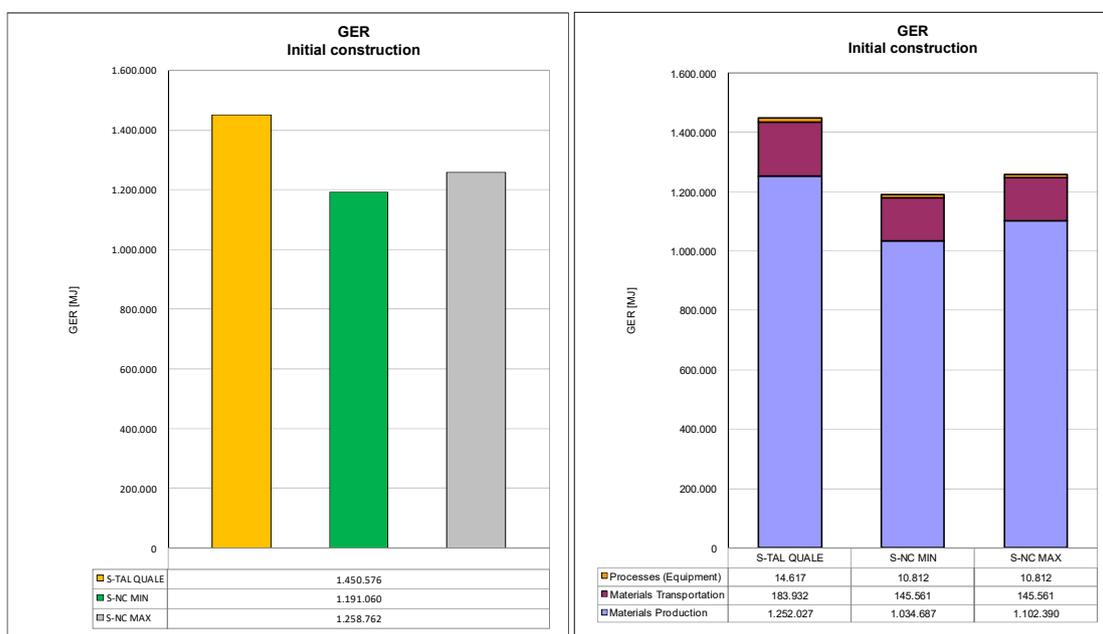


Figura 5.15: confronto tra i consumi energetici: S-TQ e S-NC

Osservando il grafico sulla sinistra di Figura 5.15, si può notare innanzitutto che, grazie alle migliori caratteristiche meccaniche della miscela modificata, la riduzione degli spessori della pavimentazione innovativa ha condotto ad un intervallo di valori del GER che si pone al di sotto dello scenario di riferimento. Il consumo energetico relativo alla sovrastruttura nello

scenario S-TAL QUALE risulta pari 1.450.576 MJ, mentre l'analisi implementata per lo scenario S-NC ha condotto ad una "forbice" di riferimento pari a 1.191.050 MJ – 1.258.762 MJ.

Come già osservato in precedenza, la fase di produzione dei materiali risulta la più impattante sotto il profilo energetico, in ambo gli scenari. Inoltre, considerando anche l'analisi ambientale eseguita sull'unità di volume delle diverse miscele, si può dedurre che le migliori prestazioni strutturali della miscela innovativa conducano ad un abbattimento della quantità di materiale necessaria per la realizzazione della pavimentazione e di conseguenza risulta in un GER inferiore. La minore richiesta di materiale ha comportato anche un decremento dei consumi, in valore assoluto, nelle fasi di trasporto e realizzazione rispetto allo scenario di riferimento.

Dal punto di vista energetico dunque, la pavimentazione realizzata con conglomerato bituminoso modificato con nanoargille, come indicato nella configurazione di progetto, risulta essere più vantaggiosa rispetto all'impiego di miscele tradizionali.

Estendendo l'analisi anche alle emissioni di anidride carbonica durante il ciclo di vita della pavimentazione, si riportano in Figura 5.16 due grafici rappresentanti l'impatto aggregato ed i contributi apportati dalle singole unità di processo.

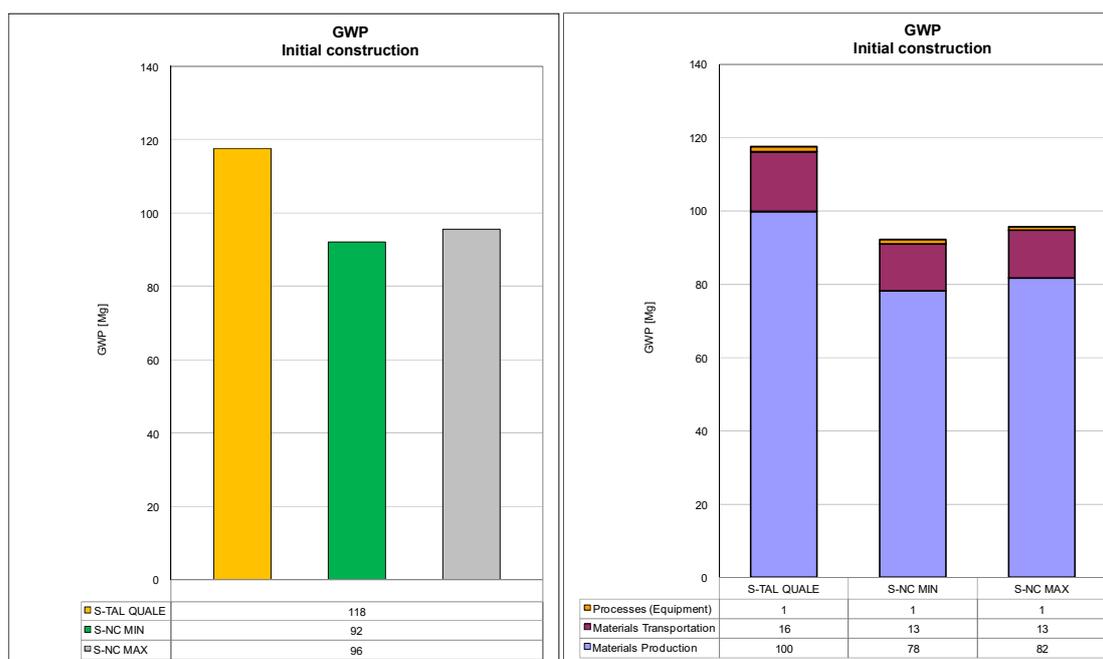


Figura 5.16: confronto tra le emissioni di $\text{CO}_{2,\text{eq}}$: S-TQ e S-NC

Si può notare da Figura 5.16 come l'impatto totale e la suddivisione delle quote di inquinante emesse dalle singole unità di processo sia del tutto analoga a quanto ottenuto per il GER. Il GWP relativo alla sovrastruttura nello scenario S-TAL QUALE risulta pari 118 Mg, mentre l'analisi implementata per lo scenario S-NC ha condotto ad un intervallo di riferimento di estremi 92 Mg e 96 Mg, rendendo la pavimentazione nano-rinforzata più prestante dal punto di vista ambientale.

Lo studio può essere approfondito anche nella direzione di altri inquinanti (Tabella 5.37), grazie alla completezza dell'inventario relativo alla produzione delle nanoargille reperito

nell'articolo di (Satish, 2008). In particolare, le emissioni che si possono analizzare sono: NO_x, PM10, SO₂ e CO.

Tabella 5.37: confronto tra le emissioni di NO_x, PM10, SO₂ e CO: S-TQ e S-NC

Scenario	NO _x [kg]	PM10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]
S-TAL QUALE	1.613	264	396	827
S-NC	1.262	208	313	602

La comparazione riportata in forma tabellare, permette di apprezzare come anche nel caso delle emissioni di NO_x e PM10, in cui la fase più incidente corrisponde al trasporto dei materiali, lo scenario S-NC risulta più conveniente.

Non è stato possibile estendere la valutazione ad altre categorie di impatto o definire un intervallo di variazione dei valori riportati in Tabella 5.37 a causa della mancanza di dati disponibili in letteratura in merito alle emissioni generate dalla produzione di OMMT.

In conclusione, lo scenario innovativo che prevede l'impiego di conglomerato bituminoso modificato con nanoargille per gli strati di collegamento e base, risulta essere più prestante dal punto di vista ambientale rispetto allo scenario di riferimento, nonostante gli esiti negativi derivanti dell'analisi ambientale dell'unità di volume delle miscele bituminose in esame. Risulta necessario sottolineare che la maggiore eco-compatibilità della sovrastruttura nano-rinforzata scaturisce interamente dalle prestazioni strutturali superiori che il materiale stradale innovativo è in grado di garantire.

5.4.2.2. Confronto tra scenario S-TAL QUALE e S-CNTs

L'ultima valutazione da effettuare corrisponde alla comparazione, in termini di GER e di GWP, tra lo scenario di riferimento e lo scenario S-CNTs.

Il confronto grafico riportato in Figura 5.17 rappresenta i consumi energetici relativi alla produzione dei materiali, trasporto e costruzione dell'infrastruttura nei due scenari.

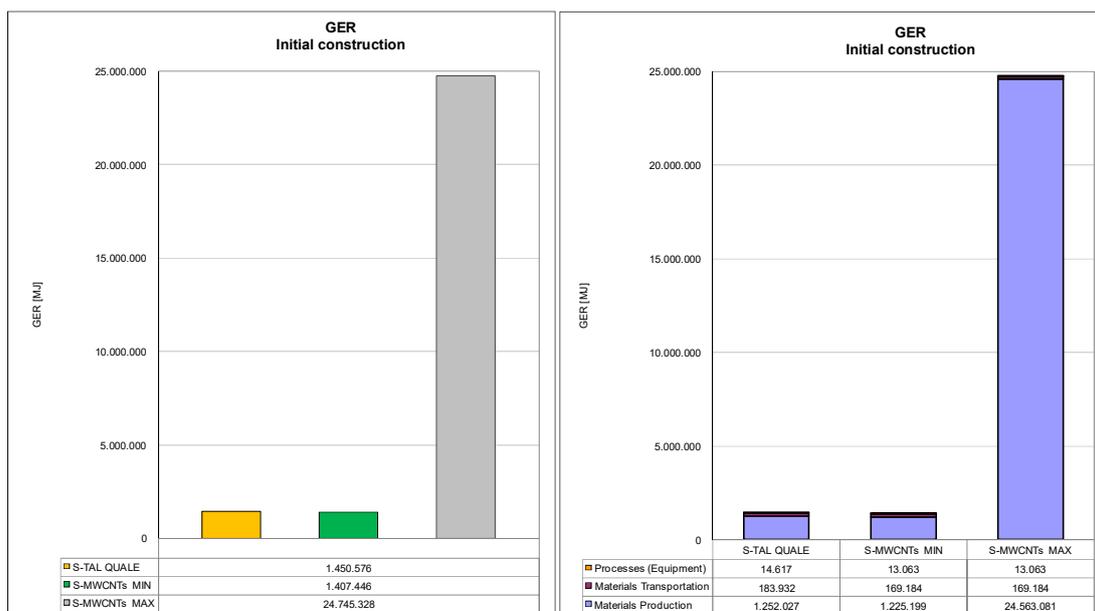


Figura 5.17 confronto tra i consumi energetici: S-TQ e S-CNTs

Esaminando Figura 5.17 e concentrandosi sui valori di GER aggregati, si può notare che lo scenario S-TAL QUALE risulta essere caratterizzato da un valore (1.450.576 MJ) leggermente più elevato dell'estremo inferiore dell'intervallo stimato per lo scenario S-CNTs (1.407.446 MJ). Tuttavia, l'estremo superiore risulta essere di un ordine di grandezza superiore rispetto agli altri due valori. L'entità così elevata del consumo energetico deriva interamente dalla produzione dei materiali, nello specifico dei nanotubi di carbonio. In questo scenario, la quasi totalità del GER è legata unicamente alla produzione dei MWCNTs.

