POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Ingegneria Civile Tesi di laurea magistrale



Life Cycle Assessment di aggregati da riciclaggio nella formazione degli strati di fondazione delle sovrastrutture stradali

Life Cycle Assessment of recycled aggregate used in the formation of subbase road pavement layers

Relatori:

Candidato:

Prof. Marco Bassani

Chiara Cosimina Calderone

Prof. Giovanni Andrea Blengini

Prof.ssa Paola Palmero

Ing. Luca Tefa

Ing. Isabella Bianco

ANNO ACCADEMICO 2018 / 2019

Sommario

Introduzione	8
Capitolo 1-Analisi bibliografica	11
1.1 CDW: introduzione al riciclo di rifiuti da costruzione e demolizione	11
1.2 Piano di gestione dei rifiuti	12
1.3 CDW: potenziale di applicazione nelle costruzioni stradali	14
1.4 CDW stabilizzati	15
Capitolo 2-Materiali e metodi	17
2.1 Materiali	18
2.1.1 Composizione della pavimentazione	18
2.1.2 Strato legato	18
2.1.3 Fondazione	23
2.1.4 Sottofondo	25
2.2 Scelta del codice di calcolo e del modello costitutivo di riferimento per i materia	li indagati
	26
2.3Metodologie di calcolo per la valutazione delle prestazioni strutturali	32
2.3.1 Clima e traffico	34
2.3.2 Resistenza a fatica	36
2.4Life Cicle Analysis	37
2.4.1 Obiettivi e campo d'applicazione	38
2.4.2 Analisi dell'inventario	38
2.4.2 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita e interpretazione dei risultati	39
Capitolo3-Analisi delle prestazioni strutturali delle pavimentazioni stradali	42
3.1 Scenario 1: spessore strato legato costante e materiale variabile in fondazione	42
3.2 Scenario 2: spessore strato legato e materiale in fondazione variabili	49
Capitolo 4-Valutazione del ciclo di vita delle pavimentazioni stradali	51
4.1 Obiettivi e campo d'applicazione (Goal and Scope definition)	51
4 1 1 Unità Eunzionale	52

	4.1.2 Scelta delle categorie d'impatto	. 52
	4.1.3 Confini del sistema	. 54
4.2	Analisi dell'inventario	. 56
	4.2.1 Materie prime	. 56
	4.2.2 Materiali compositi.	. 58
	4.2.3Costruzione e Manutenzione	. 59
	4.2.4Trasporti	. 60
	4.2.5 Requisiti di qualità e affidabilità dei dati	. 60
	4.2.6Diagrammi di flusso	. 61
Capi	tolo 5 Risultati	. 65
5.1 F	Risultati dell'analisi delle prestazioni strutturali	. 65
	5.1.1 Scenario 1:spessori costanti, vita utile variabile	. 65
	5.1.1 Scenario 2:vita utile costante, spessori variabili	. 66
5.2 \	Valutazione degli impatti e interpretazione	. 68
	5.2.1 Scenario1	. 68
	5.2.2 Scenario2	. 73
	5.2.3 Confronto tra i due scenari e approfondimento sulle fondazioni	. 76
Cond	clusioni	. 82
BIBL	IOGRAFIA	. 86

Indice delle figure

Figura 1. Gerarchia del piano di gestione dei rifiuti definita dalla direttiva 2008/98/EC 12
Figura 2. Rappresentazione della stratigrafia di una pavimentazione flessibile18
Figura 3. Rappresentazione della stratigrafia dello strato legato
Figura 4. Nomogramma diUgé
Figura 5. Nomogramma di Van der Poel
Figura 6. Tipologie di materiali impiegati nello strato di fondazione
Figura 7. Stratigrafia della pavimentazione e carico di riferimento
Figura 8. Modello di Hicks-Monismith
Figura 9. Rappresentazione geometrica degli stress point
Figura 10. Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e
KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith
Figura 11. Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati mediante il modello
costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR 33
Figura 12. Fessure dovute all' accumulo del danno di fatica
Figura 13. Fessure dovute all' accumulo di deformazioni permanenti
Figura 14. Nomogramma NFTA (Asphalt Mix Fatigue Life Prediction)
Figura 15Fasi di analisi LCA (ISO 14044, 2006)
Figura 16. Rappresentazione schematica di un diagramma di flusso per la modellazione
dell'analisi LCA39
Figura 17. Relazione tra categorie d'impatto al livello <i>midpoint</i> ed <i>endpoint</i>
Figura 18. Rappresentazione della geometria e stratigrafia della fondazione
Figura 19 Rappresentazione geometrica degli stress point
Figura 20 Rappresentazione geometrica dei punti di calcolo di tensione e deformazione
evidenziando anche il punto di determinazione di ϵ_{r}
Figura 21. Schematizzazione del confine del sistema54
Figura 22. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in misto granulare
naturale62
Figura 23. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in misto granulare
naturale stabilizzata a cemento
Figura 24. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione con aggregati da CDW. 62
Figura 25. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in aggregati da CDW
stabilizzata con polveri da elettrofiltro

Figura 26. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in aggregati da CDW
stabilizzata con cemento
Figura 27. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in CDW stabilizzata con
soluzione alcalina
Figura 28. Vita utile delle pavimentazioni in analisi
Figura 29 Spessore dello strato legato delle pavimentazioni in analisi
Figura 30. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle pavimentazioni
analizzate (metodo ILCD midpoint 2011)
Figura 31. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
$pavimentazione PAV_{R1ns} \ (risultati \ analoghi \ sono \ stati \ ottenuti \ per \ PAV_{R3ns, R4opc, R4ck}.)$
Figura 32. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
pavimentazione PAV _{R2ns} 71
Figura 33. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
pavimentazione PAV _{N1ns}
Figura 34. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per le
pavimentazioni PAV_{R5sa} (risultati analoghi sono stati ottenuti per PAV_{N2opc} .)
Figura 35. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
pavimentazione PAV _{R6sa}
Figura 36. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle pavimentazioni
analizzate (metodo ILCD midpoint 2011)
Figura 37. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
$pavimentazione PAV_{R1ns} \ (valori\ analoghi\ sono\ stati\ ottenuti\ per\ PAVR2ns, R3ns, R4opc,\ R4ck).\ .\ 75ns$
Figura 38. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per le
pavimentazioni PAV _{N1ns} (valori analoghi sono stati ottenuti per PAVN2opc, R5sa,R6sa)
Figura 39. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle fondazioni
analizzate (metodo ILCD midpoint 2011)
Figura 40. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
fondazione F _{N1ns}
Figura 41. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
fondazione $F_{N2\text{opc}}$, (valori analoghi sono stati ottenuti per $R4_{\text{opc}}$)
Figura 42 Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la
fondazione F _{R5sa} (valori analoghi sono stati ottenuti F _{R6sa})

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Specifiche dei bitumi di classe 40/6019
Tabella 2. Percentuale di legante totale e di vuoti, riferita al peso degli aggregati20
Tabella 3. Massa volumica degli aggregati e del bitume
Tabella 4. Coefficiente di Poisson23
Tabella 5. Percentuale del contenuto d'acqua in peso per l'emulsione bituminosa
Tabella 6. Dati relativi alla composizione delle miscele in misto granulare2
Tabella 7.Dati relativi alla composizione della miscela R2 _{NS(7)}
Tabella 8. Temperature medie mensili della città di Torino
Tabella 9. Temperature dell'ambiente e della pavimentazione4
Tabella 10 Caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso dello strato legato 4-
Tabella 11 parametri costitutivi dei materiali in fondazione4
40 Tabella 12 Modulo resiliente dei materiali indagati per il periodo stagionale invernale
Tabella 13. Deformazioni orizzontali di trazione lungo la superficie inferiore dello strato di bas
nei diversi periodi stagionali
Tabella 14. Numero di cicli di carico che portano alla rottura dello strato4
Tabella 15 Elenco delle miscele impiegate in fondazione5
Tabella 16. Metodi raccomandati e loro classificazione a livello midpoint (Commission
Europea, 2011)5
Tabella 17. Piano di manutenzione50
Tabella 18. Dati d'inventario per la produzione in cava 1000 kg di aggregati naturali (Fonte
Blengini e Garbariono, 2010)50
Tabella 19. Dati d'inventario per la produzione in impianto stazionario di 1000 kg di aggrega
da CDW (Fonte: Blengini e Garbarino, 2010)5
Tabella 20. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di bitume (Fonte: Euobitume 2012
5
Tabella 21. Dati d'inventario per la produzione di emulsione bituminosa (Fonte: Eurobitum
2012)5
Tabella 22. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di soluzione alcalina (Ecoinvent3.1
5
Tabella 23. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di conglomerato bituminoso per la
strato di base, collegamento e usura (Fonte:Blengini et al., 2017)5

Tabella 24. Dati d'inventario per la produzione di 1000kg di misto cementato
(Fonte:CavitS.p.A)59
Tabella 25. Consumo di carburante dei mezzi di cantiere per la costruzione delle strade (Fonte:
Blengini et al., 2017)59
Tabella 26. Distanza dal luogo di acquisizione al luogo di produzione di materiali compositi 60
Tabella 27. Distanza dal luogo di acquisizione o produzione di materiali compositi al sito di
produzione60
Tabella 28. Fonte dei dati e loro grado di affidabilità
Tabella 29 Spessore dello strato legato delle pavimentazioni in analisi
Tabella 30. Confronto dei risultati di impatto ambientale per le pavimentazioni in analisi
(metodo ILCD midpoint 2011)69
Tabella 31Confronto dei risultati di impatto ambientale per le pavimentazioni in analisi (meodo
ILCD mid-point 2011)
Tabella 32 Confronto dei risultati dell'analisi LCA e strutturale delle pavimentazioni nei due
scenari indagati
Tabella 33. Confronto dei risultati di impatto ambientale per le fondazioni in analisi (meodo
ILCD midpoint 2011)78

Introduzione

Le infrastrutture stradali sono opere sovente responsabili di considerevoli impatti ambientali in ciascuna delle diverse fasi del loro ciclo di vita. Essi comprendono gli effetti prodotti dall'estrazione di materie prime utili alla produzione dei materiali da costruzione, i trasporti, le operazioni di costruzione, il loro uso e la manutenzione. Tra questi impatti si annoverano il cambiamento dell'uso del suolo, l'erosione, la produzione di rifiuti e l'inquinamento di acqua, suolo e aria. Alla luce delle implicazioni ambientali che un'infrastruttura stradale comporta, negli ultimi anni è maturata l'idea che la sua costruzione debba essere indirizzata non solo verso l'adempimento di requisiti tecnici, economici e sociali ma anche e soprattutto di quelli ambientali (Balaguera et al., 2018).

Al riguardo, la metodologia del *Life Cycle Assessment*(LCA)è ampiamente utilizzata per valutare i potenziali impatti ambientali di processi produttivi, costruttivi e servizi, ivi compresa la realizzazione di infrastrutture. Il termine LCA venne introdotto per la prima volta durante il congresso SETAC (*Society of Enviromental Toxicology and Chemistry*)del 1990. Nel 1993, la SETAC propose la definizione di LCA come quel procedimento oggettivo di valutazione degli impatti energetici e ambientali relativi a un prodotto/processo/attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto/processo/attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale".Oggi la metodologia LCA è internazionalmente riconosciuta ed è regolata dalle norme ISO 14040-44:2006 e dalle linee guida ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) della Commissione Europea.

In linea con le politiche e le iniziative europee sulle materie prime, il miglioramento della sostenibilità ambientale di un'opera stradale deve necessariamente tenere in considerazione la tipologia e la quantità di materie prime utilizzate, nonché le prestazioni e la durabilità che quest'ultime sono in grado di offrire. Una buona gestione dell'utilizzo di materie prime può infatti contribuire a minimizzare gli squilibri tra la richiesta e la disponibilità delle stesse, contribuire alla salvaguardia di risorse primarie e

limitare gli impatti ambientali dovuti all'estrazione e al trasporto delle materie prime. Se fino al termine dello scorso millennio furono stati utilizzati materiali tradizionali per la costruzione delle strade(tra questi i conglomerati bituminosi e cementizi, gli aggregati naturali, e le terre da costruzione) (Mroueh et al., 2001), con il nuovo millennio da più parti è stato promosso l'uso di materiali alternativi e di riciclo, quali le ceneri volanti nei calcestruzzi, il fresato di pavimentazione (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP) nei conglomerati bituminosi, gli aggregati di riciclo come aggregati per strati di fondazione(RCP). Tra questi spiccano i materiali di scarto di costruzione e demolizione (*Construction and Demolition Waste*, CDW) e i sottoprodotti industriali che possono essere riciclati per sostituire in parte o completamente i materiali tradizionali.

In questo contesto, il lavoro di tesi ha avuto l'obiettivo di valutare, mediante l'analisi LCA,se la scelta di materiali alternativi a quelli comunemente utilizzati nella costruzione delle strade possa migliorare le prestazioni ambientali dell'opera. Dell'intera pavimentazione, è stato considerato il solo strato di fondazione di una pavimentazione flessibile e sono state considerate diverse miscele di aggregati da CDW. Nello specifico,aggregati naturali tal quali e stabilizzati a cemento sono stati comparati con miscele di aggregati da CDW tal quali o stabilizzati con leganti alternativi (liquidi alcalini, polveri da elettrofiltro) e tradizionali quali il cemento Portland.

In particolare, la miscela di aggregati da CDW stabilizzati stabilizzate con liquidi alcalina è stato oggetto di recenti ricerche presso il Politecnico di Torino. L'uso dei liquidi alcalini evita il ricorso ai leganti tradizionali di produzione industriale (tra tutti il cemento Portland) responsabili di ingenti emissioni di anidride carbonica in atmosfera (circa il 5% delle emissioni totali). Nella letteratura tecnica è spesso citata una riduzione variabile tra il 40 e l'80% delle emissioni di gas serra nella produzione di materiali ad attivazione alcalina, rispetto alla produzione del cemento Portland (Passuello et al., 2017). Questo risparmio è dovuto, essenzialmente, al riutilizzo di rifiuti e/o sottoprodotti industriali come componenti principali del legante. Inoltre,a seguito di un'approfondita analisi bibliografica, è emerso che non sono attualmente disponibili studi d'impatto ambientale di pavimentazioni stradali per quanto concerne diverse soluzioni alternative per lo strato di fondazione. È dunque importante, oltre che rappresentare un potenziale di innovazione scientifica, valutare le prestazioni ambientali

di strati di fondazione con aggregati riciclati stabilizzati con soluzioni alcaline e di porle a confronto con materiali più tradizionali.

In una prima fase dello studio sono state svolte specifiche analisi prestazionali strutturali, considerando due scenari alternativi:nel primo scenario, sono stati mantenuti costanti gli spessori del pacchetto di strati in conglomerato bituminoso della pavimentazione, ed è stata valutata la vita utile al variare del tipo di materiale della fondazione; nel secondo scenario, stabilita la vita utile desiderata (20 anni), per ciascun materiale dello strato di fondazione consideratosi sono stati determinati gli spessori dello strato legato che garantiscono il raggiungimento della vita utile stabilita.

Successivamente è stata eseguita un'analisi dettagliata del ciclo di vita della pavimentazione flessibile di interesse nei due scenari sopra definiti.

In particolare nel seguente elaborato di tesi, il Capitolo 1 introduce lo stato dell'arte in cui sono riportati i principali studi attualmente disponibili sul piano di gestione dei rifiuti, il riciclo di rifiuti da costruzione e demolizione e l'analisi LCA applicata alla costruzione delle strade. Il Capitolo 2 illustra i materiali impiegati nella pavimentazione in analisi e le metodologie applicate per il calcolo strutturale e per la valutazione d'impatto ambientale. Nel Capitolo 3 si mostrano le analisi prestazionali eseguite per la pavimentazione di riferimento considerando i due scenari, mentre nel Capitolo 4 è illustrata l'analisi del ciclo di vita della pavimentazione in esame nei due scenari di interesse. Infine,nel Capitolo 5 sono presentati i risultati ottenuti durante il corso dello studio, l'analisi e la discussione degli stessi. In particolare,sono confrontati i risultati relativi alle diverse pavimentazioni analizzate.