L'intervallo di variazione di questo indicatore ambientale risulta decisamente ampio, partendo da un livello energetico che comunque si attesta circa in corrispondenza dello scenario di riferimento. Ancora, il valore di consumo energetico reperito nello studio di (Roes, et al., 2010) corrisponde al minimo reperito in letteratura. Sono state condotte delle analisi LCIA di prova, considerando i consumi relativi ad una serie di tecniche CVD reperite in letteratura, ottenendo un impatto energetico costantemente maggiore rispetto ai 1.450.576 MJ relativi allo scenario di riferimento.

Focalizzandosi ora sulle emissioni di $CO_{2,eq}$, si riporta il confronto grafico dei due scenari in esame in Figura 5.18.

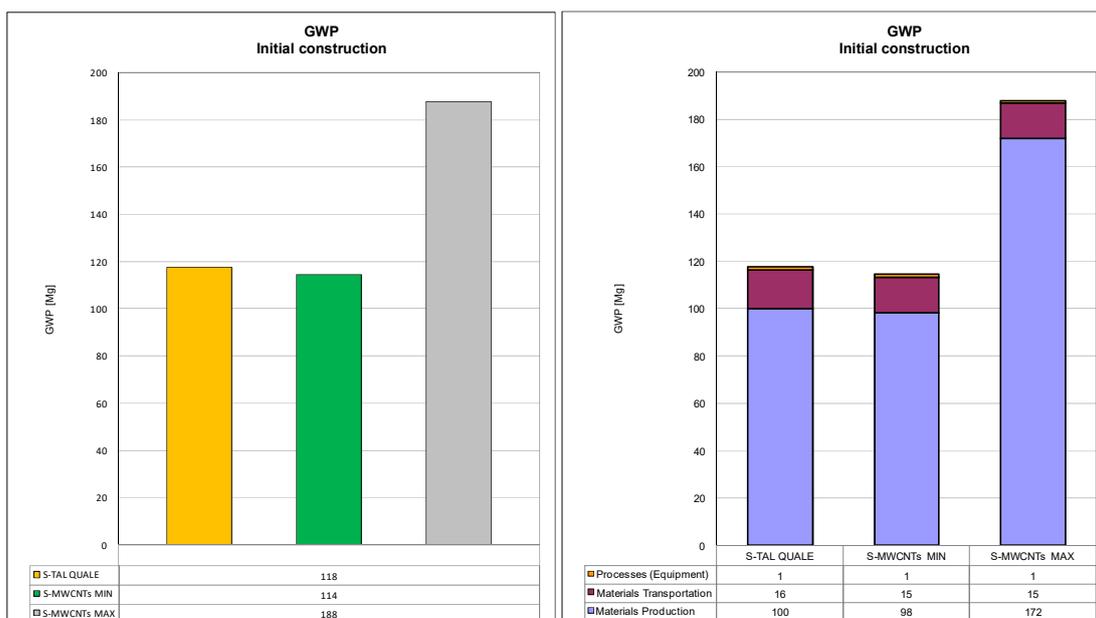


Figura 5.18: confronto tra i valori di GWP relativi agli scenari S-TQ e S-CNTs

Per la pavimentazione realizzata con conglomerato bituminoso modificato con nanotubi di carbonio si sono riscontrati dei valori di GWP variabili tra 114 Mg e 188 Mg. Anche nell'ambito di questo indicatore ambientale, l'impatto fornito dallo scenario di riferimento risulta collocarsi nella parte più vicina all'estremo inferiore dell'intervallo definito per lo scenario innovativo.

Risulta necessario specificare che i valori minimi dei consumi e delle emissioni relative allo scenario S-CNTs sono stati calcolati con riferimento allo studio di (Roes, et al., 2010), in cui è stata eseguita una quantificazione degli impatti relativi ai MWCNTs in modo empirico, assumendo che essi fossero pari a circa il 10% dei costi ambientali legati alla produzione di SWCNTs.

In ultimo, al fine di fornire un quadro il più completo possibile, è stato stimato il consumo idrico per la pavimentazione innovativa, grazie agli inventari forniti da (Griffiths, et al., 2013) e (Trompeta, et al., 2016). L'intervallo del consumo idrico relativo allo scenario S-CNTs, è caratterizzato dai valori di estremo pari a 6.301 ton – 11.178 ton. Il consumo di acqua previsto nello scenario di riferimento risulta invece 6.003 ton.

Non è stato possibile estendere la valutazione ad altre categorie di impatto a causa della mancanza di dati disponibili in letteratura in merito alle emissioni generate per la produzione di MWCNTs.

In conclusione, lo scenario innovativo che prevede l'impiego di conglomerato bituminoso modificato con nanotubi di carbonio *multi-wall* per gli strati di collegamento e base, risulta essere generalmente più impattante rispetto allo scenario di riferimento. Tuttavia, si deve specificare che, considerando la condizione più favorevole in cui l'onere legato alla produzione dei CNTs è minimo, gli esiti dell'analisi LCA conducono a delle prestazioni ambientali simili, leggermente a favore dello scenario innovativo in esame.

CONCLUSIONI

La ricerca di materiali stradali sempre più performanti deve rispondere contemporaneamente all'esigenza di far fronte alla crescente domanda di trasporto ed alla necessità di incanalare lo sviluppo del settore delle infrastrutture viarie nella direzione della sostenibilità ambientale. Numerosi studi sperimentali si sono focalizzati sull'indagine di miscele innovative per gli strati legati della sovrastruttura stradale, con il fine di incrementarne le prestazioni nei confronti dei principali fenomeni di ammaloramento.

In particolare, sono stati largamente indagati i conglomerati bituminosi nano-rinforzati. La sperimentazione ha condotto a risultati promettenti, per quanto riguarda l'incremento delle prestazioni strutturali, identificando i nanotubi di carbonio e le nanoargille come i nano-additivi più performanti. Tuttavia, sebbene tali materiali si sono distinti dal punto di vista meccanico, il loro profilo ambientale risulta ancora incognito.

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sull'utilizzo di questi nuovi materiali stradali, valutandone l'impiego su scala reale, sia dal punto di vista strutturale che dal punto di vista ambientale.

La caratterizzazione meccanica delle miscele innovative, analizzate nel presente studio, è stata eseguita in due precedenti lavori di ricerca condotti al Politecnico di Torino, esaminando le proprietà reologiche e volumetriche e definendo il comportamento a fatica di miscele bituminose modificate con nanoargille e nanotubi di carbonio.

Al fine di definire le prestazioni ambientali dei conglomerati nano-rinforzati, è stata eseguita un'estesa ricerca bibliografica nella letteratura tecnica per delineare l'eco-profilo dei nanomateriali impiegati. Dall'analisi relativa alle prestazioni ambientali di nanotubi di carbonio e nanoargille è emerso che:

- per quanto concerne i nanotubi di carbonio, la produzione di *multi-wall* risulta mediamente meno onerosa, dal punto di vista ambientale, rispetto ai *single-wall*. Ancora, le tecniche di produzione CVD risultano essere le più economiche in ottica energetica, ambientale e produttiva e quelle largamente più utilizzate per la produzione dei MWCNTs;
- le nanoargille risultano essere molto meno impattanti rispetto ai nanotubi di carbonio. La differenza tra i due nano-additivi risiede nei costi ambientali legati al processo produttivo: mentre la sintesi dei nanotubi di carbonio è un processo "*energy-intensive*" caratterizzato da temperature elevate, la produzione delle nanoargille è caratterizzata da un fabbisogno energetico nettamente inferiore legato principalmente alla fase di lavorazione e modifica organica della materia prima.

Entrando nel merito dell'analisi delle prestazioni strutturali dei diversi conglomerati, lo studio sperimentale è stato basato sul calcolo degli spessori della pavimentazione autostradale, esaminando tre scenari differenti: uno scenario di riferimento in cui si è previsto l'impiego di conglomerato bituminoso tradizionale e due scenari innovativi in cui si considerano due miscele bituminose per strato di collegamento e base, il cui legante è additivato con nanotubi di carbonio e nanoargille. Ognuno degli scenari è stato definito mediante una configurazione strutturale formata dallo strato di usura, collegamento, base e fondazione in misto granulare. Indipendentemente dallo scenario, lo strato di usura è formato da conglomerato bituminoso tradizionale e la fondazione è costituita da uno strato in misto granulare di spessore uguale per le tre soluzioni analizzate.

I risultati ottenuti dal processo di progettazione hanno evidenziato che, a parità di condizioni climatiche e di volume di traffico:

- la pavimentazione autostradale realizzata con conglomerato bituminoso modificato con nanorgille ha permesso di ottenere uno spessore del pacchetto legato inferiore rispetto a tutti gli altri scenari;
- la modifica delle miscele bituminose attraverso nanotubi di carbonio ha condotto ad una riduzione degli spessori degli strati legati rispetto allo scenario di riferimento. Tuttavia, occorre precisare che tale riduzione degli spessori di progetto è risultata meno marcata se confrontata con la pavimentazione realizzata con miscele modificate con nanorgille;
- l'impiego dei conglomerati nano-rinforzati si è tradotto in un incremento importante delle prestazioni strutturali della pavimentazione stradale, nei confronti del degrado per fatica e per ormaimento, rispetto allo scenario di riferimento. I risultati ottenuti dalla progettazione della sovrastruttura confermano dunque quanto appreso in letteratura.

Dal punto di vista ambientale, lo studio della sostenibilità delle miscele innovative è stato condotto per mezzo della Valutazione del Ciclo di Vita, metodologia anche nota con l'acronimo LCA (*Life Cycle Assessment*). L'effetto dei nano-additivi è stato valutato sia a parità di volume di conglomerato bituminoso, mediante un approccio *cradle-to-gate*, che in riferimento ad una corsia di autostrada di lunghezza pari ad 1 km, secondo un approccio *cradle-to-laid*, ossia dall'estrazione delle materie prime fino alla costruzione della sovrastruttura. Gli impatti ambientali sono stati valutati attraverso l'applicativo PaLATE 2.0.

Lo studio ambientale delle miscele innovative ha tenuto conto dell'impatto aggiuntivo legato alla produzione dei nanomateriali e di quello dovuto alla produzione del bitume modificato, attraverso la modellazione del processo di sonicazione scalato a livello industriale.

I principali indicatori impiegati per la valutazione delle prestazioni della pavimentazione sono il *Gross Energy Requirement* (GER) e il *Global Warming Potential* (GWP).

Sulla base dei dati ambientali ottenuti dall'applicativo è emerso che:

- l'analisi *cradle-to-gate* ha evidenziato che il processo di produzione dei nano-additivi ed il processo di miscelazione ad ultrasuoni del bitume modificato comportano un incremento delle emissioni e dei consumi energetici dei conglomerati bituminosi nano-rinforzati, risultando così più impattanti dal punto di vista ambientale rispetto alla miscela di riferimento;
- sebbene i consumi e le emissioni legate alla produzione di 1 m³ di miscela modificata con nanoargille sono risultati superiori rispetto a quella tradizionale, la riduzione degli spessori della pavimentazione autostradale nello scenario innovativo ha comunque condotto ad un'infrastruttura più performante dal punto di vista ambientale. Si nota, quindi, che il vantaggio strutturale derivante dalle migliori prestazioni della miscela innovativa ha bilanciato il maggior impatto legato alla produzione di quest'ultima, permettendo di ottenere un'infrastruttura più eco-compatibile;
- la nano-modifica mediante nanotubi di carbonio comporta, generalmente, degli oneri ambientali maggiori rispetto allo scenario di riferimento, nonostante il calcolo strutturale abbia condotto alla riduzione dello spessore del pacchetto legato della sovrastruttura;

- la differenza in termini di impatto tra gli scenari innovativi risulta dai diversi costi ambientali riscontrati per la produzione dei due nanomateriali considerati nell'analisi sperimentale.

Sulla base di quanto appreso nel presente lavoro di tesi, si può affermare che le pavimentazioni realizzate con conglomerati bituminosi modificati con nanoargille risultano promettenti sotto il profilo strutturale ed ambientale. Tuttavia, si ritiene che i risultati ottenuti nel presente studio debbano necessariamente essere convalidati da future ricerche. In conclusione, anche se i risultati dell'analisi risultano incoraggianti, il lavoro presentato in questa tesi deve essere considerato come un punto di partenza per ulteriori sviluppi.

Si propongono dei suggerimenti per un eventuale approfondimento futuro.

- Gli indicatori di impatto dovrebbero essere opportunamente estesi prendendo in considerazione gli effetti sulla salute umana.
- La modellazione dell'impianto industriale per la sonicazione del bitume modificato necessita un approfondimento al fine di ottenere una stima più raffinata dei consumi e degli impatti relativi a tale procedura di miscelazione.
- La caratterizzazione delle prestazioni ambientali delle pavimentazioni nano-rinforzate analizzate necessitano di ulteriori studi LCA, secondo un approccio *cradle-to-grave*, includendo dunque anche gli oneri legati alla manutenzione ed allo smaltimento finale della sovrastruttura.
- E' consigliabile estendere l'analisi LCA considerando uno scenario, in cui si prevede l'impiego di conglomerati bituminosi con additivi di tipo polimerico, che non necessiterebbe di un'alterazione dei tradizionali impianti di miscelazione dei leganti modificati.

ALLEGATO A

Nel presente allegato si propone un approfondimento relativo alla ricerca bibliografica condotta sulle prestazioni ambientali dei nanotubi di carbonio.

Si riporta in Tabella A.1 il confronto, in termini di impatto ambientale, tra le diverse tecniche reperite in letteratura tecnica per la produzione di nanotubi di carbonio *multi-wall*.

Analogamente, si riporta in Tabella A.2 il confronto, in termini di impatto ambientale, tra le diverse tecniche reperite in letteratura tecnica per la produzione di nanotubi di carbonio *single-wall*.

Tabella A.1: confronto degli impatti causati da nanotubi a parete multipla prodotti con diverse tecniche

ReCiPe	TRACI 2.1+USEtox	U.M.	Trompeta et al. (2016)		Wu et al. (2020)	Kushnir et al. (2008)				Griffiths et al. (2013)	Roes et al. (2010)	
			Canfora (CVD)	Acetilene (Fixed bed CVD)	Benzene (Floating catalyst CVD)	Benzene (Floating catalyst CVD)	Grafite (Electric arc)	Grafite (Laser ablation)	Grafite (Solar furnace)	Toluene (Floating catalyst CVD)	Metano (fluidized bed CVD)	
Global warming	Global warming	kg CO _{2,eq} /kg	6,53E+02	2,11E+02	1,36E+02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ozone depletion	Ozone depletion	CFC-11 _{eq} /kg	1,08E-04	4,30E-05	5,08E-06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,42E-05	n.d.
Terrestrial acidification	Acidification	kg SO _{2,eq} /kg	3,62E+00	1,36E+00	9,74E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,09E+00	n.d.
Freshwater eutrophication	-	kg P _{eq} /kg	1,07E-02	2,30E-03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,91E-01	n.d.
Marine eutrophication	Eutrophication	kg N _{eq} /kg	2,68E-01	1,80E-02	2,11E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,75E-01	n.d.
Photochemical oxidant formation	-	kg NMVOC _{eq} /kg	1,53E+00	6,20E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,62E-01	n.d.
-	Smog formation	kg O _{3,eq} /kg	n.d.	n.d.	7,28E+00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Particulate Matter Formation	-	kg PM10 _{eq} /kg	1,15E+00	4,10E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,34E-01	n.d.
-	Particulate Matter Formation	kg PM2.5 _{eq} /kg	n.d.	n.d.	7,74E-02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ionising radiation	-	kg U-235 _{eq} /kg	1,28E+02	5,38E+01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,93E+01	n.d.
Agricultural Land Occupation	-	m ² a/kg	3,66E+01	3,00E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,13E+00	n.d.
Urban Land Occupation	-	m ² a/kg	8,80E-01	2,40E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,18E+00	n.d.
Natural Land transformation	-	m ²	5,80E-01	1,00E-03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,88E-02	n.d.
Water depletion	-	m ³ /kg	4,80E+00	1,19E+01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,68E+00	n.d.
Metal depletion	-	kg Fe _{eq} /kg	7,82E+00	3,50E-01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,48E-02	n.d.
Fossil depletion	-	kg Oil _{eq} /kg	1,32E+02	4,87E+01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,28E+01	n.d.
-	Fossil depletion	KJ surplus/kg	n.d.	n.d.	2,47E+02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fresh water ecotoxicity	-	kg 1,4DB _{eq} /kg	7,70E-01	6,00E-02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,33E+00	n.d.
Marine ecotoxicity	-	kg 1,4DB _{eq} /kg	2,60E-01	4,00E-02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,55E+00	n.d.
Terrestrial ecotoxicity	-	kg 1,4DB _{eq} /kg	3,39E+00	6,00E-03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,72E-02	n.d.
Human toxicity	-	kg 1,4DB _{eq} /kg	2,34E+01	6,52E+00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,60E+02	n.d.
-	Human Health - Carcinogenic	CTUh/kg	n.d.	n.d.	2,30E-06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
-	Human Health - Non - Carcinogenic	CTUh/kg	n.d.	n.d.	9,85E-06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
-	Ecotoxicity	CTUe/kg	n.d.	n.d.	5,12E+02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CED	CED	MJ/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,63E+05	n.d.
Thermal Energy	Thermal Energy	MJ/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,95E+02	3,00E+02	2,11E+02	3,00E+02	n.d.	3,28E+01
Electricity	Electricity	MJ/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,87E+02	2,18E+03	9,42E+03	1,42E+02	n.d.	6,26E+01
Energy	Energy	MJ/kg	2,48E+03	1,10E+03	4,82E+02	4,82E+02	2,48E+03	9,64E+03	4,42E+02	4,90E+04	9,54E+01	n.d.
NREU	NREU	MJ/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,15E+02

Tabella A.2: confronto degli impatti ambientali causati da nanotubi a parete singola prodotti con diverse tecniche

TRACI 2.1+USEtox	TRACI 2002	U.M.	Kushnir et al. (2008)				Teah et al. (2020)								Roes et al. (2010)	Singh et al. (2008)		Gavankar et al. (2014)				
			Grafite (Electric arc)	Grafite (Laser ablation)	Metano (Fluidized bed CVD)	Monossido di carbonio (HIPCO)	Acetilene/etilene (Fixed bed CVD)				Acetilene (Fluidized bed CVD)				Metano (fluidized bed CVD)	Monossido di carbonio (HIPCO)	Monossido di carbonio (CoMoCAT)	Monossido di carbonio (CoMoCAT)				
							H20_1	C02_1	H20_18	C02_18 (a)	C02_18 (b)	sputter	Ar_1	Ar_20				Ar_inf	N2_20	Laboratorio	Industriale	
Global warming	Global warming	kg CO _{2,eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,53E+04	5,39E+04	1,58E+05	3,72E+04	2,86E+04	9,94E+03	2,59E+03	2,10E+03	2,08E+03	4,80E+02	1,10E+02	6,29E+03	5,82E+03	8,18E+05	8,83E+04	
Ozone depletion	Ozone depletion	CFC-11 _{eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,16E-01	6,78E-03	
-	Acidification	moli H ⁺ eq/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,57E+02	7,99E+01	2,07E+05	2,22E+04	
Eutrophication	Eutrophication	kg N _{eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,02E-01	6,21E-02	3,56E+02	2,10E+01
-	Photochemical oxidation	kg NOx eq	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,52E+00	9,39E+00	1,48E+03	1,60E+02
-	HH criteria Air-Mobile	kg PM2.5 _{eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,21E-01	1,82E-01	n.d.	n.d.
-	HH criteria Air-Point source	kg PM2.5 _{eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,00E-01	1,70E-01	n.d.	n.d.
-	Water depletion	m ³ /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,83E+03	7,07E+02	
-	Treated waste water	m ³ /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	8,25E+01	8,25E+01	
-	Non-hazardous solid waste	m ³ /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,45E+02	4,45E+02	
-	Human Health - Carcinogenic	kg benzene eq/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,59E-02	6,44E-02	1,31E+03	1,33E+02
-	Human Health - Non - Carcinogenic	kg toluene eq/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5,83E+01	6,95E+01	n.d.	n.d.
-	Ecotoxicity	kg 2-AD _{eq} /kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,73E-02	1,37E-02	2,34E+05	3,75E+04
CED	CED	MJ/kg	n.d.	n.d.	2,26E-03	1,80E+04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,09E+05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,55E+03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,42E+05	3,10E+04
Thermal Energy	Thermal Energy	MJ/kg	3,00E+02	2,11E-02	3,28E+02	4,70E+01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,28E+02	3,80E+03	1,39E+03	7,80E+04
Electricity	Electricity	MJ/kg	2,18E+03	9,42E-03	6,26E+02	5,77E+03	1,25E+05	1,21E+05	4,39E+05	1,04E+05	7,96E+04	3,45E+04	1,29E+03	7,85E+02	7,49E+02	7,85E+02	n.d.	n.d.	6,26E+02	n.d.	n.d.	
NREU	NREU	MJ/kg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,15E+03	n.d.	n.d.	n.d.

ALLEGATO B

Nel presente allegato si intende esporre sinteticamente i modelli considerati, oltre a quello di Hirsch, nell'analisi comparativa per l'identificazione del modello analitico più adeguato alla stima del modulo dinamico dei conglomerati bituminosi studiati nel lavoro di tesi.

1. Modello di Francken & Verstraeten

Francken e Verstraeten (1975) hanno proposto una formulazione per predire il modulo dinamico dei conglomerati bituminosi $|E^*|$, sulla base delle caratteristiche volumetriche della miscela e delle caratteristiche reologiche del legante.

La forma finale del modello si presenta come segue.

$$|E^*|(T, \omega) = E_{\infty} \cdot R^*(T, \omega)$$

In cui:

- $|E^*|(T, \omega)$ rappresenta il modulo dinamico, funzione di temperatura e frequenza di carico [MPa];
- $R^*(T, \omega)$ rappresenta il modulo ridotto ed assume valori compresi tra 0 e 1;
- E_{∞} rappresenta il limite superiore del modulo [MPa].

La valutazione di E_{∞} viene effettuata mediante la seguente equazione

$$E_{\infty} = C \cdot \left(\frac{V_A}{V_L}\right)^{0,55} \cdot e^{-0,0584 \cdot v}$$

Dove:

- C è una costante empirica definita pari 14.360 MPa per conglomerati bituminosi con bitume puro;
- V_A è il volume occupato dall'aggregato [%];
- V_L è il volume occupato dal legante [%];
- v è il contenuto di vuoti della miscela [%].

Il modulo ridotto si calcola con la seguente formulazione empirica

$$\log(R^*) = \log(B^*) \cdot \left\{ 1 - 1,35 \left[1 - e^{\left(-0,13 \frac{V_A}{V_L}\right)} \right] \cdot [1 + 0,11 \cdot \log(B^*)] \right\}$$

In cui $B^*(T, \omega)$ corrisponde al modulo ridotto del bitume, che si definisce come

$$B^*(T, \omega) = \frac{G^*(T, \omega)}{G_\infty}$$

Dove $G^*(T, \omega)$ e G_∞ rappresentano rispettivamente il modulo complesso ed il *glassy modulus* del legante.

2. Modello di Bari & Witczak

La formulazione empirica proposta da Javed Bari nel 2005, corrisponde ad un'evoluzione del modello di Witczak (prima versione nel 1969) e permette di definire il modulo dinamico dei conglomerati bituminosi attraverso la seguente formulazione.

$$\log_{10}|E^*| = -0,349 + 0,754 \cdot (|G_b^*|^{-0,0052}) \cdot \left[6,65 - 0,032 \cdot \rho_{200} + 0,0027 \cdot \rho_{200}^2 + 0,011 \cdot \rho_4 - 0,0001 \cdot \rho_4^2 + 0,006 \cdot \rho_{38} - 0,00014 \cdot \rho_{38}^2 - 0,08 \cdot V_a - 1,06 \cdot \left(\frac{V_{\text{beff}}}{V_a + V_{\text{beff}}} \right) \right] + \frac{2,558 + 0,032 \cdot V_a + 0,713 \cdot \left(\frac{V_{\text{beff}}}{V_a + V_{\text{beff}}} \right) + 0,0124 \cdot \rho_{38} - 0,0001 \cdot \rho_{38}^2 - 0,0098 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5785 \cdot \log|G_b^*| + 0,8834 \cdot \log\delta_b)}}$$

In cui:

- $|E^*|$ corrisponde al modulo dinamico del conglomerato bituminoso [psi];
- $|G_b^*|$ corrisponde al modulo complesso del bitume [psi];
- V_{beff} corrisponde alla percentuale di legate rispetto al volume totale della miscela [%];
- V_a corrisponde al contenuto di vuoti della miscela [%];
- δ_b corrisponde all'angolo di fase associato a $|G_b^*|$ [°];
- ρ_{200} corrisponde alla percentuale di aggregato passante al setaccio nr. 200 (apertura di 0,075 mm) [%];
- ρ_4 corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio nr. 4 (apertura di 4,75 mm) [%];
- ρ_{38} corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio di 3/8 di pollice (apertura di 9,5 mm) [%];
- ρ_{34} corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio di 3/4 di pollice (apertura di 19 mm) [%].