Capitolo 1-Analisi bibliografica

1.1 CDW: introduzione al riciclo di rifiuti da costruzione e demolizione

Gli aggregati di riciclo da costruzione e demolizione, noti nella letteratura tecnico-scientifica di settore come *Construction and Demolition Waste* (CDW) *Aggregates*, derivano dai rifiuti generati nel corso della costruzione, manutenzione e demolizione di edifici e opere civili. I costituenti principali sono: (i) i materiali ceramici (mattoni, ceramiche e piastrelle), (ii) le malte e i calcestruzzi, (iii) le miscele bituminose prodotte con la fresatura e la demolizione delle strade, (iv) le terre e rocce da scavo. I CDW sono prodotti in quantità elevate, al punto che il loro smaltimento nelle discariche rappresenta un problema. I dati del "Rapporto Rifiuti Speciali" del 2016 (ISPRA, 2016)indicano una produzione di circa 721 milioni di tonnellate all'anno di CDW in Europa.Per il dato nazionale è indicata, invece, una produzione annua superiore a 50 milioni di tonnellate (ISPRA, 2016).

Nel corso degli ultimi anni è stato registrato un crescente interesse verso i CDW vista la loro disponibilità, ma anche e soprattutto considerate le potenzialità di un loro riuso nel ciclo costruttivo. Al riguardo, la Direttiva 2008/98/EC la Commissione Europea ha fissato l'ambizioso obiettivo di incrementare al 70% la quantità di materiali di riciclo da rifiuti di CDW nelle costruzioni stradali entro il 2020(Boeva et al., 2016).

Diversi sono inoltre i vantaggi di carattere ambientale dovuti all'utilizzo dei materiali da riciclo per le costruzioni stradali. Il riciclo e il riuso dei CDW comporta infatti molti benefici per l'ambiente, (EPA, 2018) quali:

- la limitazione degli impatti ambientali tramite la riduzione dell'estrazione e il consumo di risorse primarie;
- la salvaguardia di risorse naturali non rinnovabili;
- la riduzione dei volumi di rifiuti destinati alle discariche, con conseguente salvaguardia del suolo;

• la riduzione del costo delle costruzioni, considerando che i materiali da rifiuto hanno un costo minore degli aggregati di origine naturale.

1.2 Piano di gestione dei rifiuti

La Direttiva 2008/98/EC indica un ordine gerarchico per la gestione dei rifiuti, con il quale è stabilito ciò che costituisce, in linea di principio, la migliore opzione ambientale. Come mostrato in Figura 1, la priorità è volta a minimizzare la quantità di rifiuti prodotti (prevenzione). Quando ciò non è possibile sono rispettivamente da preferire il riuso, il riciclaggio e il recupero (per esempio in termini energetici) del rifiuto. Lo smaltimento in discarica si adotta quando nessuna delle precedenti opzioni è attuabile.



Figura 1. Gerarchia del piano di gestione dei rifiuti definita dalla direttiva 2008/98/EC

Tuttavia, questo ordine di priorità non garantisce sempre la minimizzazione degli impatti ambientali del sistema di gestione dei rifiuti. Infatti, la Commissione Europea (European Commission Communication, n. 666 del 2005) raccomanda di eseguire un'analisi LCA congiuntamente all'applicazione della Gerarchia dei Rifiuti. Dunque, variazioni dell'impostazione gerarchica, a seguito di un'analisi LCA, sono possibili per specifiche tipologie di rifiuti e in determinate circostanze, così da poter assicurare la soluzione meno impattante (Boeva et al., 2016). Al fine di definire le strategie che possono comportare un miglioramento delle prestazioni ambientali dei sistemi di gestione dei rifiuti, la metodologia LCA deve essere applicata a tutti i processi, compresi quelli che attengono allo smaltimento o alla trasformazione del rifiuto in un prodotto di mercato. Operando in questo modo è possibile individuare le fasi di processo dei rifiuti che danno il maggior contributo in termini di impatto ambientale, e inoltre determinare

certi aspetti che potrebbero essere migliorati (Mercante et al., 2012). Relativamente al piano di gestione dei CDW, la demolizione è una fase del processo di produzione del rifiuto che deve essere effettuata con attenzione,in quanto da questa operazione può scaturire una diversa gestione del rifiuto. Il tipo di demolizione può infatti influire significativamente sulla qualità del rifiuto e determinare quindi la possibilità o meno di riutilizzarlo o riciclarlo. Sono due i tipi di demolizione che è possibile eseguire: quella selettiva e quella non-selettiva. Nel primo caso, i materiali da rifiuto sono suddivisi in frazioni omogenee della stessa origine, in modo tale da rendere più semplice l'operazione di riciclo e aumentare la convenienza del recupero. Nel secondo caso, il materiale è eterogeneo e al suo interno possono trovarsi frazioni di materiale indesiderato (es. carta, plastica, gesso) che impoveriscono la qualità dell'aggregato riciclato,motivo per il quale non è sempre conveniente il recupero e il riciclo del rifiuto. Con la prima metodologia si producono i cosiddetti Selected CDW Aggregates (SCDWA), con la seconda si generano gli Unselected CDW Aggregates (UCDWA).

L'utilizzo della metodologia LCA per la gestione dei rifiuti è recente. Laurent et al. (2014) hanno dichiarato che nonostante i rifiuti da costruzione e demolizione rappresentino una percentuale significativa dei rifiuti solidi, pochi studi sono stati indirizzati negli anni alla loro gestione. Nel 2009 Blenginiet al. (2009) hanno condotto uno studio LCA sul processo di demolizione di un edificio residenziale, giungendo alla conclusione che il riciclo dei materiali prodotti portasse dei vantaggi sia per gli aspetti di tipo ambientali che energetici. L'anno seguente Blengini e Garbarino(2010)hanno condotto una ricerca volta ad analizzare le implicazioni ambientali nella catena di riciclaggio dei CDW nel territorio della provincia di Torino. La catena di riciclaggio dei CDW si è dimostrata eco-efficiente e l'analisi LCA ha evidenziato come il trasporto sia uno dei processi della catena che dà un alto contributo in termini di impatto ambientale.

Ad oggi sarebbe necessario un approfondimento dell'applicazione della metodologia LCA per la valutazione del sistema di gestione dei rifiuti. È essenziale, ad esempio, avere accesso ad un'elevata qualità di dati di inventario, pertinenti a diverse aree geografiche. Questo perché la qualità dei risultati di uno studio LCA dipende largamente dalla qualità dei dati di inventario utilizzati (Mercante et al., 2012).

1.3 CDW: potenziale di applicazione nelle costruzioni stradali

Gli aggregati da CDW possono essere impiegati in alcune significative applicazioni nella costruzione delle strade. In particolare, questi materiali possono trovare impiego nei rilevati stradali e ferroviari, negli strati di sottofondo e di fondazione delle pavimentazioni stradali; possono essere anche impiegati nei riempimenti di trincee per sottoservizi. La fattibilità dell'utilizzo del materiale riciclato nelle costruzioni stradali è stata comprovata da numerosi studi. Jimenez et al. (2012) e Del Rey et al. (2016)hanno dimostrato come le prestazioni meccaniche degli aggregati da CDW, quando impiegati nella costruzione di strati non legati della sovrastruttura e del corpo stradale, possano essere paragonate a quelle degli aggregati naturali.

Altrettante ricerche attestano inoltre che il riciclo e l'impiego di CDW sia vantaggioso anche dal punto di vista ambientale, qualora impiegato per la costruzione di una strada. Ad esempio Santagata et al. (2013) hanno condotto un'analisi LCA sull'uso del RAP per la formazione degli strati di fondazione e di base della pavimentazione stradale dell'autostrada Milano-Napoli. Al fine di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi relativi all'impiego di RAP negli strati della pavimentazione, le analisi LCA sono state condotte considerando due scenari. Lo Scenario 1 corrisponde alla pavimentazione nel cui strato di base e fondazione è impiegato RAP, lo Scenario 2 corrisponde ad una pavimentazione caratterizzata dalla presenza di uno strato di base in conglomerato bituminoso e fondazione in misto cementato. Dal confronto dei risultati ottenuti per i due scenari è emerso che l'impiego del RAP comporta una riduzione significativa degli impatti ambientali (-42% del consumo di energia e -37% dell'emissione di gas serra). Araujo et al. (2014)hanno applicato l'analisi LCA all'aggiunta di RAP in sostituzione dell'aggregato naturale per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi. I risultati hanno mostrato che l'utilizzo di RAP in maggiori dosi comporti una riduzione delle emissioni gassose in atmosfera. Nel caso specifico di aggiunta del 50% di RAP è stata stimata una riduzione del 3% del consumo di energia, del 23% di emissioni di SO₂e circa del 15% di CH₄, NO₂ e NO_X. Chowdhury et al. (2010)hanno invece impiegato l'analisi LCA per confrontare i risultati dell'uso di ceneri volanti e calcestruzzo riciclato (RC) come sostituti di aggregati naturali nelle miscele di conglomerato bituminoso per pavimentazioni stradali. Sono stati presi in considerazione le categorie d'impatto del riscaldamento globale, del potenziale di acidificazione e di tossicità. I migliori risultati

sono stati raggiunti dalle ceneri volanti, mentre l'RC è risultato avere degli impatti più bassi degli aggregati naturali solamente per le categorie d'impatto relative alla tossicità.

1.4 CDW stabilizzati

L'aggregato riciclato può essere utilizzato in due condizioni differenti: non stabilizzato (miscelato e compattato con sola acqua), oppure stabilizzato con l'aggiunta di leganti. Tra le tecniche di stabilizzazione degli aggregati riciclati da CDWA possono essere elencate:

- reazioni di idratazione con leganti idraulici classici, come il cemento Portland;
- reazioni chimiche di idratazione da sotto-prodotti reattivi e/o leganti alternativi, come le polveri da elettrofiltro (CKD);
- attivazione alcalina di sottoprodotti industriali, quali loppe di altoforno o ceneri volanti;
- attivazione alcalina del componente di granulometria fine degli stessi aggregati da CDW.

Le polveri da elettrofiltro sono scarti del processo di produzione del clinker, e sono costituti da particelle della dimensione del micron raccolte da un precipitatore elettrostatico. Inoltre queste particelle sono caratterizzate da un basso livello di ossidi se rapportatati a quelli contenuti nel cemento Portland (OPC) (Bassani et al., 2017).

L'attivazione alcalina avviene mediante alcune reazioni chimiche tra le componenti allumino-silicatiche (anche fosfatiche e boriche in misura minore) presenti nei CDW, loppe d'alto forno e ceneri volanti ed una soluzione alcalina attivamente formata tipicamente da idrossido e silicato di sodio. Il processo di attivazione alcalina è costituito da più fasi:

- 1. dissoluzione degli ioni OH;
- 2. riorganizzazione e diffusione delle specie disciolte;
- 3. condensazione e indurimento delle strutture in sistemi polimerici inorganici. (Pacheco-Torgal et al., 2008)

Questa reazione chimica prende anche il nome di "geopolimerizzazione", in quanto porta alla formazione di materiali definiti come geopolimeri.Il termine "geopolimero" fu introdotto da Davidovits che considera tali prodotti al pari dei tradizionali "polimeri" in quanto si trasformano, polimerizzano e si induriscono a basse temperature, "geo" perché costituiti da componenti inorganiche.

Diversi sono stati gli studi indirizzati alla valutazione della sostenibilità ambientale dei geopolimeri, dai quali è emerso come il maggior impatto ambientale sia principalmente dovuto al tipo e alla concentrazione della soluzione alcalina impiegata per l'attivazione del processo (Passuello et al., 2017). La soluzione chimica più comunemente usata come attivatore nella sintesi del geopolimero è quella costituita da silicato di sodio (o silicato di potassio) e idrossido di sodio. Proprio questi composti chimici influenzano in modo negativo il carico ambientale del ciclo di vita dei materiali geopolimerici. I risultati di uno studio condotto da Salas et al. (2018) hanno evidenziato come la produzione di 1000 kg di soluzione solida concentrata al 48% di silicato di sodio richieda 209 kg di idrossido di sodio solido al 100%. L'idrossido di sodio è dunque la principale materia prima nella produzione del silicato di sodio e può comportare un grande effetto sull'onere ambientale dovuto al processo di produzione del silicato di sodio. Diversi studi si sono focalizzati sull'ottimizzazione del processo di produzione dell'idrossido di sodio ed è stato dimostrato come tale processo di ottimizzazione riduca il potenziale d'impatto della soluzione alcalina e dunque conseguentemente del geopolimero.

Al fine di valorizzare l'uso dei rifiuti e dei sottoprodotti industriali e di ridurre, al tempo stesso, il costo di produzione dei leganti geopolimerici, è stato promosso lo sviluppo di attivatori alcalini alternativi. Questi ultimi sono ottenuti dalla combinazione di alcali con fonti di silicio amorfe provenienti dai rifiuti, ad esempio le ceneri derivanti dalla bruciatura della lolla di riso (Passuello et al., 2017).

Capitolo 2-Materiali e metodi

Dal precedente capitolo è emerso come negli ultimi anni sia stato registrato un crescente interesse verso l'utilizzo di CDW per le costruzioni stradali, vista la loro ampia disponibilità da un lato, ma anche e soprattutto considerate le potenzialità di carattere ambientale di un loro riuso nel ciclo costruttivo dall'altro. In questo contesto si colloca il seguente lavoro di tesi, in cui per lo strato di fondazione di una pavimentazione flessibile sono state effettuate e comparate le prestazioni ambientali di diverse miscele in misto granulare realizzate con aggregati da CDW e di aggregati naturali (riferimento sperimentale). L'obbiettivo è stato di valutare se la scelta di materiali alternativi a quelli comunemente utilizzati nelle costruzioni delle strade possa migliorare le prestazioni ambientali dell'opera.

L'obbiettivo sperimentale è stato perseguito suddividendo lo studio in due fasi: dapprima, sono state svolte specifiche analisi prestazionali di una pavimentazione flessibile, per la quale successivamente è stata eseguita un'analisi dettagliata del ciclo di vita. Prima sono stati individuati i materiali da impiegare in ogni strato della pavimentazione compresa la scelta dei diversi materiali per lo strato di fondazione da mettere a confronto, oltre che valutare e definire le metodologie utili al caso in esame per effettuare le analisi prestazionali strutturali e ambientali. In particolare, in questo capitolo sono definite:

- le caratteristiche compositive di ogni materiale della pavimentazione;
- le metodologie di calcolo per la caratterizzazione meccanica dei materiali,oltre che uno studio approfondito per i materiali in fondazione, per i quali sono stati valutati mediante analisi specifiche sia la scelta del codice di calcolo da utilizzare sia del modello costitutivo rappresentativo del loro comportamento;
- i criteri di stima dei fenomeni di degrado e dei fattori che condizionano in maniera incisiva le prestazioni di una pavimentazione;
- le regole di applicazione della metodologia LCA assunta per le valutazioni ambientali.

2.1 Materiali

La scelta dei materiali da impiegare nella pavimentazione in esame è stata eseguita secondo i criteri delle norme tecniche del capitolato CIRS tenendo conto della tipologia di pavimentazione, del compito che ogni strato che la compone deve assolvere, oltre che delle condizioni in opera in cui si trova. Inoltre per lo strato di fondazione si è scelto di impiegare diversi materiali di confronto tra aggregati di CDW e naturali, così da avere un ampio ventaglio di soluzioni e comprendere meglio quale tra esse possa migliorare le prestazioni di un'opera stradale.

2.1.1 Composizione della pavimentazione

La pavimentazione o sovrastruttura è la parte del corpo stradale costituita da strati di materiali e spessori diversi, che si sovrappongono a un piano detto sottofondo. In base alla rigidezza del materiale impiegato in questi strati si distinguono due diverse famiglie di sovrastrutture, quelle flessibili e quelle rigide. Nel caso in esame le analisi numeriche sono effettuate per una generica pavimentazione flessibile di una strada extraurbana secondaria, localizzata in provincia di Torino. Tale pavimentazione è composta da un pacchetto di strati di materiale legato (conglomerati bituminosi) e da una fondazione posti sopra il sottofondo come indicato in Figura 2.

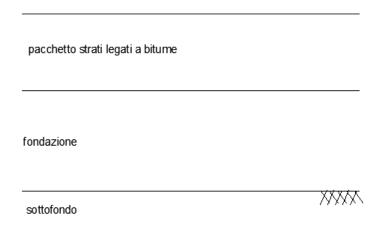


Figura 2. Rappresentazione della stratigrafia di una pavimentazione flessibile

2.1.2Strati legati della pavimentazione

Gli strati legati di una pavimentazione di tipo flessibile costituiscono la parte sommitale della sovrastruttura stradale. Essi formano un pacchetto costituito dagli strati di base, di

collegamento e di usura, quest'ultimo a diretto contatto con il traffico veicolare (Figura 3).

Gli strati di usura e di collegamento hanno il compito di soddisfare le esigenze di comfort e sicurezza dalla circolazione stradale. l'impermeabilizzazione del corpo stradale, oltre che contribuire in maniera significativa alla portanza dell'intera sovrastruttura. Lo strato di base ha un'importante funzione strutturale, ovvero ripartire le pressioni verticali e assorbire l'azione flettente dovuta ai carichi stradali

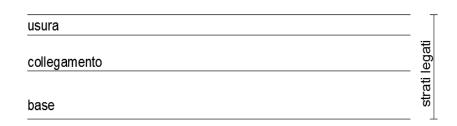


Figura 3. Rappresentazione della stratigrafia dello strati legati

Ciascuno degli strati del pacchetto legato è realizzato con miscele di conglomerato bituminoso di caratteristiche diverse. Il bitume è il legante della miscela e gli aggregati lo scheletro litico. L'intero volume del conglomerato bituminoso non è costituito, però, da solo bitume e aggregati. In esso è presente anche una fase gassosa rappresentata da vuoti, per consentire, entro certi limiti, la dilatazione del bitume.

Il bitume che è stato considerato nella pavimentazione di riferimento è del tipo40/60. La norma UNI EN 1259 prescrive valori dell'indice di penetrazione e della temperatura di rammollimento indicati in Tabella 1; per il bitume in esame, i valori medi di ciascun intervallo di accettazione sono stati considerati.

Tabella 1. Specifiche dei bitumi di classe 40/60.

	Classe 40/60
Penetrazione a 25 ° C (dmm)	40-60
Punto di rammollimento (Palla e Anello) (°C)	48-56

Relativamente alle proporzioni volumetriche dei vari componenti della miscela, in conformità all'articolo quattro del capitolato CIRS, in Tabella 2 sono definite le percentuali assunte di legante totale e dei vuoti, riferite al peso degli aggregati. Nella Tabella 3 sono invece forniti i valori di massa volumica rispettivamente degli aggregati e del bitume.

Tabella 2. Percentuale di legante totale e di vuoti, riferita al peso degli aggregati

STRATO	P _b %	v%	
usura	0.06	0.04	
collegamento	0.05	0.06	
hasa	0.045	0.08	
base -	0.045	0.08	

Tabella 3. Massa volumica degli aggregati e del bitume

	Υ	(Kg/m³)
Bitume	Ϋ́ _b	1020
Aggregato	Ϋ́a	2700

Il conglomerato bituminoso è un materiale che mostra un comportamento viscoelastico e termoplastico dipendente dalla temperatura e dal tempo di carico. Per esso le proprietà reologiche possono essere sintetizzate dal modulo di rigidezza E, definito come il rapporto tra la tensione e la deformazione corrispondente, e dal coefficiente di Poisson (v).

Per il calcolo del modulo di rigidezza ci si è avvalsi del codice di calcolo BANDS. Questo software consente la stima delle proprietà meccaniche del bitume e del conglomerato bituminoso. Lo strumento utilizzato per la determinazione del modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso è SMIX (*Asphalth Mix Stiffness Prediction*), il quale rappresenta la versione computerizzata del nomogramma di Ugé (Figura 4), mentre lo strumento utilizzato per il calcolo del modulo di rigidezza del bitume è SBIT (*Bitumen Stiffness Prediction*). Tale strumento rappresenta la versione computerizzata del diagramma di Van der Poel, riportato in Figura5.

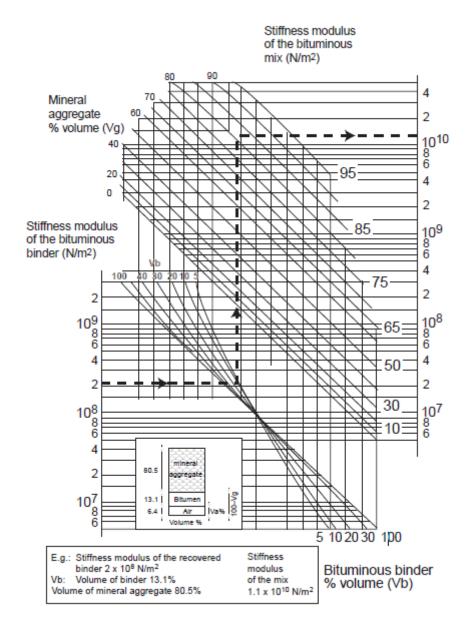


Figura 4. Nomogramma di Ugé.

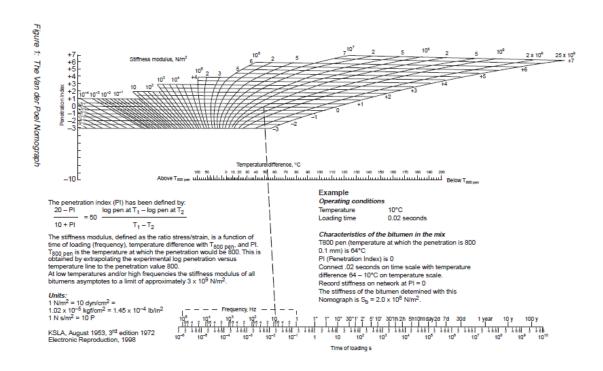


Figura 5. Nomogramma di Van der Poel

Per il conglomerato bituminoso, il coefficiente di Poisson v rappresenta, insieme al modulo di rigidezza, un importante parametro utile alla descrizione del suo comportamento meccanico. Il coefficiente di Poisson dipende dalla temperatura, dal livello di deformazione assunto e dalla frequenza. Tuttavia, per semplicità, si assume la sola dipendenza dalla temperatura come riportato in Tabella 4.

Tabella 4. Coefficiente di Poisson

Temperatura	
0-10	0.25
20	0.35
30	0.45

Prima della realizzazione di uno strato in conglomerato bituminoso è necessario preparare la superficie di stesa mediante l'applicazione di emulsioni bituminose. A seconda che lo strato sia in misto granulare o in conglomerato bituminoso la lavorazione corrispondente prende il nome di mano d'ancoraggio o mano d'attacco. Per mano d'ancoraggio si intende un'emulsione bituminosa applicata sopra uno strato in misto granulare, mentre per mano d'attacco si intende un'emulsione bituminosa applicata sopra

uno strato in conglomerato bituminoso. Il materiale da impiegare per la realizzazione della mano d'ancoraggio è rappresentato da un'emulsione bituminosa cationica, applicata con un dosaggio di bitume residuo almeno pari ad 1.0 kg/m²; mentre il materiale da impiegare per la realizzazione della mano d'attacco è rappresentato da un'emulsione bituminosa cationica, dosata in modo che il bitume residuo risulti pari a 930 kg/m² (articolo 4, capitolato CIRS). Nella Tabella 5 è riportata la percentuale di contenuto d'acqua in peso dell'emulsione bituminosa cationica impiegata per la produzione della mano d'ancoraggio e della mano d'attacco.

Tabella 5. Percentuale del contenuto d'acqua in peso per l'emulsione bituminosa

	Emulsione bituminosa	Contenuto d'acqua % peso		
mano d'ancoraggio	cationica 55%	45±2 %		
mano d'attacco	cationica 65%	40±2 %		

2.1.3 Fondazione

La fondazione è lo strato di una sovrastruttura stradale posto tra lo strato legato e il terreno di sottofondo. Essa contribuisce alla portanza della sovrastruttura Per la costruzione dello strato di fondazione sono impiegati i cosiddetti misti granulari, miscele di aggregati lapidei selezionati. Nel caso in esame sono state considerate nove diverse miscele di misto granulare, realizzate mediante l'impiego di aggregati naturali tal quali o stabilizzati con cemento, oppure mediante l'utilizzo di aggregati da CDW tal quali o stabilizzati con soluzione alcalina (SA) oppure con polveri da elettrofiltro (CKD) o cemento (OPC) (Figura 6).

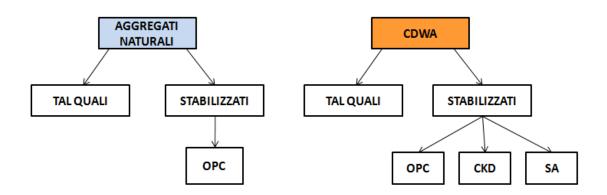


Figura 6. Tipologie di materiali impiegati nello strato di fondazione

Il cemento utilizzato per stabilizzare l'aggregato naturale è un cemento Portland con classe di resistenza normalizzata pari a 42.5 MPa, CEM-I 42.5R. Per la stabilizzazione degli aggregati riciclati è stato considerato un cemento Portland composito (alla pozzolana) con classe di resistenza normalizzata 32.5 MPa, CEM-II 32.5R. La soluzione alcalina considerata per l'attivazione alcalina delle particelle più fini degli aggregati da CDW è composta dal 20% in peso di idrossido di sodio (NaOH) e dall'80% in peso di silicato di sodio (Na₂SiO₃).

In particolare sono stati considerati due miscele in misto granulare con aggregati naturali, quali: N1_{ns} che rappresenta il materiale naturale tal quale ed N2_{opc} che è l'aggregato naturale stabilizzato a cemento (CEM I 42.5 R). Tali materiali differiscono inoltre per il diverso contenuto d'acqua così come per il grado di maturazione Tre sono invece le miscele in misto granulare con aggregati di CDW non stabilizzati, rispettivamente R1_{ns},R2_{ns}ed R3_{ns}, realizzate con un diverso contenuto d'acqua e considerando un diverso grado di maturazione. Tra le miscele in misto granulare con aggregati da CDW stabilizzati si è scelto di indagare quattro diverse soluzioni, quali: miscele con aggregati di CDW stabilizzate a cemento R4_{opc}, con polveri da elettrofiltro R4_{ckd}, e le miscele R5_{sa} R6_{sa}di aggregati da CDW stabilizzate con soluzione alcalina. Quest' ultime due in particolare sono due miscele diverse in quanto caratterizzate da valori differenti di percentuale della soluzione stabilizzante e del contenuto d'acqua.

Nella Tabella 6 sono riportati i dati relativi alla composizione e i valori di massa volumica secca delle nove miscele di misto granulare impiegate nello strato di fondazione.

Tabella 6. Dati relativi alla composizione delle miscele in misto granulare.(Tipologia di aggregato, agente stabilizzante, percentuale massa aggregato stabilizzante, contenuto d'acqua %ww, grado di maturazione e massa volumica secca).

MATERIALI	AGGR.	AGENTE STAB.	% MASSA AG.STAB.	%WW	MATURAZ.	MV secca (kg/m³)
N1 _{ns}	naturale			3	0 giorni	2250
N2 _{opc}	naturale	CEM I 42.5 R	3	6.5	28 giorni	2224
R1 _{ns}	cdw			10.7	28 giorni	1994
R2 _{ns}	cdw			6.6	28 giorni	2064
R3 _{ns}	cdw			7.5	0 giorni	1957
R4 _{opc}	cdw	CEM II/B-P32.5 R	4	11.7	28 giorni	1948
R4 _{ckd}	cdw	ckd	10	12.3	28 giorni	1894
R5 _{sa}	cdw	sa	10.8	6.6	28 giorni	2052
R6 _{sa}	cdw	sa	11	6.7	28 giorni	2114

Per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali in fondazione è stato eseguito uno studio approfondito, valutando mediante analisi specifiche sia la scelta del codice di calcolo da utilizzare per la caratterizzazione meccanica che del modello costitutivo rappresentativo dei materiali indagati. La trattazione completa di questo argomento è descritta nel paragrafo 2.2 Scelta del codice di calcolo e del modello costitutivo di riferimento per i materiali indagati

2.1.4 Sottofondo

Il sottofondo è lo strato su cui poggia la sovrastruttura. Il materiale impiegato per la realizzazione del sottofondo è di norma un terreno non vegetale. Nel caso in esame è stato considerato un terreno di classe A1-a., il quale secondo la classificazione CNR UNI 10006/63 si presta bene a costituire ottimi strati di sottofondo

Per ciò che concerne le prestazioni meccaniche in opera, il sottofondo è considerato come semispazio infinitamente esteso a comportamento elastico e isotropo, il cui comportamento meccanico può essere definito da un modulo elastico e dal coefficiente di Poisson. In conformità all'articolo 1 del capitolato CIRS,nel caso in esame(sottofondo di una strada extraurbana secondaria) è considerato un modulo elastico di 50 MPa. Per quanto riguarda il coefficiente di Poisson, poiché esso generalmente varia da un valore di 0.30, per terreni granulari, a 0.50 per terreni fini a spiccato comportamento plastico, è assunto un valore appartenente a questo intervallo a pari a 0.45.

2.2 Scelta del codice di calcolo e del modello costitutivo di riferimento per i materiali indagati

In questa prima fase di studio sono state eseguite alcune analisi finalizzate (1) alla scelta del modello costitutivo di riferimento per i materiali indagati e (2) alla valutazione del codice per l'analisi strutturale della pavimentazione flessibile. I codici di calcolo posti a confronto sono BISAR3.0 e KENLAYER, mentre i modelli costitutivi indagati sono il modello MEPDG e quello di HICKS-MONISMITH.

Mediante i codici di calcolo BISAR3.0 e KENLEYER è eseguita un'analisi del comportamento meccanico della pavimentazione flessibile (Figura 7).

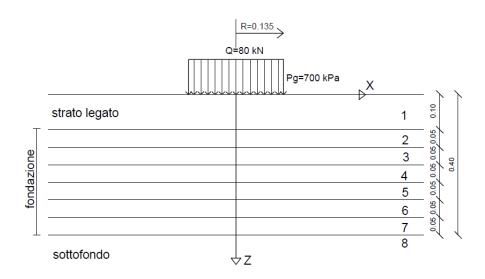


Figura 7. Stratigrafia della pavimentazione e carico di riferimento

Lo strato superiore della pavimentazione è stato considerato, per ragioni di semplicità di calcolo, come uno strato unico con uno spessore di 10cm; la fondazione è caratterizzata da uno spessore di 30cm partizionato in 6 sotto-strati ciascuno dei quali di spessore 5cm, il sottofondo costituisce il semispazio infinito. Nel caso in esame per lo strato di fondazione, è stata considerata una miscela caratterizzata da aggregati da CDW non stabilizzati, denominata come $R2_{NS(7)}$ (vedi Tabella 7). È stato scelto questo materiale come rappresentativo delle miscele oggetto d'indagine. I calcoli sono stati

eseguiti prevedendo un carico standard, costituito dall'asse da 80 kN a ruote singole con pressione di gonfiaggio di 700 kPa e raggio d'impronta di 13.5 cm.