Per maggiori dettagli sullo sviluppo e sulle caratteristiche del modello empirico e sul database di riferimento utilizzato per la calibrazione si rimanda alla dissertazione di dottorato di (Bari, 2005).

3. Modello NCHRP1-40D

Il modello di Bari & Witzak è stato successivamente sviluppato da un ente di ricerca statunitense: la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). La nuova formulazione, pubblicata nel 2007 con il nome di NCHRP1-40D, viene riportata in seguito.

$$\log_{10}|E^*| = 0,02 + 0,758 \cdot (|G_b^*|^{-0,0009}) \cdot \left[6,8232 - 0,03274 \cdot \rho_{200} + 0,00431 \cdot \rho_{200}^2 + 0,0104 \cdot \rho_4 - 0,00012 \cdot \rho_4^2 + 0,00678 \cdot \rho_{38} - 0,00016 \cdot \rho_{38}^2 - 0,0796 \cdot V_a - 1,1689 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right] + \frac{1,437 + 0,03313 \cdot V_a + 0,6926 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0,00891 \cdot \rho_{38} - 0,00007 \cdot \rho_{38}^2 - 0,0081 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-4,5868 - ,8176 \cdot \log|G_b^*| + 3,2738 \cdot \log \delta_b)}}$$

In cui:

- $|E^*|$ corrisponde al modulo dinamico del conglomerato bituminoso [psi];
- $|G_b^*|$ corrisponde al modulo complesso del bitume [psi];
- V_{beff} corrisponde alla percentuale di legate rispetto al volume totale della miscela [%];
- V_a corrisponde al contenuto di vuoti della miscela [%];
- δ_b corrisponde all'angolo di fase associato a $|G_b^*|$ [°];
- ρ_{200} corrisponde alla percentuale di aggregato passante al setaccio nr. 200 (apertura di 0,075 mm) [%];
- ρ_4 corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio nr. 4 (apertura di 4,75 mm) [%];
- ρ_{38} corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio di 3/8 di pollice (apertura di 9,5 mm) [%];
- ρ_{34} corrisponde alla percentuale di trattenuto al setaccio di 3/4 di pollice (apertura di 19 mm) [%].

Per maggiori dettagli sul modello empirico si rimanda alla pubblicazione dell'ente di ricerca (Witzak, et al., 2007).

4. Modello di (Al-Katheeb, et al., 2006)

La formulazione proposta dal gruppo di ricerca di (Al-Katheeb, et al., 2006) per la stima del modulo dinamico delle miscele bituminose è definita secondo la seguente equazione.

$$|E^*| = 3 \cdot |G_g^*| \cdot \left(\frac{100 - VMA}{100} \right) \cdot \left[\frac{\left(90 + 10.000 \cdot \frac{|G_b^*|}{VMA} \right)^{0,66}}{1.100 + \left(900 \cdot \frac{|G_b^*|}{VMA} \right)^{0,66}} \right]$$

Dove:

- $|E^*|$ rappresenta il modulo dinamico del conglomerato bituminoso [psi];
- $|G_b^*|$ rappresenta il modulo complesso del bitume [psi];
- $|G_g^*|$ corrisponde al *glassy modulus* del bitume [psi].

Per maggiori dettagli sullo sviluppo e sulle caratteristiche del modello e sul database di riferimento su cui si è basata la calibrazione si rimanda all'elaborato di (Al-Katheeb, et al., 2006).

ALLEGATO C

Nel presente allegato si riporta la procedura di calcolo adottata per la determinazione del *Total Truck Factor* (TTF) impiegato nel primo approccio per la modellazione del traffico in fase di progetto della pavimentazione autostradale.

La metodologia di calcolo si è basata sulla conversione del traffico di progetto in assi di riferimento equivalenti. Il numero di applicazioni di ogni asse elementare è stato convertito in passaggi equivalenti dell'asse di riferimento mediante il fattore moltiplicati FEA, definito dall'equazione

$$FEA = K \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^\alpha$$

In cui:

- FEA corrisponde al fattore di equivalenza tra asse elementare generico e asse di riferimento;
- K corrisponde ad un coefficiente che dipende dalla tipologia di gruppo di asse a cui appartiene l'asse elementare (singolo, tandem o tridem per cui si sono assunti valori rispettivamente pari a 1, 0,7 e 0,55);
- P corrisponde al carico gravante sull'asse elementare generico [kN];
- P_0 corrisponde al carico gravante sull'asse di riferimento, pari a 120 kN;
- α corrisponde ad un coefficiente che dipende dalla tipologia strutturale e si assume pari a 4.

Considerando lo spettro di traffico del Catalogo delle Pavimentazioni Stradali, riportato in Figura C.1 , si è calcolato il TF per ogni categoria di veicolo e successivamente il TTF, come riportato rispettivamente in Tabella C.1 e Tabella C.2

Tab. 2 - Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse.

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " "	"	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100
9) " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100
11) " "	"	↓40	↓100		↓80
12) " "	"	↓60	↓110		↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120		↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		
15) " "	2	↓60	↓100		
16) " "	2	↓50	↓80		

Tab. 3 - Tipici spettri di traffico di veicoli commerciali per ciascun tipo di strada.

Tipo di strada	T i p o d i v e i c o l o															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) autostrade extraurbane	12.2	----	24.4	14.6	2.4	12.2	2.4	4.9	2.4	4.9	2.4	4.9	0.10	----	----	12.2
2) " urbane	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
3) strade extr. principali e secondarie a forte traffico	----	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	----	----	10.5
4) strade extraurb. second. ordin.	----	----	58.8	29.4	----	5.9	----	2.8	----	----	----	----	0.2	----	----	2.9
5) " extr. second.-turistiche	24.5	----	40.8	16.3	----	4.15	----	2	----	----	----	----	0.05	----	----	12.2
6) " urbane di scorrimento	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
7) " " di quartiere e locali	80	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	20	----	----
8) corsie preferenziali	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	47	53	----

Figura C.1: spettro di traffico reperito nel Catalogo delle Pavimentazioni Stradali

Nella definizione del TTF è stata trascurata la categoria relativa agli “autocarri leggeri” perché, per la loro massa inferiore a 3,5 ton, non sono considerati veicoli pesanti.

Tabella C.1: calcolo del FEA per ogni asse e del TF per ogni categoria di veicoli

N	Tipo di veicolo	N assi	Distribuzione dei carichi per asse [kN]					FEA_asse					TF	
2	" "	"	15	30				2,44E-04	3,91E-03					4,15E-03
3	autocarri medi e pesanti	"	40	80				1,23E-02	1,98E-01					2,10E-01
4	" "	"	50	110				3,01E-02	7,06E-01					7,36E-01
5	autocarri pesanti	3	40	80	80			1,23E-02	1,38E-01	1,38E-01				2,89E-01
6	" "	"	60	100	100			6,25E-02	3,38E-01	3,38E-01				7,38E-01
7	autotreni e autoarticolati	4	40	90	80	80		1,23E-02	3,16E-01	1,98E-01	1,98E-01			7,24E-01
8	" "	"	60	100	100	100		6,25E-02	4,82E-01	4,82E-01	4,82E-01			1,51E+00
9	" "	5	40	80	80	80	80	1,23E-02	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01		5,65E-01
10	" "	"	60	90	90	100	100	6,25E-02	2,21E-01	2,21E-01	3,38E-01	3,38E-01		1,18E+00
11	" "	"	40	100	80	80	80	1,23E-02	4,82E-01	1,09E-01	1,09E-01	1,09E-01		8,21E-01
12	" "	"	60	110	90	90	90	6,25E-02	7,06E-01	1,74E-01	1,74E-01	1,74E-01		1,29E+00
13	mezzi d'opera	"	50	120	130	130	130	3,01E-02	1,00E+00	7,58E-01	7,58E-01	7,58E-01		3,30E+00
14	autobus	2	40	80				1,23E-02	1,98E-01					2,10E-01
15	" "	2	60	100				6,25E-02	4,82E-01					5,45E-01
16	" "	2	50	80				3,01E-02	1,98E-01					2,28E-01

Tabella C.2: calcolo del TTF

	Categoria veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Autostrade extraurbane	12,2%	-	24,4%	14,6%	2,4%	12,2%	2,4%	4,9%	2,4%	4,9%	2,4%	4,9%	0,1%	-	-	12,2%
% categoria mezzo pesante	-	-	27,8%	16,6%	2,7%	13,9%	2,7%	5,6%	2,7%	5,6%	2,7%	5,6%	0,1%	-	-	13,9%
TF	8,20E-04	4,15E-03	2,10E-01	7,36E-01	2,89E-01	7,38E-01	7,24E-01	1,51E+00	5,65E-01	1,18E+00	8,21E-01	1,29E+00	3,30E+00	2,10E-01	5,45E-01	2,28E-01
TF*%cat	-	-	5,83E-02	1,22E-01	7,90E-03	1,02E-01	1,98E-02	8,42E-02	1,55E-02	6,59E-02	2,24E-02	7,20E-02	3,76E-03	-	-	3,16E-02
TTF	0,61															

ALLEGATO D

Al fine di fornire una panoramica completa dell'analisi strutturale condotta per la scelta del software, si mostrano le risposte deformative della pavimentazione S-TAL QUALE elaborate dai codici di calcolo comparati e le differenze relative tra le deformazioni fornite da BISAR 3.0 e ALVA MASTER, valutate nei punti di interesse.

Si ricorda che la configurazione strutturale analizzata si presente come segue.

- Spessore strato di usura: 6 cm.
- Spessore strato di collegamento: 7 cm.
- Spessore strato di base: 22 cm.
- Spessore fondazione in misto granulare: 15 cm.

Si riportano nelle seguenti tabelle i risultati ottenuti per i diversi periodi di analisi considerati.

Si ricorda che valori negativi corrispondono a deformazioni di compressione, mentre i valori positivi corrispondono a deformazioni di trazione.

Tabella D.1: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di FEBBRAIO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,58	-5,43	-22,15	-	-3,62	-5,48	-22,16	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-13,52	-7,16	-1,17	-	-13,54	-7,21	-1,17	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-19,31	-10,36	14,45	-	-19,32	-10,39	14,48	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	3,19	3,72	-18,46	3,72	3,16	3,69	-18,42	3,69
	0,1093	0,0000	0,1299	-5,21	1,85	-6,14	1,85	-5,23	1,82	-6,12	1,82
	0,1875	0,0000	0,1299	-9,97	0,46	1,36	0,46	-9,98	0,44	1,39	0,44
Base	0,0000	0,0000	0,3499	19,41	25,32	-24,54	25,32	19,42	25,33	-24,55	25,33
	0,1093	0,0000	0,3499	19,58	26,37	-25,20	26,37	19,60	26,38	-25,22	26,38
	0,1875	0,0000	0,3499	19,17	26,52	-25,06	26,52	19,16	26,51	-25,03	26,51
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	22,55	27,09	-81,55	-	22,56	27,10	-81,63	-
	0,1093	0,0000	0,5001	24,11	28,03	-84,60	-	24,14	28,05	-84,76	-
	0,1875	0,0000	0,5001	24,38	28,22	-85,17	-	24,38	28,22	-85,17	-

Tabella D.2: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di MARZO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,85	-6,13	-28,62	-	-3,90	-6,18	-28,70	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-16,05	-8,24	-2,40	-	-16,10	-8,30	-2,42	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-23,16	-12,19	17,14	-	-23,21	-12,23	17,18	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	3,99	4,61	-22,89	4,61	3,97	4,57	-22,88	4,57
	0,1093	0,0000	0,1299	-6,28	2,31	-7,71	2,31	-6,31	2,27	-7,69	2,27
	0,1875	0,0000	0,1299	-12,09	0,61	1,54	0,61	-12,12	0,58	1,57	0,58
Base	0,0000	0,0000	0,3499	22,61	29,75	-28,81	29,75	22,64	29,79	-28,87	29,79
	0,1093	0,0000	0,3499	22,78	31,01	-29,60	31,01	22,82	31,06	-29,65	31,06
	0,1875	0,0000	0,3499	22,27	31,19	-29,42	31,19	22,28	31,21	-29,43	31,21
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	26,02	31,50	-92,73	-	26,06	31,54	-92,88	-
	0,1093	0,0000	0,5001	27,86	32,64	-96,35	-	27,95	32,69	-96,62	-
	0,1875	0,0000	0,5001	28,22	32,87	-97,08	-	28,24	32,90	-97,14	-

Tabella D.3: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di APRILE

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-4,18	-7,20	-40,82	-	-4,18	-7,19	-40,85	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-20,27	-9,96	-5,09	-	-20,29	-9,97	-5,10	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-29,64	-15,20	21,59	-	-29,70	-15,20	21,61	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	5,37	6,10	-30,62	6,10	5,30	6,01	-30,61	6,01
	0,1093	0,0000	0,1299	-8,12	3,06	-10,45	3,06	-8,15	2,98	-10,43	2,98
	0,1875	0,0000	0,1299	-15,74	0,82	1,84	0,82	-15,75	0,75	1,87	0,75
Base	0,0000	0,0000	0,3499	27,64	36,86	-35,70	36,86	27,62	36,82	-35,69	36,82
	0,1093	0,0000	0,3499	27,81	38,47	-36,68	38,47	27,79	38,44	-36,66	38,44
	0,1875	0,0000	0,3499	27,12	38,70	-36,43	38,70	27,08	38,64	-36,37	38,64
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	31,43	38,49	-110,10	-	31,41	38,46	-110,05	-
	0,1093	0,0000	0,5001	33,84	39,94	-114,70	-	33,81	39,92	-114,78	-
	0,1875	0,0000	0,5001	34,22	40,24	-115,60	-	34,18	40,19	-115,47	-

Tabella D.4: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di MAGGIO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-4,03	-8,02	-58,80	-	-4,06	-8,05	-58,84	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-25,75	-11,73	-9,52	-	-25,77	-11,76	-9,55	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-38,42	-18,83	27,32	-	-38,46	-18,85	27,34	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	7,34	8,21	-41,85	8,21	7,35	8,21	-41,88	8,21
	0,1093	0,0000	0,1299	-10,55	4,15	-14,59	4,15	-10,56	4,15	-14,60	4,15
	0,1875	0,0000	0,1299	-20,68	1,17	2,04	1,17	-20,69	1,18	2,04	1,18
Base	0,0000	0,0000	0,3499	33,87	45,82	-44,44	45,82	33,94	45,90	-44,56	45,90
	0,1093	0,0000	0,3499	33,98	47,90	-45,66	47,90	34,06	48,00	-45,77	48,00
	0,1875	0,0000	0,3499	33,05	48,20	-45,31	48,20	33,10	48,27	-45,39	48,27
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	37,99	47,13	-130,90	-	38,04	47,20	-131,15	-
	0,1093	0,0000	0,5001	41,03	49,01	-136,90	-	41,11	49,09	-137,18	-
	0,1875	0,0000	0,5001	41,55	49,40	-138,00	-	41,59	49,45	-138,12	-

Tabella D.5: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di GIUGNO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-2,37	-8,35	-101,00	-	-2,43	-8,41	-101,10	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-36,54	-14,10	-21,29	-	-36,54	-14,16	-21,37	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-56,54	-25,36	38,42	-	-56,57	-25,39	38,44	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	12,18	13,39	-67,55	13,39	12,20	13,42	-67,56	13,42
	0,1093	0,0000	0,1299	-15,40	7,10	-24,52	7,10	-15,40	7,12	-24,54	7,12
	0,1875	0,0000	0,1299	-31,02	2,48	1,75	2,48	-31,03	2,51	1,73	2,51
Base	0,0000	0,0000	0,3499	45,55	63,13	-61,61	63,13	45,66	63,26	-61,78	63,26
	0,1093	0,0000	0,3499	45,44	66,18	-63,26	66,18	45,55	66,32	-63,41	66,32
	0,1875	0,0000	0,3499	43,97	66,60	-62,67	66,60	44,06	66,72	-62,81	66,72
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	49,95	63,35	-168,80	-	50,03	63,45	-169,08	-
	0,1093	0,0000	0,5001	54,30	66,11	-177,40	-	54,39	66,22	-177,71	-
	0,1875	0,0000	0,5001	55,01	66,68	-179,00	-	55,08	66,76	-179,14	-

Tabella D 6: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di LUGLIO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μs]	ϵ_y [μs]	ϵ_z [μs]	ϵ_t [μs]	ϵ_x [μs]	ϵ_y [μs]	ϵ_z [μs]	ϵ_t [μs]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-0,32	-7,70	-136,40	-	-0,39	-7,78	-136,56	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-44,06	-15,00	-32,14	-	-44,07	-15,08	-32,28	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-69,72	-29,48	46,04	-	-69,76	-29,52	46,06	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	15,45	16,77	-87,24	16,77	15,49	16,82	-87,27	16,82
	0,1093	0,0000	0,1299	-18,97	8,87	-32,20	8,87	-18,97	8,90	-32,23	8,90
	0,1875	0,0000	0,1299	-38,47	3,07	1,43	3,07	-38,49	3,12	1,41	3,12
Base	0,0000	0,0000	0,3499	52,61	73,91	-72,51	73,91	52,74	74,07	-72,72	74,07
	0,1093	0,0000	0,3499	52,25	77,58	-74,39	77,58	52,37	77,75	-74,58	77,75
	0,1875	0,0000	0,3499	50,38	78,08	-73,63	78,08	50,49	78,23	-73,80	78,23
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	57,08	73,31	-191,70	-	57,18	73,44	-191,99	-
	0,1093	0,0000	0,5001	62,26	76,64	-201,90	-	62,37	76,79	-202,31	-
	0,1875	0,0000	0,5001	63,10	77,33	-203,80	-	63,19	77,45	-204,06	-

Tabella D.7: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di AGOSTO

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μs]	ϵ_y [μs]	ϵ_z [μs]	ϵ_t [μs]	ϵ_x [μs]	ϵ_y [μs]	ϵ_z [μs]	ϵ_t [μs]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-0,94	-7,98	-127,50	-	-0,98	-8,02	-127,62	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-42,22	-14,88	-29,36	-	-42,23	-14,93	-29,48	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-66,42	-28,54	44,19	-	-66,48	-28,55	44,21	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	14,53	15,80	-82,10	15,80	14,52	15,78	-82,13	15,78
	0,1093	0,0000	0,1299	-18,11	8,31	-30,14	8,31	-18,12	8,29	-30,16	8,29
	0,1875	0,0000	0,1299	-36,60	2,82	1,60	2,82	-36,61	2,81	1,60	2,81
Base	0,0000	0,0000	0,3499	50,85	71,20	-69,75	71,20	50,93	71,30	-69,89	71,30
	0,1093	0,0000	0,3499	50,56	74,71	-71,58	74,71	50,64	74,81	-71,69	74,81
	0,1875	0,0000	0,3499	48,79	75,20	-70,86	75,20	48,86	75,28	-70,96	75,28
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	55,33	70,84	-186,10	-	55,38	70,91	-186,28	-
	0,1093	0,0000	0,5001	60,30	74,03	-195,90	-	60,37	74,11	-196,17	-
	0,1875	0,0000	0,5001	61,10	74,69	-197,70	-	61,15	74,74	-197,83	-

Tabella D.8: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di SETTEMBRE

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,76	-8,57	-74,99	-	-3,76	-8,57	-74,95	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-30,09	-13,03	-13,90	-	-30,09	-13,04	-13,92	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-45,47	-21,68	31,82	-	-45,50	-21,68	31,82	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	9,13	10,13	-51,40	10,13	9,13	10,13	-51,43	10,13
	0,1093	0,0000	0,1299	-12,50	5,21	-18,18	5,21	-12,50	5,21	-18,20	5,21
	0,1875	0,0000	0,1299	-24,74	1,60	2,09	1,60	-24,74	1,60	2,08	1,60
Base	0,0000	0,0000	0,3499	38,66	52,84	-51,35	52,84	38,73	52,92	-51,47	52,92
	0,1093	0,0000	0,3499	38,70	55,31	-52,75	55,31	38,78	55,40	-52,86	55,40
	0,1875	0,0000	0,3499	37,56	55,66	-52,32	55,66	37,62	55,72	-52,39	55,72
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	42,96	53,77	-146,70	-	43,00	53,84	-146,85	-
	0,1093	0,0000	0,5001	46,53	56,00	-153,70	-	46,58	56,08	-153,92	-
	0,1875	0,0000	0,5001	47,12	56,47	-155,00	-	47,15	56,51	-155,05	-

Tabella D.9: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di OTTOBRE

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-4,16	-7,19	-41,32	-	-4,19	-7,22	-41,27	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-20,42	-9,99	-5,21	-	-20,43	-10,02	-5,20	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-29,89	-15,28	21,74	-	-29,91	-15,30	21,76	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	5,30	6,00	-30,83	6,00	5,36	6,08	-30,89	6,08
	0,1093	0,0000	0,1299	-8,21	2,95	-10,49	2,95	-8,20	3,02	-10,54	3,02
	0,1875	0,0000	0,1299	-15,86	0,71	1,90	0,71	-15,88	0,78	1,87	0,78
Base	0,0000	0,0000	0,3499	27,68	36,92	-35,76	36,92	27,80	37,08	-35,94	37,08
	0,1093	0,0000	0,3499	27,84	38,54	-36,74	38,54	27,98	38,71	-36,92	38,71
	0,1875	0,0000	0,3499	27,16	38,77	-36,49	38,77	27,26	38,92	-36,63	38,92
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	31,49	38,57	-110,30	-	31,60	38,71	-110,65	-
	0,1093	0,0000	0,5001	33,91	40,03	-115,00	-	34,01	40,18	-115,41	-
	0,1875	0,0000	0,5001	34,29	40,33	-115,90	-	34,39	40,45	-116,12	-

Tabella D.10: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di NOVEMBRE

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,81	-5,99	-27,20	-	-3,85	-6,03	-27,21	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-15,51	-8,01	-2,12	-	-15,53	-8,06	-2,13	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-22,33	-11,80	16,56	-	-22,33	-11,82	16,58	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	3,77	4,35	-21,87	4,35	3,75	4,33	-21,83	4,33
	0,1093	0,0000	0,1299	-6,06	2,15	-7,33	2,15	-6,08	2,13	-7,31	2,13
	0,1875	0,0000	0,1299	-11,63	0,53	1,53	0,53	-11,64	0,51	1,55	0,51
Base	0,0000	0,0000	0,3499	21,87	28,73	-27,83	28,73	21,88	28,74	-27,85	28,74
	0,1093	0,0000	0,3499	22,04	29,94	-28,58	29,94	22,06	29,96	-28,61	29,96
	0,1875	0,0000	0,3499	21,56	30,11	-28,41	30,11	21,55	30,11	-28,39	30,11
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	25,24	30,50	-90,23	-	25,25	30,51	-90,31	-
	0,1093	0,0000	0,5001	27,01	31,59	-93,72	-	27,07	31,61	-93,91	-
	0,1875	0,0000	0,5001	27,35	31,81	-94,41	-	27,35	31,81	-94,40	-