Tabella 7. Dati relativi alla composizione della miscela R2_{NS(7)}

MATERIALI AG	GR. AGENTE STAB.	% MASSA . AG.STAB.	%WW	MATURAZ.	MV secca (kg/m³)
	lw	. //(0.01/1.5)	8.6	7davs	2056

I programmi utilizzati per l'analisi strutturale assumono la pavimentazione flessibile al pari di un multistrato elastico composto da:

- un complesso di strati orizzontali di spessore costante posti sopra il semispazio elastico infinito;
- un'estensione infinita degli strati in direzione orizzontale;
- materiali omogenei e isotropi;
- materiali elastici che hanno una relazione tensioni-deformazioni di tipo lineare.

È noto invece che i materiali non legati, come le terre e misti granulari, mostrano caratteristiche di anisotropia, non linearità, e anche di dipendenza dal tempo. Nonostante ciò, per ragioni di semplicità, è possibile considerare valide le ipotesi di multistrato elastico assunte dai programmi di calcolo, ad esclusione della non-linearità del comportamento. Quindi, per tenere conto di tali effetti,è stato seguito un procedimento di tipo iterativo automatico per il programma di calcolo KENLAYER, manuale per il codice di calcolo BISAR3.0. Per rappresentare in modo verosimile il comportamento meccanico dei materiali non legati è utile riferirsi a parametri meccanici derivanti dall'interpretazione quasi-lineare del loro comportamento sotto carico. Per i codici di calcolo che considerano il multistrato elastico il parametro più idoneo è considerato il modulo resiliente M_r. Nel seguente studio è stato scelto di concentrare l'analisi sulla caratterizzazione meccanica del solo strato di fondazione e di eseguire tale analisi facendo riferimento al modello costitutivo semplificato di Hicks-Monismitheal modello MEPDG. Per il modello di Hicks-Monismith, come mostrato in Figura 8, il modulo resiliente è messo in relazione al primo invariante delle tensioni. L'equazione che lo definisce risulta pertanto la seguente:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \tag{eq.2.1}$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{eq.2.2}$$

• ove k_1 e k_2 rappresentano le costanti ottenute dall' analisi di regressione sui dati sperimentali, mentre θ è il primo invariante;

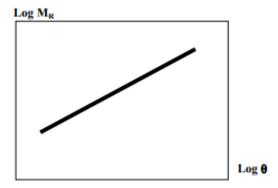


Figura 8. Modello di Hicks-Monismith

Per MEPDG il modulo resiliente èstimato mediante il seguente modello:

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{k_3}$$
 (eq.2.3)

dove:

- p_aè la pressione atmosferica e assunta pari a p_a=0,101325 MPa;
- $\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 \sigma_2)^2 + (\sigma_1 \sigma_3)^2 + (\sigma_2 \sigma_3)^2}$ (eq.2.4) è la tensione di taglio ottaedrica;
- k_1, k_2 e k_3 rappresentano le costanti ottenute dall' analisi di regressione sui dati sperimentali.

Partendo da valori di modulo resiliente di primo tentativo, tramite un calcolo iterativo per successive approssimazioni si giunge alla definizione dei valori di modulo per ogni strato non lineare della fondazione. Il valore del modulo elastico è determinato facendo riferimento allo stato tensionale di punti specifici. Questi punti sono chiamati *stress point* e nel caso in esame sono posti a metà di ciascun sotto-strato, lungo la linea di distribuzione del carico (SLD =0.5), come mostrato in Figura 9.

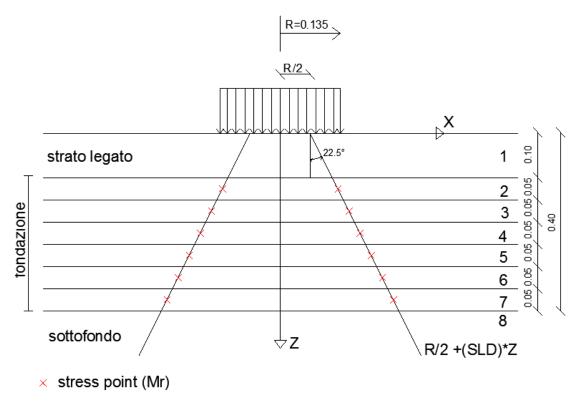


Figura 9. Rappresentazione geometrica degli stress point

Essendo l'obiettivo dello studio la caratterizzazione meccanica del materiale di fondazione, per ragioni di semplicità di calcolo, per lo strato legato e per quello di sottofondo non è stata eseguita una caratterizzazione meccanica, masono stati considerati valori a priori noti sia del modulo elastico che del coefficiente di Poisson.

Per lo strato sommitale è stato assunto:E = 500 MPa, e v = 0.35. Per lo strato di sottofondo sono stati assunti $M_r = 100$ MPa e v = 0.45.

In una prima fase, l'analisi strutturale della fondazione è stata eseguita mediante l'utilizzo del codice di calcolo BISAR3.0 e KENLAYER, considerando come modello costitutivo quello di Hicks-Monismith. Utilizzando due software differenti è possibile evidenziare eventuali analogie e differenze nella caratterizzazione meccanica, quindi essere guidati nella scelta del codice di calcolo che meglio si presta alle analisi. In Figura 10 sono riportati, per tutte le iterazioni effettuate, i valori di modulo di uno strato della fondazione.

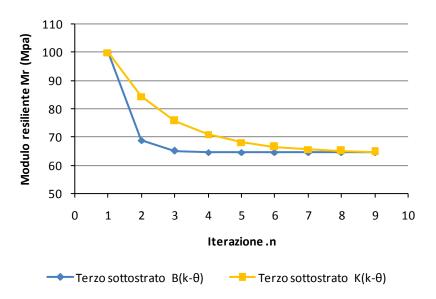


Figura 10. Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith.

Dall' analisi dei dati in Figura 10 si deduce che raggiunta la convergenza si ha una perfetta coincidenza dei valori di modulo ottenuti dai due programmi di calcolo. Il comportamento dello strato analizzato in Figura 10 è rappresentativo di ogni strato della fondazione, quindi le considerazioni precedentemente fatte possono essere considerate valide per ogni strato.

In una seconda fase la caratterizzazione meccanica della fondazione è eseguita mediante l'utilizzo del modello costitutivo MEPDG e quello semplificato di Hicks-Monismith, utilizzando il solo codice di calcolo BISAR3.0, in quanto KENLAYER consente l'utilizzo del solo modello semplificato di Hicks-Monismith. Il confronto tra i due modelli costitutivi permette di capire qual è più rappresentativo per la caratterizzazione meccanica dei materiali non legati. In Figura 11 sono riportati, per tutte le iterazioni effettuate, i valori di modulo resiliente di uno strato rappresentativo del comportamento di ciascun strato della fondazione.

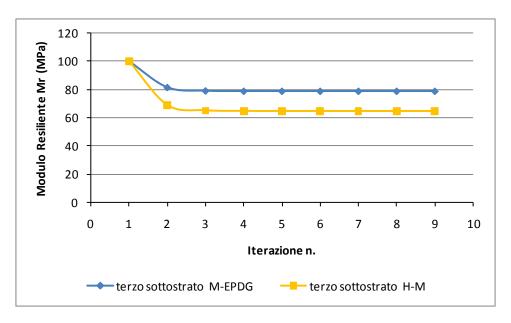


Figura 11. Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.

Dall'analisi dei dati in Figura 11 si deduce che raggiunta la convergenza non si ha una coincidenza dei valori di modulo. Questo risultato è dovuto al carattere più performante del modello MEPDG il quale,a differenza del modello di Hicks-Monismith, tiene conto oltre che del primo invariante delle tensioni anche della tensione ottaedrica.

Dall'analisi dei risultati condotti nella prima fase potrebbe dedursi che l'utilizzo di uno dei due codici sia equivalente al fine di una caratterizzazione meccanica in quanto a convergenza i valori di modulo resiliente coincidono. In realtà il codice di calcolo KENLAYER non consente l'utilizzo del modello costitutivo MEPDG che risulta essere più performante rispetto a quello di Hicks-Monismith; dunque alla luce di queste considerazioni è opportuno che le successive analisi siano condotte mediante l'utilizzo del codice di calcolo BISAR e del modello costitutivo MEPDG.

Per una comprensione completa delle analisi effettuate è possibile visionare gli elaborati di calcolo e i grafici presenti in Allegato 1e 2.

2.3Metodologie di calcolo per la valutazione delle prestazioni strutturali

Nel corso della vita utile della pavimentazione è necessario garantire i seguenti requisiti fondamentali:

- aderenza;
- regolarità;
- portanza;
- durabilità.

Tali prestazioni devono essere soddisfatte in modo che la pavimentazione possa assolvere la funzione di protezione del corpo stradale dalle azioni del traffico e dell'ambiente, nonché garantire il moto regolare e sicuro dei veicoli.

Durante la vita utile della pavimentazione, l'ambiente in cui è inserita l'opera stradale, così come il traffico a cui è soggetta, sono fattori che,se non sono previsti lavori di manutenzione, possono condizionare in maniera incisiva le prestazioni di una pavimentazione. L'ambiente influisce sulle caratteristiche chimiche e fisiche dei materiali della sovrastruttura riducendo la vita utile della strada. Tra le varie condizioni ambientali appaiono più incisive le variazioni della temperatura dell'aria, della radiazione solare, del livello della falda acquifera, delle piogge e del gelo. Tuttavia, l'elemento che più di tutti modifica la risposta meccanica di una sovrastruttura è la temperatura dell'aria, la quale altera di continuo il comportamento meccanico dei materiali legati a bitume. Il traffico produce un progressivo deterioramento delle condizioni iniziali di servizio di una strada, in termini di portanza, stabilità e durabilità di una pavimentazione. Tale deterioramento è dovuto all'intensità del transito e dal carico trasportato dai mezzi commerciali, così come dalla velocità e tempo di applicazione del carico.

Il decadimento delle prestazioni si accompagna a fenomeni visibili di degrado, come la fessurazione per fatica e l'accumulo di deformazioni permanenti, ossia dissesti caratteristici di una pavimentazione flessibile. La fessurazione per fatica è un fenomeno di degrado che si manifesta con la comparsa di fessure diffuse in superficie localizzate prevalentemente lungo le linee di passaggio dei pneumatici Figura 12.



Figura 12. Fessure dovute all' accumulo del danno di fatica.

Le fessure hanno origine dal lembo inferiore dello stato di base, maggiormente sollecitato da tensioni di trazione ripetute nel tempo, che si propagano verso l'alto grazie alla maggiore tensione che si concentra nei punti angolosi al vertice delle fessure. L'accumulo di deformazioni permanenti si manifesta con le ormaie, solchi longitudinali che si formano lungo le traiettorie percorse dai pneumatici Figura 13.



Figura 13. Fessure dovute all' accumulo di deformazioni permanenti

Queste deformazioni permanenti possono verificarsi negli strati legati o in quelli non legati, ma in funzione della forma dell'ormaia è possibile stabilire lo strato nel quale si sono accumulate. Se si ha un'ormaia ad elevata curvatura, ciò è da imputare alla deformazione dello strato legato della sovrastruttura, mentre se l'ormaia è molto estesa le deformazioni che si verificano sono dovute all'accumulo di deformazioni degli strati

non legati. Le ormaie, inoltre, producono gravi disagi alla circolazione stradale in quanto rendono irregolare la superficie di rotolamento, raccolgono l'acqua di pioggia e rendono difficile l'aderenza del pneumatico.

Nel seguente studio sono state condotte analisi strutturali relativamente al degrado di fessurazione a fatica, considerando questo fenomeno, tra i due, maggiormente condizionante in termini prestazionali per una sovrastruttura. Gli scenari considerati sono due:

- primo scenario: fissati gli spessori dello strato legato della pavimentazione, sono valutate le prestazioni in termini di vita utile al variare del materiale della fondazione;
- secondo scenario: fissate le prestazioni in termini di vita utile, per ciascun
 materiale considerato sono determinati gli spessori dello strato legato che
 garantiscono il raggiungimento della vita utile stabilita.

Le diverse tipologie di materiale considerate nello strato di fondazione, per i due scenari, sono quelle elencate al paragrafo 2.1.3.

Prima di entrare nel merito di come si articola il calcolo, è utile anticipare alcuni dettagli riguardanti le condizioni del traffico e del clima a cui la pavimentazione in esame è soggetta, nonché definire il criterio di stima del comportamento a fatica di una sovrastruttura.

2.3.1 Clima e traffico

Per valutare le prestazioni nei riguardi della resistenza a fatica sono utilizzate delle metodologie di calcolo che tengono conto delle specifiche condizioni ambientali e della ripetitività dei carichi stradali a cui la pavimentazione è soggetta.

I metodi di calcolo che tengono conto degli effetti della temperatura nel corso dell'esercizio di una pavimentazione sono molteplici. Tuttavia, nel caso in esame, è stato usato il metodo di Witczak secondo cui la temperatura della pavimentazione T_p alle varie profondità z rispetto alla superficie stradale è funzione della temperatura media dell'aria T_a secondo la seguente relazione:

$$T_p = (1.467 + 0.043z) + (1.362 - 0.005z)T_a$$
 (eq 2.5)

in cui la profondità z è valutata in cm e la temperatura T in °C.

La pavimentazione oggetto di analisi, come specificato al paragrafo2.1.1 Composizione della pavimentazione), è situata a Torino, in Piemonte. Per analizzare le condizioni di temperatura caratteristiche del clima in cui opera la pavimentazione sono di seguito considerate le temperature medie mensili, MMAT (*Mean Mounthly Air Temperature*), durante un anno solare (Tabella 8). Tali valori di temperatura sono ricavati dal sito https://it.climate-data.org/.

Tabella 8. Temperature medie mensili della città di Torino.

Mesi	G	F	М	Α	М	G	L	Α	S	0	N	D
MMAT (°C)	1.4	3.6	8.3	12.6	17.1	20.7	23.6	22.4	18.8	13	6.9	2.9

Per valutare l'effetto indotto dal traffico è necessario considerare i diversi carichi trasmessi dai veicoli più pesanti. I mezzi circolanti su strada possiedono molteplici configurazioni di carico e si distinguono, in base alla posizione geometrica dei carichi, in assi singoli, tandem e tridem, e in base al tipo di asse in ruote singole e ruote gemellate. Ciascun asse determina uno specifico danno, ma per semplificare l'onere dei calcoli, di norma, i danni prodotti dei vari assi sono resi equivalenti al danno prodotto da un opportuno numero di passaggi di un solo asse che viene preso a riferimento. L'asse di riferimento, o asse standard, è l'asse singolo da 80 kN, denominato ESAL (Equivalent Single Axle Load). In questo calcolo si considerano i carichi relativi ai soli mezzi pesanti (autocarri, autobus) aventi carico per asse superiore a 10 kN. Sono esclusi, invece, i veicoli leggeri caratterizzati da un carico per asse inferiore, in quanto il loro contributo al danno trasmesso alla sovrastruttura è trascurabile. Nel caso in esame è assunto un numero di cicli di carico di 5·10⁶ ESAL in 20 anni di vita utile, valore che può essere considerato verosimile per la strada extraurbana secondaria oggetto di studio. I mezzi di trasporto producono delle sollecitazioni di tipo impulsivo che possono essere assimilabili a tratti di onde sinusoidali aventi una frequenza in Hz pari alla velocità del mezzo, espressa in km/h, moltiplicata per 0.4. Considerando che le condizioni di maggiore danno si verificano per velocità medio basse, tra i 20 ed i 30 km/h, per il carico di riferimento è assunta una frequenza di applicazione di 8 Hz (Klomp et al., 1962).

2.3.2 Resistenza a fatica

L'ipotesi di Miner(1945) indica il criterio di calcolo più semplice alla stima del comportamento reale di una sovrastruttura nei riguardi del fenomeno di fatica. Tale ipotesi stabilisce che per i materiali perfettamente elastici la rottura per fatica si verifica quando la sommatoria dei rapporti tra in numero n_i di applicazioni del carico ed il numero N_i di cicli di deformazione che porterebbero a rottura il materiale è uguale all'unità. L'espressione analitica dell'ipotesi di Miner è la seguente:

$$DR (Damage Ratio) = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} (eq.2.5)$$

La stima del numero di cicli di carico che porterebbero a rottura il materiale per fatica è stata eseguita con il programma BANDS, di cui la Figura 14 fornisce la soluzione grafica dell'algoritmo di calcolo.

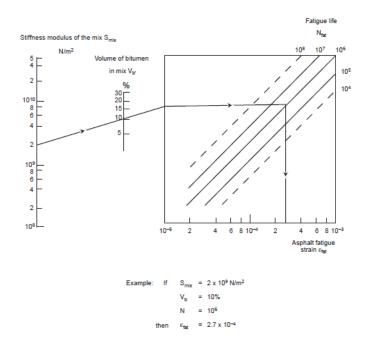


Figura 14. Nomogramma NFTA (Asphalt Mix Fatigue Life Prediction).

Per la stima della resistenza a fatica delle pavimentazioni bituminose,BANDS richiede tra i dati di input la percentuale di volume di bitume contenuto nel conglomerato bituminoso e il suo modulo di rigidezza, così come il valore della deformazione ϵ_r prodotta dal carico di riferimento, il quale transiterà n_i volte. Le deformazioni ϵ_r da

considerare sono le deformazioni orizzontali di trazione lungo la superficie inferiore dello strato di base in quanto è lì che si manifestano con maggiore intensità provocando l'innesco della fessurazione. Nel calcolo della resistenza a fatica il programma tiene conto del fenomeno di autoriparazione dei conglomerati bituminosi, secondo cui nel tempo che intercorre tra due transiti successivi, le microfessure che si formano tendono a richiudersi in misura tanto maggiore quanto più alta è la temperatura.

2.4Life Cicle Assessment

La *Life Cycle Assessment*(LCA) è stata riconosciuta come lo strumento analitico e scientifico per valutare il potenziale impatto ambientale di un prodotto ¹/processo ² (European Commission, 2003). Nell'analisi LCA, al fine di quantificare i materiali impiegati, il consumo di energia, le emissioni, e di valutare le conseguenze ambientali si fa riferimento all'intero ciclo di vita del prodotto/processo considerato. La metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO 14040-14044 (la cui versione attualmente in vigore è stata emanata nel 2006), mentre nel 2010 è stato pubblicato l'ILCD *Handbook* (commissione Europea, 2010), che rappresenta una guida tecnica all'applicazione dell'analisi LCA. In conformità alle norme ISO, la valutazione del ciclo di vita si compone di quattro fasi:

- obiettivi e campo d'applicazione (Goal and Scope definition);
- analisi dell'inventario LCI (*Life Cycle Inventory*);
- valutazione degli impatti del ciclo di vita LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*);
- interpretazione dei risultati (*Life CycleInterpretation*).

In Figura 15 sono rappresentate le quattro fasi dell'analisi LCA, in cui si evidenzia come tale studio sia un processo iterativo e che la fase di interpretazione sia trasversale alle tre precedenti.

1

¹ Prodotto: Qualsiasi bene o servizio (UNI EN ISO 14040:2006)

² Processo: Insieme di attività correlate o interagenti che trasformano elementi in ingresso in elementi in uscita (UNI EN ISO 14040:2006)

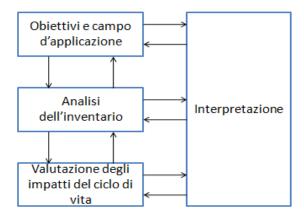


Figura 15Fasi di analisi LCA (ISO 14044, 2006)

2.4.1 Obiettivi e campo d'applicazione

In questa fase sono dichiarati gli obiettivi dello studio e le ragioni per le quali si esegue l'analisi. Inoltre, anche l'unità funzionale e i confini del sistema devono essere definiti. L'unità funzionale è un parametro di riferimento al quale i risultati LCA si riferiscono. La scelta dell'unità funzionale è arbitraria ma deve essere coerente con gli obbiettivi stabiliti e la funzione del prodotto analizzato. I confini del sistema includono tutti i processi considerati nell' analisi LCA.

2.4.2 Analisi dell'inventario

L'analisi dell'inventario rappresenta la fase più delicata della LCA. Nell'inventario sono inclusi tutti i dati raccolti per ognuna delle unità di processo³ inclusa nei confini del sistema. Tali dati forniscono informazioni riguardo i consumi,le emissioni, le quantità e il peso dei prodotti. In dipendenza dalla fonte di origine di raccolta del dato si classificano *dati primari* e *dati secondari*. I primi possono essere raccolti e misurati in sito, mentre i secondi sono ricavati dalla letteratura o da database esistenti.

In seguito alla raccolta dei dati, questi ultimi sono organizzati in un diagramma di flusso riferito all'unità funzionale scelta nella prima fase. Nel diagramma di flusso le fasi del ciclo di vita sono rappresentate da unità di processo, interconnesse da flussi di

³ Unità di Processo: elemento più piccolo considerato nell' inventario del ciclo di vita per il quale sono quantificati i dati in ingresso e in uscita(UNI EN ISO 14040:2006).

prodotti, energie e materiali⁴. Ogni unità di processo è a sua volta connessa con l'ecosistema dal quale acquisisce risorse (energia e materie prime) e nel quale rilascia rifiuti (emissioni in aria,acqua e suolo, rifiuti solidi,prodotti) come indicato in Figura 16. La realizzazione di questo modello può essere facilitata da differenti software, tra i quali Gabi, SimaPro e OpenLCA.

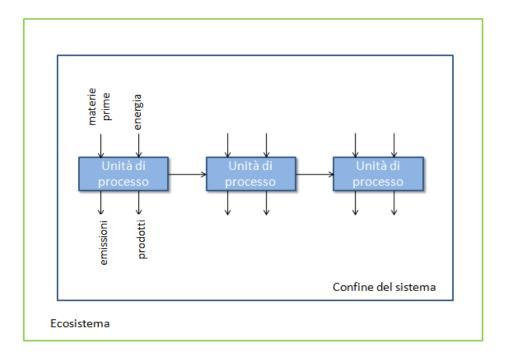


Figura 16. Rappresentazione schematica di un diagramma di flusso per la modellazione dell'analisi LCA.

2.4.2 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita e interpretazione dei risultati

La valutazione dell'impatto del ciclo di vita è la fase della LCA finalizzata alla comprensione e alla valutazione del potenziale impatto ambientale del ciclo di vita di un prodotto (ISO 14044, 2006).

In questa fase, i dati di inventario vengono associati a determinate categorie d'impatto⁵. Per ciascuna di esse si identificano gli indicatori⁶, ovvero unità di misura

⁴ I flussi di prodotti, energie e materiali sono definiti dalla ISO 14040 come Flusso intermedio. Flusso intermedio: Prodotto, materiale o flusso di energia che entra in un processo unitario (UNI EN ISO 14040:2006).

⁵ Categoria d'impatto: classe che rappresenta i problemi ambientali di interesse ai quali possono essere assegnati i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita(UNI EN ISO 14040:2006).

⁶ Indicatore della categoria d'impatto: Rappresentazione quantificabile di una categoria d'impatto (UNI EN ISO 14040:2006).

utilizzate per quantificare gli impatti. A tal fine è necessario utilizzare i coefficienti di equivalenza (chiamati fattori di caratterizzazione)che riportano ad una stessa unità di misura i flussi che contribuiscono agli impatti di ciascuna categoria. Per esempio, l'unità di misura della categoria d'impatto del cambiamento climatico è il kg CO₂eq. Il fattore di caratterizzazione del metano è 25,cioè 1 kg di emissione in aria di metano ha un potere climalterante pari a 25 kg CO₂eq. La valutazione dell'impatto ambientale può essere eseguita su due livelli, *midpointo endpointlevel*. In un'analisi eseguita al *midpointlevel*, gli indicatori definiscono categorie d'impatto come acidificazione, cambiamento climatico, riduzione dell'ozono, ecotossicità ed altre categorie. All'*endpointlevel* gli impatti quantificati nel *midpointlevel* sono convertiti in categorie che quantificano gli effetti finali su Aree di Protezione, AoPs (*Areas of Protection*), quali danni sulla qualità della salute, danni sulla qualità dell'ecosistema e danni sulle risorse. In Figura 17 è mostrata la relazione che sussiste tra gli indicatori appartenenti al *midpointlevel* e quelli appartenenti al *endpointlevel*.

Midpoint categorie d'impatto

Endpoint Aree di protezione

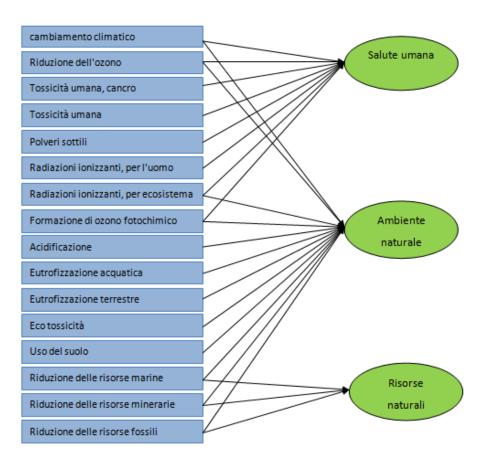


Figura 17. Relazione tra categorie d'impatto al livello midpoint ed endpoint.

Infine, la fase di interpretazione ha lo scopo di discutere i risultati della valutazione dell'impatto. L'interpretazione è trasversale a tutte le fasi precedenti, valutando per ognuna di esse la completezza, la consistenza e la sensibilità dello studio LCA.

Capitolo3-Analisi delle prestazioni strutturali delle pavimentazioni stradali

3.1 Scenario 1: spessore strato legato costante e materiale variabile in fondazione

Nel primo scenario fissata la geometria (Figura 18), al variare del materiale della fondazione è valutata, relativamente al degrado di fessurazione a fatica, la vita utile della pavimentazione oggetto d'indagine.

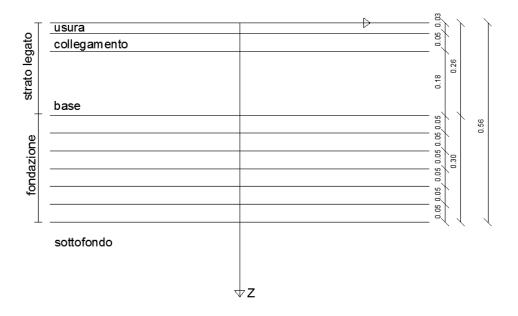


Figura 18. Rappresentazione della geometria e stratigrafia della fondazione

Definite le dimensioni geometriche della struttura (spessore degli strati) sono determinate le condizioni climatiche in cui essa opera e il numero di passaggi previsti per l'asse di riferimento. Per analizzare le condizioni di temperatura a cui è soggetta la pavimentazione è stata considerata la suddivisione dell'anno solare in quattro periodi stagionali durante i quali le temperature medie dell'aria non subiscono sostanziali variazioni. I periodi stagionali previsti sono quattro: l'inverno (Dicembre, Gennaio e

Febbraio), la primavera (Marzo, Aprile e Maggio), l'estate (Giugno, Luglio e Agosto), e l'autunno (Settembre, Ottobre e Novembre).

Per ciascun periodo è stimata, tramite il modello di Witczak, la temperatura media del conglomerato bituminoso T_p, alla profondità z pari ad 1/3 della dimensione dello strato legato. Tale temperatura è la stessa per ogni pavimentazione ottenuta al variare del materiale in fondazione in quanto per ciascuna di esse lo spessore dello strato legato è assunto identico e pari a 26 cm. A rigore, la temperatura media del conglomerato bituminoso dovrebbe essere valutata per ciascun sottostrato legato (base, collegamento e usura), tuttavia per ragioni di semplicità di calcolo lo strato legato nel seguente scenario è assunto come uno strato unico. In Tabella 9sono riportate le temperature medie mensili, le temperature medie stagionali MSAT (*Mean Seasonal Air Temperature*) e quelle del conglomerato bituminoso.

Tabella 9. Temperature dell'ambiente e della pavimentazione

	MMAT	MSAT			
Mesi	(°C)	(°C)	T _p (°C)		
Dic	2.9				
Gen	1.4	1.4 2.63 5.3			
Feb	3.6				
Mar	8.3	3.3			
Apr	12.6	12.67	18.54		
Mag	17.1				
Giu	20.7				
Lug	23.6	22.23	31.16		
Ago	22.4				
Sett	18.8				
Ott	13	12.9	18.85		
Nov	6.9				

Come specificato al paragrafo2.3.1 Clima e traffico)il numero di cicli di carico (n) assunto è pari a 5·10⁶, considerando come asse di riferimento l'asse con ruote singole da 80kN a cui corrisponde un raggio d'impronta di 13.5 cm,una pressione di gonfiaggio di 700 kPa e una frequenza di 8 Hz.

I dati della temperatura del conglomerato bituminoso e del traffico sono successivamente elaborati per la determinazione del modulo di rigidezza (E)e del

coefficiente di Poisson(v) dei materiali impiegati nella pavimentazione. Questa operazione è eseguita per ogni periodo stagionale e per tutte le pavimentazioni ottenute al variare del materiale di fondazione.

Nella Tabella 9 si riportano le caratteristiche del conglomerato bituminoso, considerando per il coefficiente di Poisson la sola dipendenza dalla temperatura ed effettuando il calcolo del modulo elastico mediante il codice di calcolo BANDS, come già specificato al paragrafo 2.1.2. Inoltre in Tabella 9 è solo riportata la variabilità del comportamento meccanico del conglomerato bituminoso rispetto alla stagione perché al variare del materiale in fondazione, nello scenario considerato, le caratteristiche geometriche e compositive dello strato legato rimangono invariate.

Tabella 10Caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso dello strato legato

Stagione	E (Mpa)	ν
Inverno	13300	0.25
Primavera	4900	0.35
Estate	1170	0.45
Autunno	4770	0.35

Per il terreno vegetale del sottofondo (vedi paragrafo 2.1.4) sono stati assunti valori a priori noti di modulo elastico, E=50MPa, e coefficiente di Poisson, v=0.45, non considerando dunque la variabilità delle caratteristiche meccaniche del materiale in funzione della stagione e del materiale in fondazione.

La caratterizzazione meccanica degli strati di fondazione, come stabilito in seguito alle analisi illustrate al paragrafo 2.2, è stata effettuata mediante l'utilizzo del codice di calcolo BISAR e del modello costitutivo MEPDG (eq. 2.3). Per il modello costitutivo assunto il modulo resiliente è funzione dello stato tensionale e di tre parametri costitutivi k_1 , k_2 e k_3 del materiale. Lo stato tensionale, definito dal primo invariante delle tensioni θ e dalla tensione ottaedrica τ , è stato determinato considerando l'effetto delle tensioni indotte dal carico e quelle di natura geostatica, calcolando i valori di tensione in punti specifici, chiamati *stress point*, posti a metà di ciascun sottostrato, lungo la linea di distribuzione del carico (Figura19).