Tabella D.11: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di DICEMBRE

Strato	x [m]	y [m]	z [m]	BISAR 3.0				ALVA MASTER			
				ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]	ϵ_x [μ s]	ϵ_y [μ s]	ϵ_z [μ s]	ϵ_t [μ s]
Usura	0,0000	0,0000	0,0599	-3,63	-5,45	-21,63	-	-3,63	-5,45	-21,59	-
	0,1093	0,0000	0,0599	-13,27	-7,12	-1,10	-	-13,30	-7,14	-1,08	-
	0,1875	0,0000	0,0599	-18,89	-10,24	14,20	-	-18,92	-10,24	14,22	-
Binder	0,0000	0,0000	0,1299	3,08	3,60	-17,92	3,60	3,09	3,61	-17,96	3,61
	0,1093	0,0000	0,1299	-5,12	1,77	-5,92	1,77	-5,12	1,78	-5,95	1,78
	0,1875	0,0000	0,1299	-9,76	0,42	1,38	0,42	-9,77	0,43	1,38	0,43
Base	0,0000	0,0000	0,3499	19,07	24,85	-24,07	24,85	19,12	24,91	-24,15	24,91
	0,1093	0,0000	0,3499	19,24	25,86	-24,72	25,86	19,29	25,93	-24,80	25,93
	0,1875	0,0000	0,3499	18,84	26,01	-24,59	26,01	18,87	26,06	-24,62	26,06
Sottofondo	0,0000	0,0000	0,5001	22,18	26,62	-80,36	-	22,23	26,67	-80,54	-
	0,1093	0,0000	0,5001	23,71	27,53	-83,35	-	23,78	27,61	-83,61	-
	0,1875	0,0000	0,5001	23,97	27,72	-83,91	-	24,01	27,77	-84,01	-

Nelle seguenti tabelle si riportano, inoltre, le differenze relative tra gli output dei due software, computate attraverso l'equazione

$$\Delta [\%] = \frac{\varepsilon_B - \varepsilon_{AM}}{\varepsilon_B} \cdot 100$$

In cui:

- ε_B rappresenta la deformazione di trazione determinata con BISAR 3.0 [μstrain];
- ε_{AM} rappresenta la deformazione di trazione determinata con ALVA MASTER [μstrain].

Tabella D. 12: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di FEBBRAIO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-1,25	-0,89	-0,07	-
-0,17	-0,68	-0,41	-
-0,06	-0,32	-0,19	-
0,88	0,81	0,21	0,81
-0,32	1,50	0,38	1,50
-0,13	5,44	-2,01	5,44
-0,07	-0,05	-0,06	-0,05
-0,10	-0,04	-0,06	-0,04
0,03	0,04	0,11	0,04
-0,05	-0,04	-0,10	-
-0,13	-0,09	-0,19	-
-0,01	0,00	0,00	-

Tabella D. 13: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di MARZO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-1,17	-0,85	-0,27	-
-0,28	-0,68	-1,01	-
-0,20	-0,33	-0,25	-
0,67	0,65	0,04	0,65
-0,43	1,37	0,18	1,37
-0,27	4,85	-1,94	4,85
-0,12	-0,14	-0,19	-0,14
-0,17	-0,15	-0,17	-0,15
-0,06	-0,07	-0,02	-0,07
-0,14	-0,14	-0,17	-
-0,32	-0,16	-0,28	-
-0,07	-0,08	-0,06	-

Tabella D.14: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di APRILE

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
0,15	0,12	-0,06	-
-0,11	-0,04	-0,31	-
-0,19	0,02	-0,09	-
1,28	1,39	0,04	1,39
-0,36	2,59	0,16	2,59
-0,07	8,40	-1,79	8,40
0,06	0,11	0,04	0,11
0,06	0,07	0,05	0,07
0,13	0,14	0,16	0,14
0,07	0,09	0,05	-
0,10	0,04	-0,07	-
0,12	0,12	0,11	-

Tabella D.15: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di MAGGIO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-0,56	-0,36	-0,06	-
-0,06	-0,26	-0,32	-
-0,10	-0,10	-0,06	-
-0,05	-0,03	-0,06	-0,03
-0,11	0,03	-0,08	0,03
-0,06	-0,42	0,13	-0,42
-0,20	-0,18	-0,26	-0,18
-0,22	-0,21	-0,24	-0,21
-0,16	-0,15	-0,17	-0,15
-0,14	-0,14	-0,19	-
-0,19	-0,17	-0,21	-
-0,09	-0,10	-0,09	-

Tabella D.16: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di GIUGNO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-2,41	-0,79	-0,09	-
-0,01	-0,45	-0,39	-
-0,05	-0,12	-0,05	-
-0,15	-0,22	-0,02	-0,22
-0,03	-0,30	-0,10	-0,30
-0,04	-1,13	0,81	-1,13
-0,23	-0,21	-0,27	-0,21
-0,23	-0,21	-0,24	-0,21
-0,19	-0,18	-0,22	-0,18
-0,16	-0,16	-0,17	-
-0,17	-0,17	-0,17	-
-0,13	-0,12	-0,08	-

Tabella D.17: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di LUGLIO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-21,61	-1,07	-0,12	-
-0,02	-0,54	-0,43	-
-0,06	-0,13	-0,03	-
-0,27	-0,29	-0,04	-0,29
-0,01	-0,42	-0,10	-0,42
-0,06	-1,39	1,44	-1,39
-0,25	-0,22	-0,29	-0,22
-0,24	-0,22	-0,26	-0,22
-0,22	-0,20	-0,23	-0,20
-0,17	-0,17	-0,15	-
-0,18	-0,19	-0,20	-
-0,14	-0,15	-0,13	-

Tabella D.18: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di AGOSTO

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-3,72	-0,52	-0,09	-
-0,02	-0,33	-0,42	-
-0,09	-0,04	-0,04	-
0,09	0,13	-0,03	0,13
-0,08	0,30	-0,06	0,30
-0,02	0,45	0,18	0,45
-0,17	-0,14	-0,20	-0,14
-0,16	-0,14	-0,16	-0,14
-0,14	-0,10	-0,14	-0,10
-0,10	-0,10	-0,10	-
-0,11	-0,11	-0,14	-
-0,08	-0,07	-0,07	-

Tabella D.19: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di SETTEMBRE

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
0,00	-0,02	0,05	-
0,00	-0,05	-0,15	-
-0,07	0,02	-0,01	-
-0,03	0,00	-0,06	0,00
0,00	-0,05	-0,13	-0,05
-0,01	-0,58	0,77	-0,58
-0,17	-0,15	-0,23	-0,15
-0,19	-0,16	-0,21	-0,16
-0,15	-0,11	-0,14	-0,11
-0,09	-0,13	-0,10	-
-0,12	-0,15	-0,14	-
-0,06	-0,07	-0,03	-

Tabella D.20: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di OTTOBRE

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-0,65	-0,46	0,11	-
-0,06	-0,37	0,14	-
-0,08	-0,12	-0,09	-
-1,11	-1,31	-0,19	-1,31
0,12	-2,36	-0,47	-2,36
-0,11	-9,42	1,69	-9,42
-0,45	-0,43	-0,49	-0,43
-0,49	-0,45	-0,49	-0,45
-0,37	-0,38	-0,38	-0,38
-0,34	-0,35	-0,32	-
-0,31	-0,38	-0,36	-
-0,29	-0,31	-0,19	-

Tabella D.21: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di NOVEMBRE

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-1,09	-0,75	-0,04	-
-0,11	-0,56	-0,27	-
-0,02	-0,19	-0,13	-
0,66	0,62	0,18	0,62
-0,23	1,12	0,29	1,12
-0,06	3,90	-1,47	3,90
-0,06	-0,04	-0,07	-0,04
-0,11	-0,06	-0,09	-0,06
0,04	0,01	0,07	0,01
-0,03	-0,04	-0,09	-
-0,21	-0,08	-0,20	-
0,01	0,00	0,01	-

Tabella D.22: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di DICEMBRE

Δ_x [%]	Δ_y [%]	Δ_z [%]	Δ_t [%]
-0,15	-0,09	0,17	-
-0,19	-0,17	1,79	-
-0,17	-0,02	-0,12	-
-0,24	-0,35	-0,21	-0,35
-0,09	-0,67	-0,42	-0,67
-0,14	-2,77	0,31	-2,77
-0,24	-0,23	-0,31	-0,23
-0,27	-0,29	-0,31	-0,29
-0,14	-0,19	-0,10	-0,19
-0,21	-0,21	-0,22	-
-0,28	-0,29	-0,31	-
-0,17	-0,18	-0,12	-

BIBLIOGRAFIA

Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Yusoff, N. I., & Hassan, N. A. (2016). High temperature characteristics of warm mix asphalt mixtures with nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders. *Journal of Cleaner Production* (122), p. 326-334.

Alexandre, M., & Dubois, P. (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering* , 28, p. 1-63.

Al-Katheeb, G., Sheony, A., Gibson, N., & Harman, T. (2006). A New Simplistic Model for Dynamic Modulus Predictions of Asphalt Paving Mixtures. *Journal of the AAPT* , 75.

Almasri, D. A., Rhadfi, T., Atieh, M. A., McKay, G., & Ahzi, S. (2018). High performance hydroxyiron modified montmorillonite nanoclay adsorbent for arsenite removal. *Chemical Engineering Journal* , 335, p. 1-12.

Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., & Aliha, M. R. (2016). Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* , 39, p. 896-906.

Arabani, M., & Faramarzi, M. (2015). Characterization of CNTs-modified HMA's mechanical 2properties. *Construction and Building Materials* , 83, p. 207-215.

ARPA Piemonte. (s.d.). *Home Rischi Naturali - Arpa Piemonte*. Tratto il giorno Aprile 11, 2021 da <http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali>

Austrroads. (2017). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Sidney.

Balaguera, A., Carvajal, G. I., Alberti, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation & Recycling* (132), p. 37-48.

Bare, J. C., Norris, G. A., Pennington, D. W., & McKone, T. (2002). TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment. *Journal of Industrial Ecology* , 6 (3-4), 49-78.

Bari, J. (2005). Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Tesi di Dottorato* . (A. S. University, A cura di) Arizona, Stati Uniti.

Blengini, G. A., & Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* (18), p. 1021-1030.

Bonati, A., Merusi, F., Bochicchio, G., Tessadri, B., Polacco, G., Filippi, S., et al. (2013). Effect of nanoclay and conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction. *Construction and Building Materials* , 47, p. 990-1000.

- Caterpillar Inc. (2012). *Caterpillar Performance Handbook*. Peoria, Illinois, U.S.A.
- Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2017). Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road. *Journal of Cleaner Production* (142), p. 3482-3489.
- Commissione, E. (2011, 10 20). Raccomandazione 2011/696/UE della Commissione. GU L 275.
- Consorzio ECOSIGN. (s.d.). Concetti base di Ecodesign. *Unità 04: Life Cycle Assessment e Costi*. (C. Fernández, A cura di, & E. Gedi, Trad.)
- Danafar, F., Fakhru'l-Razi, A., Salleha, M. A., & Biak, D. R. (2009). Fluidized bed catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes—A review. *Chemical Engineering Journal*, 155, p. 37-48.
- Di Mascio, P., Domenichini, L., Festa, B., Caliendo, C., Giannattasio, P., Paoloni, G., et al. (1993). *Catalogo delle Pavimentazioni Stradali*. (C.N.R., A cura di)
- ECHA. (2014). *ECHA - Nanomateriali*. Tratto il giorno Gennaio 22, 2021 da <https://echa.europa.eu/it/regulations/nanomaterials>
- Eurobitume. (2012, Luglio). Life Cycle Inventory: Bitumen. 2. Bruxelles, Belgio.
- Eurobitume. (2020, Aprile). THE EUROBITUME LIFE-CYCLE INVENTORY FOR BITUMEN. Bruxelles, Belgio.
- Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E.-S. I., & Breakah, T. (2016). Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica. *Procedia Engineering*, 143, p. 1260-1267.
- Facchini, M. (s.d.). Tesi di Dottorato. *Fabbricazione non convenzionale di nanostrutture a base di carbonio per biosensori*.
- Fantke, P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., et al. (2017). USEtox 2.0 Documentation (Version 1.1).
- Faramarzi, M., Arabani, M., Haghi, A. K., & Mottaghitalab, V. (2015). Carbon Nanotubes-modified Asphalt Binder: Preparation and Characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8 (1), p. 29-37.
- Faramarzi, M., Arabani, M., Haghi, A. K., & Mottaghitalab, V. (2015). Carbon Nanotubes-modified Asphalt Binder: Preparation and Characterization. *Journal of Pavement Research and Technology*, 8 (1), p. 29-37.
- Galooyak, S. S., Palassi, M., Farahani, H. Z., & Goli, A. (2015). EFFECT OF CARBON NANOTUBE ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMEN. *Petroleum & Coal Journal*, 57 (5), p. 556-564.
- Gavankar, S., Suh, S., & Keller, A. A. (2014). The Role of Scale and Technology Maturity in Life Cycle Assessment of Emerging Technologies A Case Study on Carbon Nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009, Gennaio 6). ReCiPe 2008. *A life cycle impact assessment method, First edition, Report I: Characterisation* .