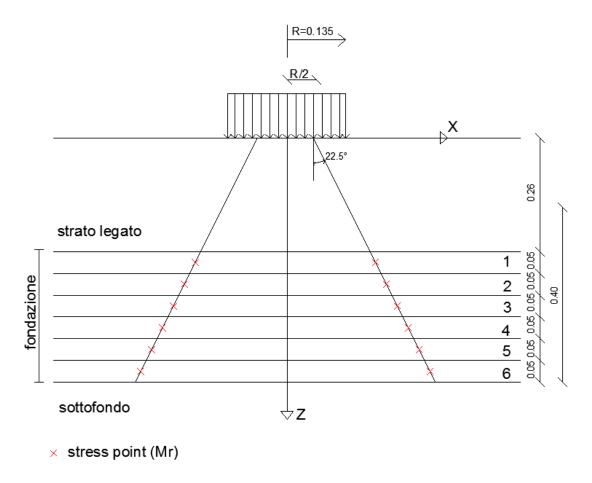


Figura 19Rappresentazione geometrica degli stress point

I valori dei tre parametri, k_1 , k_2 e k_3 , riportati in Tabella 11sonoinvece ottenuti dall'analisi di regressione sui dati sperimentali e risultano essere differenti per ciascuno dei nove materiali indagati.

Tabella 11 parametri costitutivi dei materiali in fondazione

	k1	k2	k3
N1 _{ns}	1076	0.52	0.24
N2 _{opc}	3431	0.26	0.61
R1 _{ns}	824	0.75	-0.46
R2 _{ns}	1809	0.53	-0.28
R3 _{ns}	1148	0.6	-0.03
R4 _{opc}	1139	1.51	-2.33
R4 _{ckd}	1014	1.84	-3.44
R5 _{sa}	2381	0.28	0.68
R6 _{sa}	2450	0.43	0.47

Partendo da valori di modulo resiliente di primo tentativo, tramite un calcolo iterativo per successive approssimazioni si giunge alla definizione dei valori di modulo per ogni strato non lineare della fondazione. In Tabella12 sono riportati per ogni materiale i valori di modulo ottenuti all'ultima iterazione e relativi al periodo stagionale invernale, invece per un'analisi completa del comportamento meccanico di tutti i materiali indagati è possibile visionare gli elaborati di calcolo e i grafici presenti in Allegato 3.

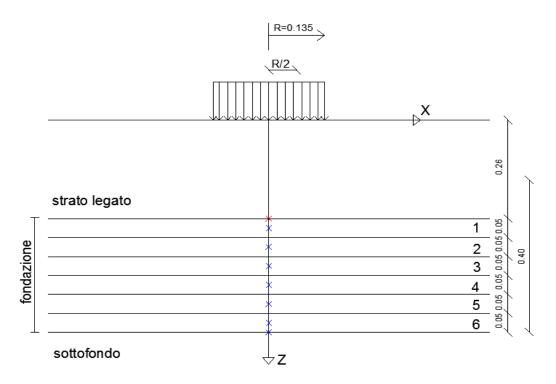
Tabella 12 Modulo resiliente dei materiali indagati per il periodo stagionale invernale

Inverno		Materiali							
Sottostrato	N1ns	N2opc	R1ns	R2ns	R3ns	R4opc	R4ckd	R5sa	R6sa
1	48.73	220.05	26.28	74.67	45.61	10.54	4.94	146.96	114.84
2	52.92	244.24	28.01	85.89	49.83	11.27	5.35	166.96	137.92
3	54.93	253.61	29.38	89.61	51.93	12.51	6.06	172.22	143.92
4	56.9	259.16	30.88	92.91	54.09	13.7	6.9	175.96	148.55
5	59	264.24	32.53	96.37	56.38	15.24	7.89	179.75	153.18
6	61.51	269.91	34.52	100.61	59.15	17.17	9.13	183.71	158.66

Dai risultati in Tabella 12,sebbene questi siano riferiti ad un solo periodo stagionale, appare chiaro come i materiali in fondazione presentino caratteristiche meccaniche differenti. Poiché per ciascuna pavimentazione le condizioni al contorno di clima e traffico sono identiche così come la geometria e il comportamento meccanico dello strato legato e del sottofondo sarà il comportamento meccanico del materiale in fondazione a condizionare la maggiore o minore durata della vita utile della pavimentazione.

I dati di rigidezza meccanica ottenuti sono stati impiegati nel codice di calcolo BISAR3.0 per l'analisi dello stato tenso-deformativo indotto dal carico standard ESAL. Il calcolo della tensione e delle deformazioni, questa volta, è stato effettuato per i punti collocati sotto l'area di carico. È noto infatti che in una pavimentazione gli elementi unitario di volume maggiormente sollecitati sono posti lungo l'asse di carico. Per l'analisi sono stati scelti punti posti a metà di ogni sotto-strato della fondazione e, inoltre, punti posti all'interfaccia tra lo strato legato e quello di fondazione, così come quelli all'interfaccia tra fondazione e sottofondo. (Figura 20). In particolare per la determinazione delle deformazioni di trazione ε_r , utili per il calcolo a fatica, è stato considerato il punto lungo la superficie inferiore dello strato di base e sotto l'asse di

carico (Figura 20) in quanto è lì che si manifestano con maggiore intensità provocando l'innesco della fessurazione.



- × def per il calcolo a fatica
- × tens & def

 $\textbf{Figura 20} \\ \textbf{Rappresentazione geometrica dei punti di calcolo di tensione e deformazione evidenziando anche il punto di determinazione di \\ \epsilon_r$

I valori della deformazione di trazione ϵ_r , per ciascun periodo stagionale e per le differenti pavimentazioni indagate, sono in Tabella 13.

Tabella 13. Deformazioni orizzontali di trazione lungo la superficie inferiore dello strato di base nei diversi periodi stagionali.

	ε _r (μm/m)				
	D-G-F	M-A-M	G-L-A	S-O-N	
PAV _{N1ns}	50	112.5	338.7	115.1	
PAV _{N2opc}	49	105.3	277.4	107.4	
PAV _{R1ns}	51	115	353.6	117.7	
\mathbf{PAV}_{R2ns}	50	110.7	325	113.3	
PAV _{R3ns}	50	112.7	340.1	115.3	
PAV_{R4opc}	55	123.5	382.3	126.8	
PAV_{R4ckd}	53	118.9	366.5	122.2	
PAV_{R5sa}	49	107.6	297.7	109.9	
PAV _{R6sa}	49	108.6	305	111	

Questi dati di deformazione ε_r consentono di valutare, come spiegato al paragrafo 2.3.2 Resistenza a fatica), il corrispondente numero N_i di cicli di carico che portano alla rottura dello strato, per i quali in Tabella 14 sono riportati i risultati.

Tabella 14. Numero di cicli di carico che portano alla rottura dello strato.

		N _i *10	000	
	D-G-F	M-A-M	G-L-A	S-O-N
PAV _{N1ns}	361000E+03	37800 E+03	2010 E+03	35400 E+03
PAV _{N2opc}	399000 E+03	52800 E+03	5460 E+03	50000 E+03
PAV_{R1ns}	327000 E+03	33800 E+03	1620 E+03	31600 E+03
PAV _{R2ns}	361000 E+03	41000 E+03	2470 E+03	38300 E+03
PAV _{R3ns}	361000 E+03	37400 E+03	1970 E+03	35100 E+03
PAV _{R4opc}	224000 E+03	23700 E+03	1100 E+03	21800 E+03
PAV_{R4ckd}	270000 E+03	28600 E+03	1360 E+03	26200 E+03
PAV_{R5a}	399000 E+03	47200 E+03	3830 E+03	44600 E+03
PAV_{R6a}	399000 E+03	45100 E+03	3400 E+03	42400 E+03

In base alle ipotesi di traffico già fatte in precedenza, il numero n_i delle applicazioni del carico di riferimento che hanno prodotto la deformazione ϵ_r in ciascun periodo climatico, considerando i 20 anni di vita utile, è pari a:

$$n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = \frac{5 \cdot 10^6 ESAL}{4} = 1.25 \cdot 10^6$$
 (eq. 3.1)

È quindi possibile calcolare i rapporti $\frac{n_i}{N_i}$ secondo la regola di Miner e verificare se durante il periodo di applicazione del carico, 20 anni, lo strato legato della pavimentazione resiste a fatica

$$DR (Damage Ratio) = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \le 1$$
 (eq 3.2)

Quando questo rapporto è pari all'unità, significa che la pavimentazione analizzata presenta una vita utile a fatica di 20 anni. Per valori del rapporto inferiori o maggiori all'unità, la pavimentazione resiste a fatica per un numero di anni maggiore o minore di 20, che devono essere quantificati.

Per il calcolo della vita utile a fatica è utile riferirsi al numero di cicli di carico applicati in un anno, quindi $n = \frac{5 \cdot 10^6 \, ESAL}{20 \cdot 4} e dn_1 = n_2 = n_3 = n_4 = \frac{5 \cdot 10^6 \, ESAL}{4 * 20} = 6.25 \cdot 10^4$. Noti questi valori è possibile calcolare i rapporti $\frac{n_i}{N_i}$ secondo la regola di Miner e successivamente determinare la vita utile della pavimentazione mediante la seguente equazione:

VITA UTILE (anni) =
$$\frac{1}{DR}$$
 (eq. 3.3)

3.2 Scenario 2: spessore strato legato e materiale in fondazione variabili

Le analisi condotte per lo studio del secondo scenario sono state eseguite seguendo la medesima logica di dimensionamento razionale prima esposta. In questo caso però, fissata la vita utile della pavimentazione in 20 anni, sono stati definiti in prima approssimazione gli spessori dello strato legato di primo tentativo e successivamente in base anche alle condizioni climatiche e al numero di passaggi dell'asse di riferimento, sono state definite le caratteristiche di resistenza dei materiali. Per il calcolo del modulo elastico e del coefficiente di Poisson dei materiali valgono gli strumenti, i metodi di calcolo e le ipotesi effettuate nello scenario precedente. Definite le caratteristiche meccaniche dei materiali, i valori ottenuti sono utilizzati nel codice di calcolo BISAR 3.0 per il calcolo di tensioni e deformazioni critiche utili alla determinazione della vita utile della soluzione.

In caso di difformità rispetto all'ipotesi di durata, sono stati diminuiti o incrementati gli spessori della sola porzione legata così da ottenere per ciascuna tipologia di sovrastruttura, diversa per tipologia di fondazione e spessore degli strati in conglomerato bituminoso, una vita utile di circa 20 anni.

Il procedimento di calcolo appena esposto può richiedere di effettuare diversi tentativi prima di definire lo spessore dello strato legato che per la singola pavimentazione indagata sia tale da garantire una vita utile di venti anni. In Allegato 4 in relazione ai diversi spessori dello strato legato ottenuti, per le pavimentazioni analizzate, è possibile consultare gli elaborati di calcolo e i grafici che descrivono il comportamento meccanico dei materiali. Di seguito, invece, si riportano i valori di deformazione critica

 ϵ_r (Tabella 15) e del carico a rottura N_i che se ne ricava (Tabella 16) per una vita utile delle pavimentazioni di 20 anni.

Tabella 15Deformazioni orizzontali di trazione lungo la superficie inferiore dello strato di base nei diversi periodi stagionali.

	ε _r (μm/m)				
	D-G-F	M-A-M	G-L-A	S-O-N	
PAV _{N1ns}	54	120.4	360.2	123.1	
PAV _{N2opc}	61	137	344.6	140.4	
PAV _{R1ns}	51	115	353.6	117.7	
PAV _{R2ns}	53	118.5	345	121.1	
PAV _{R3ns}	54	120.6	361.7	123.4	
PAV _{R4opc}	53	118.9	366.5	122.2	
PAV_{R4ckd}	51	115.6	359.1	118.4	
PAV _{R5sa}	60	132.1	353.4	134.5	
PAV _{R6sa}	57	124.1	342	126.7	

Tabella 16Numero di cicli di carico che portano alla rottura dello strato.

	N _i *1000				
	D-G-F	M-A-M	G-L-A	S-O-N	
PAV _{N1ns}	246000E+03	27000 E+03	1480 E+03	25400 E+03	
PAV _{N2opc}	134000E+03	14200 E+03	1850 E+03	13200 E+03	
\mathbf{PAV}_{R1ns}	327000 E+03	33800 E+03	1620 E+03	31600 E+03	
\mathbf{PAV}_{R2ns}	270000E+03	29200 E+03	1830 E+03	27500 E+03	
\mathbf{PAV}_{R3ns}	246000 E+03	26800 E+03	1450 E+03	25100 E+03	
PAV_{R4opc}	27000 E+03	26800 E+03	1360 E+03	26200 E+03	
PAV_{R4ckd}	327000 E+03	33100 E+03	1500E+03	30800 E+03	
PAV_{R5a}	145000 E+03	17000 E+03	1630 E+03	16400 E+03	
PAV_{R6a}	188000E+03	23200 E+03	1920 E+03	22000 E+03	

Capitolo 4-Valutazione del ciclo di vita delle pavimentazioni stradali

4.1 Obiettivi e campo d'applicazione

L'obiettivo dello studio è comprendere quali miscele di aggregati lapideipossa portare ad una maggiore sostenibilità ambientale dell'opera stradale. A tal fine sono analizzate diverse stratigrafie e diverse miscele (elencate in Tabella 17) per lo strato di fondazione.

Tabella 17 Elenco delle miscele impiegate in fondazione

N1 _{ns}	Aggregato vergine naturale
N2 _{opc}	Aggregato naturale stabilizzato a cemento
R1 _{ns}	Aggregato da CDW non stabilizzato
R2 _{ns}	Aggregato da CDW non stabilizzato
R3 _{ns}	Aggregato da CDW non stabilizzato
R4 _{opc}	Aggregato da CDW stabilizzato con cemento
R4 _{ckd}	Aggregato da CDW stabilizzato con polvere di elettrofiltro
R5 _{sa}	Aggregato da CDW stabilizzato con soluzione alcalina
R6 _{sa}	Aggregato da CDW stabilizzato con soluzione alcalina

Particolare attenzione è stata posta alla soluzione di stabilizzazione dei materiali di riciclo con attivazione alcalina in quanto essi possiedono un elevato potenziale come leganti alternativi al tradizionale cemento Portland responsabile di significative emissioni di gas serra(Passuello et al., 2017). A tal fine è stata eseguita un'analisi dettagliata del ciclo di vita di una pavimentazione flessibile nei due scenari definiti al paragrafo 2.3Metodologie di calcolo per la valutazione delle prestazioni strutturali), e di seguito richiamati:

- primo scenario:fissata la geometria della pavimentazione, al variare del materiale della fondazione sono state valutate le prestazioni in termini di vita utile;
- secondo scenario:fissate le prestazioni in termini di vita utile, al variare del materiale in fondazione sono determinati gli spessori dello strato legato che

garantiscono il raggiungimento della vita utile normalmente considerata di 20 anni.

4.1.1 Unità Funzionale

L'unità funzionale impiegata nell'analisi e alla quale i risultati si riferiscono è pari ad un'area di1 m² di pavimentazione. Lo spessore della pavimentazione si basa sui dati specifici di progetto e cambia in funzione dello strato considerato.

4.1.2 Scelta delle categorie d'impatto

Per la valutazione degli impatti ambientali sono state selezionate solo alcune delle categorie d'impatto presenti nel metodo *ILCD midpoint* 2011. In particolare,le categorie d'impatto relative al cambiamento climatico, acidificazione, polveri sottili, riduzione delle risorse minerali, fossili e rinnovabili, ed eutrofizzazione terrestre sono state scelte in quanto il metodo di calcolo che sta alla base è ritenuto sufficientemente solido dalla comunità scientifica. La Commissione Europea ha infatti analizzato i principali metodi di calcolo disponibili, classificandoli in una scala da I a III in base al loro grado di affidabilità (Tabella18), dove:

- livello I: metodo consigliato e soddisfacente
- livello II: metodo consigliato, ma che necessita di miglioramenti
- livello III: metodo consigliato, ma da applicare con cautela

Esiste inoltre la classificazione "*iterim*", la quale indica che il metodo indicato è il migliore tra quelli analizzati per la categoria d'impatto, ma non ancora sufficientemente maturo per essere consigliato.

Tabella 18. Metodi raccomandati e loro classificazione a livello midpoint (Commissione Europea, 2011)

	Raccomanda	azioni a livello <i>midpoint</i>	
Categorie d'impatto	Metodo LCIA raccomandato	Indicatori	Livello di classificazione
	modello di riferimento di 100	Global	ciassificazione
Cambiamento	anni di IPCC	Warming Potential	1
climatico		(GWP100)	•
	Steady-state ODPs 1999 come		
Riduzione dell'ozono	nella valutazione WMO	Potential	1
madzione den ozono	Tiena varatazione vivio	(ODP)	•
	Modello USEtox	Comparative Toxic	
Tossicità umana	(Rosembaum et al, 2008)	Unit for	11/111
(effetti cancro)	(Nosembaam et al, 2000)	humans (CTUh)	,
	Modello USEtox	Comparative Toxic	
Tossicità umana	(Rosembaum et al, 2008)	Unit for	11/111
(effetti non cancro)	(Nosembaum et al, 2008)		11/111
	Modello RISKPoll (Rabl e	humans (CTUh)	
	•	Frazione di aspirazione	
Particolato/smog	Spadaro, 2004) e Greco et	delle particelle fine (kg	1
	al,2007	PM2.5-eq/kg)	
	Modello sviluppato da Dreicer	Efficienza	
Radizioni	et al, 1995 (Frischknect 2000)		
ionizzanti(salute umana)	Ct ai, 1999 (1113c11k11cct 2000)	umana relativa a U ²³⁵	II
		umana relativa a U	
Radizioni ionizzanti	Metodo non raccomandato		
(ecosistema)	metodo non raccomanado		Interim
	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al,	Aumento della	
Formazione di ozono	2008) come applicato in	concentazione di	II
fotochimico	ReCIPE	ozono troposferico	
	Accumulated Exceedance	Accumulated	
Acidificazione	(Seppälä et al.	Exceedance	II
	2006, Posch et al, 2008	(AE)	
	Accumulated Exceedance	Accumulated	
Eutrofizzazione	(Seppälä et al.	Exceedance	П
terrestre	2006, Posch et al, 2008	(AE)	
	Modelo EUTREND (Struijs et	Frazione di nutrienti	
Eutrofizzazione	al, 2009b)come è	per acqua dolce e	П
acquatica	implementato in ReCiPe	marina	"
	Modello USEtox, (Rosenbaum		
Ecotoccicità/ marina	• •	Unit for	11/111
Ecotossicità(marina)	et al, 2008		11/111
Ecotossicità/ marina a	Metodo non raccomandato	ecosystems (CTUe)	
terrestre)	ivictoud fion racconfamuato		
terresure _j	Modello basato su Soil	Terreno organico	
	Organic Matter		
Uso del suolo	(SOM) (Milà i Canals et al,		Ш
	2007b)		
	Modello per il consumo	Uso dell'acqua in	
Riduzione delle	d'acqua (Frischknecht et al,	relazione alla sua	Ш
risorse(acqua)	2008)	scarsità	•••
Riduzione delle risorse	,	Scarsità	
minerali, fossili e	2002)	300131tu	II
	,		••

Dall'analisi dei dati in Tabella 18 è chiaro come le categorie che si è scelto di indagare presentino dei buoni livelli di qualità. Sono inoltre state analizzate anche le categorie di impatto sulla tossicità umana e sull'esaurimento di risorse, le quali, pur non godendo

ancora di una completa maturità, sono state ritenute rilevanti per il significativo interesse che ricoprono nella società e nelle politiche europee.

4.1.3 Confini del sistema

I confini del sistema dell'analisi LCA includono i principali processi e attività relativi all'acquisizione delle materie prime⁷, la produzione di materiali compositi, le operazioni di costruzione e i lavori di manutenzione per la pavimentazione di riferimento(Figura 22).

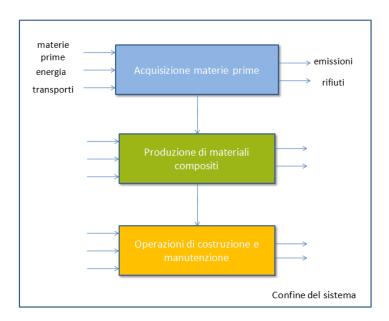


Figura 21. Schematizzazione del confine del sistema

Il processo di approvvigionamento delle materie prime include tutte le operazioni di produzione e trasporto di bitume, di emulsioni bituminose, di aggregati naturali, di aggregati da CDW, di cemento e di soluzione alcalina. Sono inoltre incluse le polveri da elettrofiltro, le quali risultano tuttavia prive di impatto in quanto originate come scarto di un'altra filiera produttiva. Nel processo di produzione di aggregati naturali sono consideratele operazioni di estrazione della roccia tramite esplosivo, frantumazione della roccia estratta e inseguito separazione delle frazioni frantumate in cumuli di aggregati aventi medesima granulometria. Per la produzione di aggregati da CDW sono state considerate le lavorazioni negli impianti di riciclaggio, mentre per la realizzazione della soluzione alcalina sono incluse le operazioni in laboratorio e, infine,per la

⁷Materia prima o secondaria utilizzata per realizzare un prodotto (la materia prima secondaria comprende il materiale riciclato) (UNI EN ISO 14040:2006).

produzione del bitume e dell'emulsione bituminosa sono considerati i processi che hanno luogo in raffineria. Le operazioni di trasporto includono il trasferimento delle materie prime dal luogo di produzione al sito di costruzione o di produzione di materiali compositi. Il bitume e una parte di aggregati naturali sono trasferiti all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. Il cemento e una parte di aggregati naturali e da CDW sono invece trasferiti all'impianto di produzione di misto cementato. La soluzione alcalina, le emulsioni bituminose e una parte di aggregati da CDW sono infine trasferiti direttamente al sito di costruzione. La produzione di materiali compositi comprende le operazioni di lavorazione che si verificano negli impianti di produzione di misto cementato e quelli di miscelazione a caldo per la produzione di conglomerato bituminoso. Nel primo caso sono incluse le operazioni di trasporto del cemento contenuto in silos con adeguati mezzi di trasporto e degli aggregati mediante nastro trasportatore, oltre alle lavorazioni di miscelazione che avvengono nel miscelatore in cui i materiali trasportati sono convogliati. Nel caso di impianti di miscelazione a caldo, le fasi considerate sono il riscaldamento e pompaggio del legante, l'asciugatura degli aggregati e la miscelazione dei materiali nel carlino. In questa fase sono incluse anche le operazioni di trasporto dei materiali compositi dal sito di produzione a quello di costruzione.

Le operazioni di costruzione comprendono lavorazioni eseguite nello strato di sottofondo, fondazione, e nei tre strati legati. Il primo strato realizzato è il sottofondo, che rappresenta il piano di posa della fondazione, per il quale sono effettuate le sole operazioni di spandimento dell'acqua e compattazione dello strato superficiale. La fondazione è ottenuta mediante la stesa di materiale, spandimento d'acqua e costipamento per strati di spessore non superiore a 15 cm. Inoltre, l'operazione di stabilizzazione è un'ulteriore lavorazione da eseguire qualora per gli stati di fondazione fosse impiegato materiale stabilizzato con polveri da elettrofiltro o soluzione alcalina. La costruzione dello strato legato avviene mediante la realizzazione, in ordine, dello strato di base, collegamento e usura. Prima della realizzazione degli strati di conglomerato bituminoso la superficie di stesa è preparata mediante l'applicazione di emulsioni bituminose. Realizzato il piano di posa, sono eseguite successivamente le operazioni di stesa del materiale e compattazione dello strato. Per le operazioni di manutenzione è considerato un arco temporale di 40 anni, durante il quale è prevista, ogni 10 anni, la fresatura e ricostruzione del solo strato di usura. Al termine della vita

utile della pavimentazione è invece prevista la fresatura e ricostruzione dell'intero strato legato. In quest'ultimo caso la fresatura è eseguita in due fasi successive: in una prima fase sono fresati lo strato di usura e collegamento,in una fase successiva quello di base. In Tabella 19 è riassunto il piano di manutenzione preso a riferimento.

Tabella 19. Piano di manutenzione

Piano di manutenzione		
Periodo di analisi (Anni)	40	
Rifacimento strato d'usura (1/ Anni)	1/10	
Rifacimento dello strato legato Fine vita utile		

4.2 Analisi dell'inventario

Per il caso studio analizzato sono stati utilizzati sia dati primari (forniti dalla Cavit S.p.A.), sia dati secondari (reperiti nel database Ecoinvent3.1 e in letteratura). Nei paragrafi seguenti, per ciascuna unità di processo sono riassunte le informazioni raccolte, le sorgenti e il loro grado di affidabilità.

4.2.1 Materie prime

I dati riguardanti la produzione di aggregati naturali e di aggregati da CDW sono ricavati da uno studio condotto da Blengini e Garbarino(2010).L'inventario pertinente la produzione di aggregati naturali in cava comprende i dati sui materiali impiegati, sull'uso del suolo e consumo di energia, di cui alla Tabella 20.

Tabella 20. Dati d'inventario per la produzione in cava 1000 kg di aggregati naturali (Fonte: Blengini e Garbariono, 2010)

Risorse e uso del suolo			
	Quantità	à	Modello del dato in Ecoinvent
Ghiaia, in terra	1.04	t	Gravel, in ground
Acqua	1.38	m^3	Tap water- Europe without Switzerland
Occupazione del sito di estrazione minera	0.0125*13	m²a	Occupation, mineral extraction site
Trasformazione, da bosco	0.0125	m^2	Trasformation, from forest
Trasformazione, a sito di estrazione mine	0.0125	m^2	Trasformation, to mineral extraction site
Materiali/ combustibili			
Diesel	4.904	MJ	Diesel, burned in building machine -GLO
Elettricità	10.803	MJ	Electricity, medium voltage-IT
Olio combustibile leggero	2.44	MJ	heat, district or industrial, other than natura gas- Europe without Switzerland
Griglia d'acciaio	0.02	t	metal working, average for steel product manufactoring- RER
Martelli/mascelle	0.0112	kg	metal working, average for steel product manufactoring- RER
Olio lubrificante	0.00181	kg	Lubricating oil-GLO
Acciaio	0.013	kg	metal working, average for steel product manufactoring- RER
Gomma sintetica	0.0073	kg	Polypropylene, granulate -RER- production Alloc Rec, S
Acqua di rubinetto	10.1	kg	Tap water- Europe without Switzerland
Infrastruttura e ricollocazione			
Cava	6.60E-08	Uni	t Gravel/sand quarry infrastructure-GLO
Ricollocazione	0.0125	m^2	Recultivation, shale quarry-GLO

Relativamente agli aggregati da CDW, i dati raccolti sono riferiti ad un impianto di produzione di tipo stazionario. In Tabella 21sono riportati i dati di inventario.

Tabella 21. Dati d'inventario per la produzione in impianto stazionario di 1000 kg di aggregati da CDW (Fonte: Blengini e Garbarino, 2010)

Materiali/ combustibili			
	Quantità		Modello del dato in Ecoinvent
Diesel	0.68	- 1	Diesel, burned in building machine -GLO
Elettricità	3.605	MJ	Electricity, medium voltage-IT
Griglia in poliuretano	0.0146	kg	polyurethane, rigid foam-GLO
Griglia d'acciaio	0.0105	kg	metal working, average for steel product manufactoring- RER
Martelli/mascelle	0.0327	kg	metal working, average for steel product manufactoring- RER
Olio lubrificante	0.001	kg	Lubricating oil-GLO
Gomma sintetica	0.0043	kg	Polypropylene, granulate -RER- production Alloc Rec, S
Acqua di rubinetto	6.7	kg	Tap water- Europe without Switzerland
Uso del suolo			
Occupazione, area industriale	0.1	m²a	Occupation, industrial area

I dati sulla produzione del bitume e dell'emulsione bituminosa, rappresentativi di uno scenario Europeo, sono stati ricavati dal rapporto Eurobitume (Eurobitume 2012), il quale fornisce l'inventario del ciclo di vita associato all'estrazione, al trasporto e raffinazione del petrolio grezzo (Tabelle22 e 23).

Tabella 22. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di bitume (Fonte: Euobitume 2012)

Materie prime			
	Peso		Modello del dato in Ecoinvent
Petrolio greggio	1000	t	crude oil; 42.3 MJ/kg
Consumo di risorse energe	tiche		
Gas naturale	22.5	kg	heat, district or industrial, natural gas -Euro. Without Switz.
Petrolio greggio	50.5	kg	heavy fuel oil, burned in raffinery furnace -Euro. Without Switz.
Carbone	10.9	kg	coal gas-GLO
Uranio	0.0003	kg	Uranium, in yellowcake-GLO
Consumo di risorse non en	ergetiche		
Acqua	1.239	I	Tap water- Europe without Switzerland
Emissioni in aria			
CO ₂	226167	g	carbon dioxide
SO ₂	899	g	sulfur dioxide
NO_{χ}	1142	g	nitrogen oxides
CO	1040	g	carbon monoxide
CH ₄	719	g	methane
Idrocarburo	52.4	g	Hydrocarbons, unspecified
NMVOC	404	g	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Particolato	300	g	particulates, unspedified
Emissioni in acqua			
COD	675	g	COD, chemical oxygen demand
BOD	511	g	BOD, biological oxygen demand
Sospensioni solide	224	g	suspended solids, unspecified
Idrocarburo	150	g	Hydrocarbons, unspecified
Composti di fosforo	77.4	g	phosphorous compounds
Composti di nitrogeno	23.7	g	nitrogen compounds, unspecified
Composti di solfuro	1801	g	Sulphur
Emissioni nel suolo			
Idrocarburo (Oli)	155	g	Hydrocarbons, unspecified

Tabella 23. Dati d'inventario per la produzione di emulsione bituminosa (Fonte: Eurobitume 2012)

Materie prime			
	Peso		Modello del dato in Ecoinvent
Petrolio greggio	1001.1	t	crude oil; 42.3 MJ/kg
Consumo di risorse energe	tiche		
Gas naturale	24.3	kg	heat, district or industrial, natural gas -Euro. Without Switz.
Petrolio greggio	54.4	kg	heavy fuel oil, burned in raffinery furnace -Euro. Without Switz.
Carbone	15.21	kg	coal gas-GLO
Uranio	0.0006	kg	Uranium, in yellowcake-GLO
Consumo di risorse non en	ergetiche		
Acqua	2.073	- 1	Tap water- Europe without Switzerland
Emissioni in aria			
CO ₂	255669	g	carbon dioxide
SO ₂	993	g	sulfur dioxide
NO_X	1207	g	nitrogen oxides
CO	1057	g	carbon monoxide
CH ₄	764	g	methane
Idrocarburo	68	g	Hydrocarbons, unspecified
NMVOC	410	g	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Particolato	324.9	g	particulates, unspedified
Emissioni in acqua			
COD	806	g	COD, chemical oxygen demand
BOD	547	g	BOD, biological oxygen demand
Sospensioni solide	258	g	suspended solids, unspecified
Idrocarburo	162	g	Hydrocarbons, unspecified
Composti di fosforo	142.3	g	phosphorous compounds
Composti di nitrogeno	48.22	g	nitrogen compounds, unspecified
Composti di solfuro	3482	g	Sulphur
Emissioni nel suolo			
Idrocarburo (Oli)	167	g	Hydrocarbons, unspecified

Per la produzione di cemento e della soluzione alcalina sono considerati i dati presenti nel database Ecoinvent3.1 (Tabella 24)

Tabella 24. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di soluzione alcalina (Ecoinvent3.1)

Materiali			
Soluzione Alcalina	Peso		Modello del dato in Ecoinvent
NaOH	100 k	g	neutralising agent, sodium idroxide-equivalent-GLO
Na2SiO3	800 k	g	sodium silicate, without, in 37% solution state-RER
Acqua	100 k	g	Tap water- Europe without Switzerland
Cemento	1000 k	g	cementproduction, Portland- Euro. Without Switz.