GreenDelta. (2016, Maggio 11). LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. (A. P. Acero, C. Rodriguez, & A. Ciroth, Redatto da)

Griffiths, O. G., O'Byrne, J. P., Torrente-Murciano, L., Jones, M. D., Mattia, D., & McManus, M. C. (2013). Identifying the largest environmental life cycle impacts during carbon nanotube synthesis via chemical vapour deposition. *Journal of Cleaner Production* , 42, p. 180-189.

Healy, M. L., Dahlben, L. J., & Isaacs, J. A. (2008). Environmental Assessment of Single-Walled Carbon Nanotube Processes. *Journal of Industrial Ecology* , 12 (3).

Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology: History and future. *Human and Experimental Toxicology* , 34 (12), p. 1318-1321.

Iskender, E. (2016). Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures. *Measurement* (93), p. 359-371.

ISO 14040. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles.

Konsta-Gdoutos, M. S., Danoglidis, P. A., & Shah, S. P. (2019). High modulus concrete: Effects of low carbon nanotube and nanofiber. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* , 103.

Kushnir, D. (2007). Master of Science Thesis for Industrial Ecology. *A Technology Assessment of Carbon Nanoparticles: Production Energy Requirements and Implication for Use* .

Kushnir, D., & Sanden, B. A. (2008). Energy requirements of carbon nanoparticle production. *Journal of Industrial Ecology* , 12, p. 360-375.

Li, J., Xiao, F., Lanfang, Z., & Amirkhanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production* (233), p. 1182-1206.

Lucignano, C. (2009). Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Materiali. *Tecnologie dei Nanocompositi a Matrice Polimerica* .

Miglietta, F., Santagata, E., Chiappinelli, G., Baglieri, O., & Tsantilis, L. (2016). *Protocolli di Prova e Modelli di Analisi per lo Studio del Comportamento Meccanico di Conglomerati Bituminosi Nano-Rinforzati*. Torino.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., et al. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Niu, T. (2020). Carbon nanotubes advance next-generation electronics. *Nano Today* , 35.

Roes, A. L., Marsili, E., & Nieuwlaar, E. (2007). Environmental and Cost Assessment of a Polypropylene. *Journal of Polymer and Environment* , 15, 212-226.

Roes, A. L., Tabak, L. B., Shen, L., Nieuwlaar, E., & Kumar, P. M. (2010). Influence of using nanoobjects as filler on functionality-based energy use of nanocomposites. *Journal of Nanoparticle Research* , 12, p. 2011-2028.

Santagata, E., Baglieri, O., Miglietta, F., Tsantilis, L., & Riviera, P. P. (2019). Impact of nanosized additives on the fatigue damage behaviour of asphalt mixtures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* , 42 (12), p. 1-9.

Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Chiappinelli, G. (2015). Fatigue properties of bituminous binders reinforced with carbon nanotubes. *International Journal of Pavement Engineering* , 16 (1), p. 80-90.

Satish, J. (2008). Can Nanotechnology Improve the Sustainability of Biobased Products? The Case of Layered Silicate Biopolymer Nanocomposites. *Journal of Industrial Ecology* , 12 (3), p. 474-489.

Schrijvers, D. L., Leroux, F., Verney, V., & Patel, M. K. (2014). Ex-ante Life Cycle Assessment of polymer nanocomposites using organo modified Layered Double Hydroxides for potential application in agricultural films. *Green Chemistry* , 16, p. 4966-4984.

Servili, M., Veneziani, G., Taticchi, A., Romaniello, R., A., T., & Leone, A. (2019). Low-frequency, high-power ultrasound treatment at different pressures for olive paste: Effects on olive oil yield and quality. *Ultrasonics - Sonochemistry* (59), p. 1-7.

Singh, A., Lou, H. H., Pike, R. W., Agboola, A., Li, X., Hopper, J. R., et al. (2008). Environmental Impact Assessment for Potential Continuous Processes for the Production of Carbon Nanotubes. *American Journal of Environmental Sciences* , 4, p. 522-534.

Sitaf S.p.A. (s.d.). *Dati di Traffico*. Tratto il giorno Aprile 12, 2021 da Sitaf S.p.A. - Autostrada A32 Torino-Bardonecchia e Traforo Autostradale del Frejus: <https://www.sitaf.it/a32-torino-bardonecchia/percorso-e-traffico-a32/dati-di-traffico>

Sivakumar, M., & Anjaneyulu, M. V. (2016). Fatigue characteristics of nano-clay modified bituminous concrete. *Transportation Research Procedia* (17), p. 124-133.

Staub De Melo, J. V., & Triches, G. (2017). Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. *Construction and Building Materials* (140), p. 364-373.

Sudha, P. N., Sangeetha, K., Vijayalakshmi, K., & Barhoum, A. (2018). Nanomaterials history, classification, unique properties, production and market. In *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures. Current Prospects and Future Trends* (p. 341-384).

Teah, H. Y., Sato, T., Namiki, K., Asaka, M., Feng, K., & Suguru, N. (2020). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Long and Pure Carbon Nanotubes Synthesized via

On-Substrate and Fluidized-Bed Chemical Vapor Deposition. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* , 8, p. 1730-1740.

Tisberger Ibanez, T. E., Santagata, E., & Tsantilis, L. (2020). Life Cycle Assessment of Pavements through PaLATE. *Tesi di Laurea Magistrale* . Torino.

Trompeta, A.-F., Koklioti, M. A., Perivoliotis, D. K., Lynch, I., & Charitidis, C. A. (2016). Towards a holistic environmental impact assessment of carbon nanotube growth through chemical vapour deposition. *Journal of Cleaner Production* , 129, p. 384-394.

Upadhyayula, V. K., Meyer, D. E., Curran, M. A., & Gonzalez, M. A. (2012). Life cycle assessment as a tool to enhance the environmental performance of carbon nanotube products: a review. *Journal of Cleaner Production* , 26, p. 37-47.

Usepa. (2012). *Brevetto n. No. EPA/600/R-12/554*.

Vidu, R., Rahman, M., Mahmoudi, M., Enachescu, M., Poteca, T. D., & Opris, I. (2014). Nanostructures: a platform for brain repair and augmentation. *Frontiers in Systems Neuroscience* .

Witczak, M., El-Basyouny, M., & El-Badawy, S. (2007). Incorporation of the new (2005) E* predictive model in the MEPDG. *NCHRP 1-40D Final Report* . Tempe, Arizona, Stati Uniti: Arizona State University.

Wu, F., Zhou, Z., Temizel-Sekeryan, S., Ghamkhar, R., & Hicks, A. L. (2020). Assessing the environmental impact and payback of carbon nanotube supported CO₂ capture technologies using LCA methodology. *Journal of Cleaner Production* , 270.

Zahedi, M., Barati, M., & Zarei, M. (2017). Evaluation the Effect of Carbon Nanotube on the Rheological and Mechanical Properties of Bitumen and Hot Mix Asphalt (HMA). *Electronic Journal of Structural Engineering* , 17 (1), p. 76-84.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: ciclo di vita di un prodotto	7
Figura 1.2: fasi della metodologia LCA	9
Figura 1.3: ciclo di vita di una pavimentazione stradale (Li, et al., 2019)	10
Figura 1.4: rappresentazione delle tre tipologie di approccio LCA delle pavimentazioni (Li, et al., 2019)	11
Figura 2.1: Nanotubi di carbonio a parete singola (a sinistra) e nanotubi a parete multipla (a destra)	15
Figura 2.2: struttura della montmorillonite	18
Figura 2.3: processo produttivo per la produzione di un 1 kg di OMMT (Satish, 2008)	20
Figura 2.4: connessione tra i livelli di valutazione per la categoria “cambiamento climatico” (Goedkoop, et al., 2009)	24
Figura 2.5: diagramma di flusso – Metodo TRACI	26
Figura 2.6: impatti legati alla produzione di 1 kg MWCNTs per entrambe le tecniche (Trompeta, et al., 2016)	36
Figura 2.7: confronto energetico tra i diversi metodi di produzione per i MWCNTs	41
Figura 2.8: confronto di emissioni CO ₂ equivalente, nelle differenti tecniche esaminate (MWCNTs)	42
Figura 2.9: confronto energetico tra le tecniche proposte da (Gavankar, et al., 2014) e da (Singh, et al., 2008)	45
Figura 2.10: confronto del GWP tra le tecniche proposte da (Gavankar, et al., 2014) e da (Singh, et al., 2008)	46
Figura 2.11 diminuzione osservata in termini di richiesta di energia per la sintesi di CNTs con aumento di indice MRL, con le tecniche HiPco, CVD, arc discharge (Gavankar, et al., 2014)	51
Figura 2.12: inventario degli impatti ambientali ed energetici per la produzione di OMMT (Satish, 2008)	52
Figura 2.13: confronto tra “migliore” tipologia di CNTs e “peggiore” tipologia di OMMT	54
Figura 3.1: curva granulometrica di progetto	59
Figura 3.2: curve maestre dei conglomerati bituminosi in analisi	64
Figura 3.3: curve di fatica delle tre miscele esaminate	66
Figura 3.4: andamento di DR in funzione della temperatura	73

Figura 4.1: inquadramento geografico autostrada A32 (Sitaf S.p.A.).....	75
Figura 4.2: dati meteorologici forniti dall'applicativo ARPA Piemonte	77
Figura 4.3: report annuale dei volumi di traffico riferito al tratto autostradale di Avigliana	79
Figura 4.4: confronto tra traffico stimato e misurato nell'intervallo 1999-2000	83
Figura 4.5: stratigrafia della pavimentazione di progetto	92
Figura 4.6: rappresentazione del carico di riferimento e dei punti di interesse per le risposte deformative	93
Figura 5.1: inventario per la produzione di 1 ton di bitume (Eurobitume, 2020)	112
Figura 5.2: inventario per la produzione di 1 ton di bitume residuo (Eurobitume, 2012)	115
Figura 5.3: inventario relativo alla miscelazione di 1 ton di PMB	121
Figura 5.4: macchina per la miscelazione ad ultrasuoni (Servili, et al., 2019)	122
Figura 5.5: LCI per lo stoccaggio di 1 tonnellata di bitume	124
Figura 5.6: calcolo dell'energia necessaria per lo stoccaggio del bitume (Eurobitume, 2020).....	125
Figura 5.7: GER e GWP per lo scenario S-TAL QUALE	133
Figura 5.8: intervalli di variazione del GER e del GWP, per lo scenario S-NC	141
Figura 5.9: intervallo di variazione del GER per lo scenario S-CNTs.....	147
Figura 5.10: intervalli di variazione del GWP per lo scenario S-CNTs.....	148
Figura 5.11: confronto tra GER e GWP relativi alla produzione dei materiali per 1 m ³ di conglomerato bituminoso	150
Figura 5.12: confronto di GER e GWP per la produzione e il trasporto dei materiali per 1 m ³ di miscela	151
Figura 5.13: confronto di GER e GWP relativi alla produzione dei materiali per 1 m ³ di conglomerato bituminoso	152
Figura 5.14: confronto di GER e GWP per la produzione e il trasporto dei materiali per 1 m ³ di miscela	153
Figura 5.15: confronto tra i consumi energetici: S-TQ e S-NC	154
Figura 5.16: confronto tra le emissioni di CO ₂ , eq: S-TQ e S-NC.....	155
Figura 5.17 confronto tra i consumi energetici: S-TQ e S-CNTs	157
Figura 5.18: confronto tra i valori di GWP relativi agli scenari S-TQ e S-CNTs.....	158

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1: tecniche di sintesi dei CNTs di tipo (1), con le materie prime comunemente utilizzate per il processo	16
Tabella 2.2: tecniche di sintesi dei CNTs di tipo (2), con le materie prime comunemente utilizzate per il processo	17
Tabella 2.3: fillosilicati comunemente impiegati, con le rispettive formule chimiche... 19	
Tabella 2.4: categorie di impatto <i>midpoint</i> e relative unità di riferimento – Metodo ReCiPe 2008	23
Tabella 2.5: categorie di impatto <i>endpoint</i> e relative unità di riferimento – Metodo ReCiPe 2008	23
Tabella 2.6: legame tra AoPs e categorie <i>endpoint</i> – Metodo ReCiPe 2008.....	24
Tabella 2.7: categorie di impatto <i>midpoint</i> e relative unità di riferimento – Metodo TRACI 2002	26
Tabella 2.8: categorie di impatto <i>midpoint</i> e relative unità di riferimento – Metodo TRACI 2.1	27
Tabella 2.9: categorie di impatto <i>midpoint</i> e relative unità di riferimento – Metodo USEtox.....	27
Tabella 2.10: prospetto degli articoli analizzati.....	34
Tabella 2.11: tecniche e materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Trompeta, et al., 2016).....	35
Tabella 2.12: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Griffiths, et al., 2013)	36
Tabella 2.13: confronto degli impatti rilevati per la tecnica Fixed Bed CVD e la tecnica Floating Catalyst CVD.....	37
Tabella 2.14: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Wu, et al., 2020)	38
Tabella 2.15: confronto impatti rilevati per (Trompeta, et al., 2016), (Griffiths, et al., 2013) e (Wu, et al., 2020)	38
Tabella 2.16: materie prime considerate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Roes, et al., 2010).....	39
Tabella 2.17: materie prime e tecniche analizzate per la sintesi dei MWCNTs, nell'articolo di (Kushnir, et al., 2008)	40
Tabella 2.18: materie prime considerate per la sintesi dei SWCNTs, nell'articolo di (Gavankar, et al., 2014)	43
Tabella 2.19: confronto degli impatti rilevati per la tecnica CoMoCAT, su due differenti scale di produzione	43
Tabella 2.20: materie prime e tecniche analizzate per la sintesi dei SWCNTs, nell'articolo di (Singh, et al., 2008).....	44

Tabella 2.21: confronto impatti ambientali per la produzione di 1 kg SWCNTs dell'articolo di (Singh, et al., 2008)	44
Tabella 2.22: materie prime considerate per la sintesi dei SWCNTs, nell'articolo di (Teah, et al., 2020)	47
Tabella 2.23: tecniche e materie prime per la sintesi dei SWCNTs nell'articolo di (Kushnir, et al., 2008).....	48
Tabella 2.24: prospetto riassuntivo del fabbisogno energetico e delle emissioni per la produzione di 1 kg di MWCNTs.....	48
Tabella 2.25: prospetto riassuntivo del fabbisogno energetico e delle emissioni per la produzione di 1 kg di SWCNTs	49
Tabella 2.26: impatto energetico e GWP derivanti dalla produzione di OMMT.....	53
Tabella 3.1: caratterizzazione chimica del bitume base 70/100.....	56
Tabella 3.2: caratteristiche fisiche dei MWCNTs impiegati nella sperimentazione.....	56
Tabella 3.3: caratteristiche fisiche della montmorillonite impiegata nella sperimentazione.....	57
Tabella 3.4: panoramica delle miscele bituminose analizzate	58
Tabella 3.5: fuso granulometrico per strato di binder e curva granulometrica di progetto (Miglietta, et al., 2016).....	59
Tabella 3.6: prescrizioni volumetriche sui conglomerati bituminosi, imposti da Capitolato ANAS	60
Tabella 3.7: massima massa volumica teorica, contenuto di bitume in massa e di vuoti nelle miscele.....	60
Tabella 3.8: caratteristiche volumetriche dei conglomerati	62
Tabella 3.9: parametri della funzione sigmoidale	63
Tabella 3.10: parametri di regressione delle curve di fatica	66
Tabella 3.11: valori sperimentali del modulo complesso del bitume base e dei bitumi nano-arricchiti	69
Tabella 3.12: confronto dei moduli dinamici determinati sperimentalmente e tramite modello di Hirsch.....	69
Tabella 3.13: differenze relative in termini di E^* , tra curva maestra e modello di Hirsch	70
Tabella 3.14: riassunto delle caratteristiche delle miscele considerate per la calibrazione del modello di Hirsch	70
Tabella 3.15: modello di Hirsch, considerando $E_a = 4500000$ psi.....	71
Tabella 3.16: differenze relative in termini di E^* , tra curva maestra e modello di Hirsch con $E_a = 4500000$ psi	72
Tabella 3.17: valore dei coefficienti calibrati per la funzione DR(T), per le tre miscele	73
Tabella 3.18 :valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato TAL QUALE.....	74

Tabella 3.19: valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato NC.....	74
Tabella 3.20: valori del modulo dinamico corretto e valori di DR, relativi al conglomerato CNTs.....	74
Tabella 4.1: temperature medie massima, minima mensile e temperatura media di progetto dell'aria.....	78
Tabella 4.2: prospetto del traffico annuale riferito al periodo 1999-2000, in corrispondenza di Avigliana	81
Tabella 4.3: traffico stimato durante il periodo di esercizio della pavimentazione.....	83
Tabella 4.4: valori di input per la definizione del traffico di progetto.....	84
Tabella 4.5: definizione del traffico di progetto	84
Tabella 4.6: caratteristiche asse di riferimento	85
Tabella 4.7: confronto dei risultati forniti dalla modellazione del traffico.....	86
Tabella 4.8: contenuto di bitume e percentuale di vuoti della miscela tradizionale per lo strato di usura.....	87
Tabella 4.9: dati volumetrici delle miscele per lo strato di collegamento	89
Tabella 4.10: contenuto di bitume e percentuale di vuoti in miscela per strato di base .	90
Tabella 4.11: caratteristiche volumetriche delle miscele per strato di base.....	90
Tabella 4.12: caratteristiche volumetriche della fondazione	90
Tabella 4.13: valori del modulo complesso degli strati legati, relativi al periodo di Gennaio (S-TAL QUALE)	95
Tabella 4.14: output deformativo fornito da BISAR 3.0 e da ALVA MASTER, nel periodo di Gennaio (S-TQ).....	95
Tabella 4.15: differenze relative tra le deformazioni fornite da BISAR 3.0 e quelle fornite da ALVA MASTER.....	96
Tabella 4.16: parametro a, per le diverse miscele	98
Tabella 4.17: valori dei parametri di regressione per le funzioni di trasferimento dei conglomerati bituminosi	98
Tabella 4.18: stratigrafia di primo tentativo	99
Tabella 4.19: spessori di progetto della pavimentazione autostradale.....	100
Tabella 4.20: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-TAL QUALE	102
Tabella 4.21: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-NC.....	103
Tabella 4.22: verifica per fatica pavimentazione di progetto, scenario S-CNTs.....	104
Tabella 4.23: verifica per accumulo di deformazioni permanenti della pavimentazione di progetto	106

Tabella 5.1: prospetto degli scenari di progetto considerati per il caso studio di riferimento.....	109
Tabella 5.2: poteri calorifici dei combustibili	113
Tabella 5.3: LCI per la produzione di 1 short ton di emulsione bituminosa.....	115
Tabella 5.4: LCI per la produzione di 1 short ton di aggregati naturali.....	116
Tabella 5.5: LCI per l’approvvigionamento di 1 short ton di acqua	116
Tabella 5.6: LCI per la produzione di 1 short ton di gasolio	117
Tabella 5.7: LCI per la produzione di 1 short ton di MWCNTs via CVD.....	118
Tabella 5.8: LCI per la produzione di 1 short ton di OMMT.....	118
Tabella 5.9: inventario dei mezzi di trasporto.....	119
Tabella 5.10: inventario dei mezzi impiegati per la costruzione della sovrastruttura...	119
Tabella 5.11: caratteristiche tecniche della pala gommata CAT 950K.....	120
Tabella 5.12: LCI per la miscelazione di 1 short ton bitume nano-modificato.....	121
Tabella 5.13: LCI per lo stoccaggio di 1 tonnellata corta di bitume nell’impianto di sonicazione.....	124
Tabella 5.14: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-TQ .	126
Tabella 5.15: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-TQ – PaLATE 2.0.....	126
Tabella 5.16: densità principalmente utilizzate nella LCIA.....	127
Tabella 5.17: prospetto riassuntivo delle distanze di trasporto considerate – S-TAL QUALE	132
Tabella 5.18: impatti ambientali relativi allo scenario S-TAL QUALE	133
Tabella 5.19: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-NC .	134
Tabella 5.20: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-NC, PaLATE 2.0.....	134
Tabella 5.21: densità principalmente utilizzate nella LCIA per lo scenario S-NC	135
Tabella 5.22: prospetto riassuntivo delle distanze di trasporto considerate – S-NC.....	138
Tabella 5.23: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Satish, 2008)	139
Tabella 5.24: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Roes, et al., 2010)	139
Tabella 5.25: impatti ambientali nello scenario S-NC, considerando le voci di inventario di (Schrijvers, et al., 2014)	140
Tabella 5.26: intervallo di variazione degli impatti legati al GER e al GWP valutati nello scenario S-NC	140
Tabella 5.27: caratteristiche geometriche della pavimentazione nello scenario S-CNTs	142

Tabella 5.28: caratteristiche geometriche di input della pavimentazione S-CNTs, PaLATE 2.0	142
Tabella 5.29: densità principalmente utilizzate nella LCIA per lo scenario S-CNTs...	143
Tabella 5.30: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Roes, et al., 2010).....	145
Tabella 5.31: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Trompeta, et al., 2016)	145
Tabella 5.32: impatti ambientali nello scenario S-CNTs, considerando le voci di inventario di (Griffiths, et al., 2013).....	146
Tabella 5.33: intervallo di variazione degli impatti legati al GER e al GWP valutati nello scenario S-CNTs	146
Tabella 5.34: confronto del GER stimato per S-TQ e S-CNTs: produzione dei materiali per 1 m ³ di miscela.....	152
Tabella 5.35: confronto del GER stimato per gli scenari S-TQ e S-CNTs: trasporto dei materiali per 1 m ³ di miscela	153
Tabella 5.36: spessori risultanti dalla progettazione della pavimentazione, nei tre scenari	154
Tabella 5.37: confronto tra le emissioni di NOx, PM10, SO2 e CO: S-TQ e S-NC	156
Tabella A.1: confronto degli impatti causati da nanotubi a parete multipla prodotti con diverse tecniche.....	164
Tabella A.2: confronto degli impatti ambientali causati da nanotubi a parete singola prodotti con diverse tecniche	164
Tabella C.1: calcolo del FEA per ogni asse e del TF per ogni categoria di veicoli.....	171
Tabella C.2: calcolo del TTF	171
Tabella D.1: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di FEBBRAIO ..	172
Tabella D.2: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di MARZO.....	173
Tabella D.3: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di APRILE	173
Tabella D.4: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di MAGGIO.....	174
Tabella D.5: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di GIUGNO	174
Tabella D.6: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di LUGLIO	175
Tabella D.7: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di AGOSTO	175
Tabella D.8: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di SETTEMBRE	176
Tabella D.9: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di OTTOBRE....	176
Tabella D.10: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di NOVEMBRE	177
Tabella D.11: confronto deformazioni valutate nel periodo di analisi di DICEMBRE	177
Tabella D.12: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di FEBBRAIO.....	178

Tabella D. 13: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di MARZO	178
Tabella D.14: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di APRILE	179
Tabella D.15: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di MAGGIO	179
Tabella D.16: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di GIUGNO	179
Tabella D.17: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di LUGLIO	180
Tabella D.18: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di AGOSTO.....	180
Tabella D.19: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di SETTEMBRE.....	180
Tabella D.20: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di OTTOBRE	181
Tabella D.21: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di NOVEMBRE	181
Tabella D.22: differenze relative tra i valori di deformazioni nel periodo di analisi di DICEMBRE	181