4.2.2 Materiali compositi.

L'inventario riguardante la produzione di conglomerato bituminoso è ricavato da uno studio condotto da Blengini et al. (2017) e include dati sui consumi di energia in termini di calore ed elettricità. I dati per la produzione di misto cementato sono raccolti da informazioni ricavate dai produttori del materiale della Cavit S.p.A. Nelle Tabelle25 e 26 sono riassunti tutti i flussi intermedi in entrata nei processi unitari di produzione del conglomerato bituminoso e del misto cementato.

Tabella 25. Dati d'inventario per la produzione di 1000 kg di conglomerato bituminoso per lo strato di base, collegamento e usura (Fonte:Blengini et al., 2017).

Materiali	•					
Base Quantità		à	Modello del dato in Ecoinvent			
Bitume	86.124	kg	bitume			
Aggregati naturali	1913.900	kg	Aggregati naturali			
Elettricità	15.3	MJ	Electricity, high voltage. Euro. Without Switz.			
Metano	0.69552	kg	heat, district or industrial, natural gas. Euro. Without Switz.			
Collegamento	-					
Bitume	47.620	kg	bitume			
Aggregati naturali	952.381	kg	Aggregati naturali			
Elettricità	15.3	MJ	Electricity, high voltage. Euro. Without Switz.			
Metano	0.69552	kg	heat, district or industrial, natural gas. Euro. Without Switz.			
Usura						
Bitume	5.660.377	kg	bitume			
Aggregati naturali	943.390	kg	Aggregati naturali			
Elettricità	15.3	MJ	Electricity, high voltage. Euro. Without Switz.			
Metano	0.69552	kg	heat, district or industrial, natural gas. Euro. Without Switz.			

Tabella 26. Dati d'inventario per la produzione di 1000kg di misto cementato (Fonte:CavitS.p.A).

Materiali	Quantità			
Misto cementato 1			Modello del dato in Ecoinvent	
Cemento (CEM I 42.5 R)	26.126	kg	bitume	
Aggregati naturali	970.874	kg	Aggregati naturali	
Elettricità	1.575	MJ	Electricity, high voltage. Euro. Without Switz.	
Misto cementato 2	Quantità		Modello del dato in Ecoinvent	
cemento (CEM II/B-P 32.5 R)	38.462	kg	bitume	
CDW	961.538	kg	Aggregati naturali	
Elettricità	1.575	MJ	Electricity, high voltage. Euro. Without Switz.	

4.2.3Costruzione e Manutenzione

I dati relativi alle operazioni di costruzione e manutenzione includono il consumo di carburante orario (FC_h) dei mezzi impiegati per le lavorazioni. Tali dati sono riportati in Tabella 27e ricavati da Blengini et al.(2017), nel quale sono stati considerati come mezzi di lavorazione:(1) la vibro-finitrice per la stesa del conglomerato bituminoso,(2) il pulvimixer per la stabilizzazione degli strati di fondazione,(3) i rulli per la compattazione dei diversi strati,e (4) la fresatrice per la rimozione del materiale degli strati legati.

Tabella 27. Consumo di carburante dei mezzi di cantiere per la costruzione delle strade (Fonte: Blengini et al., 2017).

Macchine lavoro	FC _h (I/h)
Finitrice	30
Rullo	17
Pulvimixer	90
Fresatrice	90

4.2.4Trasporti

I dati relativi ai trasporti riguardano le distanze percorse dagli autocarri per il trasferimento dei materiali. Come indicato al paragrafo 3.1.2, le operazioni di trasporto delle materie prime comprendono il loro trasferimento dal luogo di produzione al sito di costruzione o produzione di materiali compositi. Le distanze considerate dalla cava o raffineria all'impianto di produzione del conglomerato bituminoso sono state ricavate da Blengini et al. (2017), assumendo che la cava e l'impianto di raffinazione siano localizzate in Piemonte. Per il trasporto di materiali compositi, invece, sono state stabilite delle distanze fisse. Considerando che gli impianti di produzione dei materiali compositi siano localizzati in Piemonte, sono state assunte delle distanze medie dal sito di costruzione pari a 20 km. Nella categoria dei mezzi di trasporto sono inclusi anche i mezzi spruzzatori per lo spandimento di acqua ed emulsione bituminosa. Le informazioni sulle distanze di trasporto sono in Tabella 28 e Tabella 29.

Tabella 28. Distanza dal luogo di acquisizione al luogo di produzione di materiali compositi

Materiali	D (km)
Bitume	100
Aggregati naturali	60

Tabella 29. Distanza dal luogo di acquisizione o produzione di materiali compositi al sito di produzione

Materiali	D (km)
conglomerato bituminoso	20
soluzione alcalina	300
emulsione bituminosa	120
misto cementato	20
CDWA	20

4.2.5 Requisiti di qualità e affidabilità dei dati

La Tabella 30 riporta le sorgenti dei dati e il loro grado di affidabilità, suddividendoli in dati primari e dati secondari (si veda paragrafo 2.4.2).

Tabella 30. Fonte dei dati e loro grado di affidabilità

_	clas	sre dati	— fonte dati		
_	dati primari	dati secondari	Tonte dati		
Materiali					
Aggregati naturali		•	Blengini e Garbarino, 2010.		
CDWA		•	Blengini e Garbarino, 2010.		
Bitume		•	Eurobitume 2012		
Emulsione bituminosa		•	Eurobitume 2012		
soluzione alcalina		•	Ecoinvent		
cemento		•	Ecoinvent		
conglomerato bituminoso)	•	Blengini et al., 2017		
misto cementato	•		CavitS.p.A		
Trasporti		•	Blengini et al., 2017		
Macchine lavoro		•	Blengini et al., 2017		

4.2.6Diagrammi di flusso

I dati d'inventario sono stati utilizzati per la realizzazione di un modello LCA, sviluppato con il software OpenLCA. Di seguito, nelle Figure da 22 a 27, sono riportati i modelli realizzati per le diverse tipologie di pavimentazione oggetto di studio.

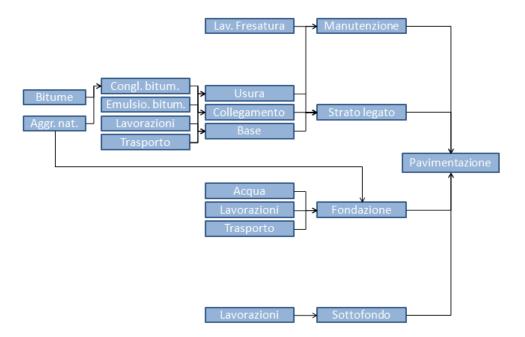


Figura 22. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in misto granulare naturale.

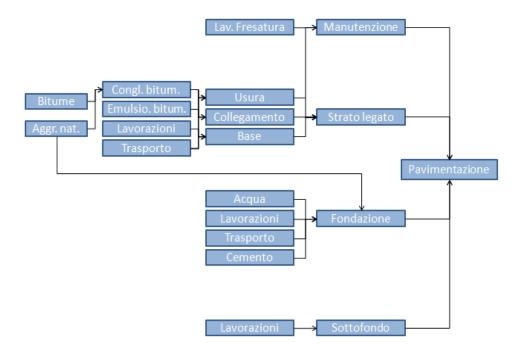


Figura 23. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in misto granulare naturale stabilizzata a cemento.

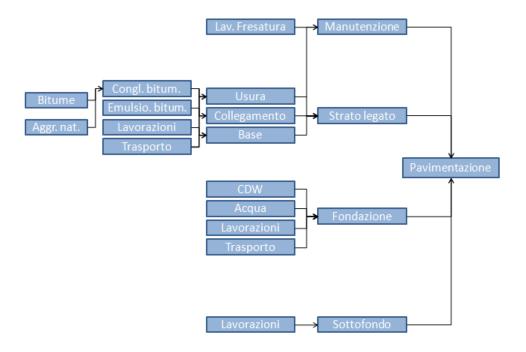


Figura 24. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione con aggregati da CDW.

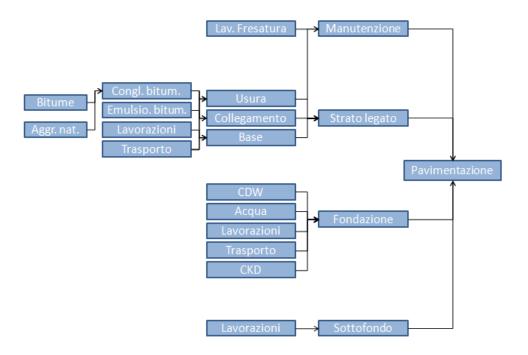


Figura 25. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in aggregati da CDW stabilizzata con polveri da elettrofiltro.

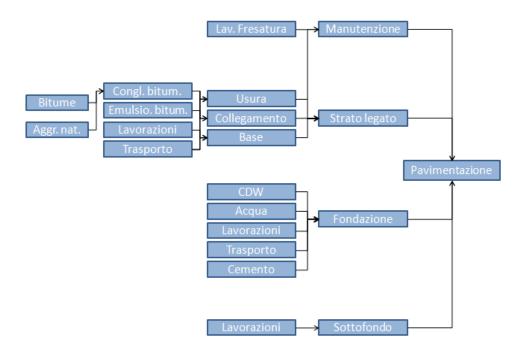


Figura 26. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in aggregati da CDW stabilizzata con cemento.

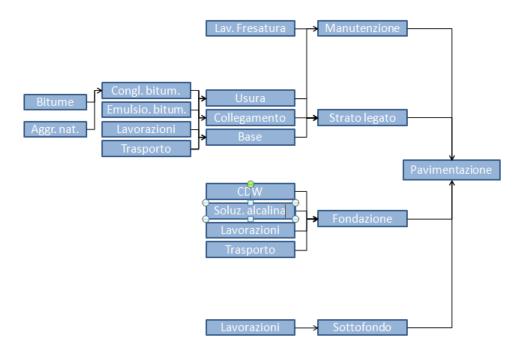


Figura 27. Diagramma di flusso della pavimentazione con fondazione in CDW stabilizzata con soluzione alcalina.

Capitolo 5 Risultati

5.1 Risultati dell'analisi delle prestazioni strutturali

5.1.1 Scenario 1:spessori costanti, vita utile variabile

In Figura 28 sono riportati i risultati dell'analisi prestazionali in termini di vita utile delle diverse pavimentazioni ottenute fissando gli spessori degli strati costituenti e variando il materiale in fondazione. Nella rappresentazione dei risultati, inoltre, è stato fatto un confronto tra le pavimentazioni considerando come valore di riferimento una vita utile di 20 anni (linea rossa), essendo queste, comunemente, le prestazioni ricercate nella progettazione delle pavimentazioni stradali.

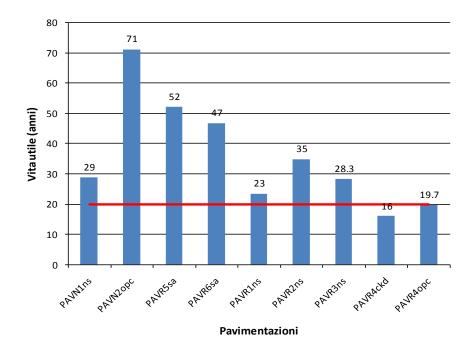


Figura 28. Vita utile delle pavimentazioni in analisi, quali: (PAV_{N1ns}) pavimentazione con misto granulare naturale, (PAV_{N2opc}) pavimentazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento, (PAV_{R5sa} e PAV_{R6sa}) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV_{R1ns}, PAV_{R2ns} ePAV_{R3ns}) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW, (PAV_{R4ckd}) pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV_{R4opc}) pavimentazione con aggregati da CDW stabilizzati con cemento.

Come si può notare, le pavimentazioni, al variare del materiale in fondazione, garantiscono una vita utile differente. La maggiore o minore durata è dovuta, come già sottolineato al paragrafo 3.1, al diverso comportamento meccanico dei materiali

costituenti la fondazione. Le caratteristiche meccaniche di tali materiali rappresentano, infatti, l'unico elemento di variabilità, dato che per ciascuna pavimentazione le condizioni al contorno e di clima sono identiche così come la geometria e il comportamento meccanico dello strato legato e del sottofondo. Migliori sono le prestazioni meccaniche (vedi Allegato 3) e maggiori sono i vantaggi in termini di vita utile.

Dalle analisi emerge che solo la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (PAV_{R4ckd})mostra una vita utile inferiore a 20 anni. Le massime prestazioni, invece, sono offerte dalla pavimentazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento PAV_{N2ope}, sebbene una vita utile di 71 anni possa essere considerata poco realistica, in quanto per fattori non considerati in questo studio (principalmente di carattere ambientale e legati agli ammaloramenti di altro tipo che possono insorgere nel lungo termine) le prestazioni in opera di una pavimentazione saranno molto probabilmente inferiori. Ottime prestazioni presentano anche pavimentazioni nel cui strato di fondazione sono impiegate miscele in misto granulare con aggregati da CDW attivati alcalinamente (PAV_{R5sa} ePAV_{R6sa}). Anche la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW (PAV_{R2ns}) garantisce una vita utile lunga rapportata al valore di riferimento di 20 anni. Prestazioni prossime ai 20 anni di vita utile sono, invece mostrate dalla pavimentazione in misto granulare di aggregati naturali PAV_{N1ns} e anche dalle pavimentazioni in misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati a cementoPAV_{R4opc} e non stabilizzati (PAV_{R3ns} e PAV_{R4opc}.)

5.1.1 Scenario 2:vita utile costante, spessori variabili

La Figura 29 riporta i risultati dell'analisi strutturale ottenuta fissando in almeno 20 anni la vita utile dell'intera sovrastruttura, ed avendo modificato i materiali impiegati per la formazione dello strato di fondazione e lo spessore dello strato legato ad esso associato. Si consideri che in quest'ultimo caso si è proceduto assegnando valori interi in cm allo spessore complessivo degli strati legati.

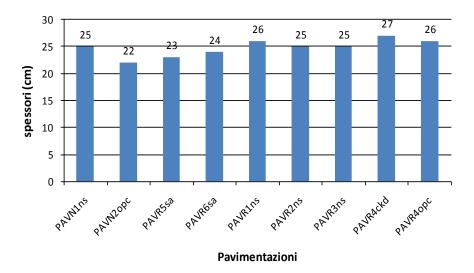


Figura 29Spessore dello strato legato delle pavimentazioni in analisi, quali: (PAV_{N1ns}) pavimentazione con misto granulare naturale, (PAV_{N2opc}) pavimentazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento, (PAV_{R5sa} e PAV_{R6sa}) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV_{R1ns} , PAV_{R2ns} e PAV_{R3ns}) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW, (PAV_{R4ckd}) pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV_{R4opc}) pavimentazione con aggregati da CDW stabilizzati con cemento.

I risultati ottenuti mostrano che dalle analisi effettuate sono stati determinati diversi valori dello spessore dello strato legato delle pavimentazioni ottenute al variare del materiale in fondazione. Anche in questo scenario, per le medesime ragioni del caso prima esposto, la variabilità dello spessore dello strato in conglomerato bituminoso è legato al comportamento meccanico del materiale in fondazione. In tal caso per una vita utile di 20 anni per materiali che hanno un comportamento meccanico migliore (vedi Allegato 4) saranno sufficienti spessori dello strato legato più basso di quelli con un comportamento meccanico peggiore, quest'ultimi infatti per resistere alle deformazioni a fatica e ripartire meglio le pressioni verticali dovranno fare affidamento ad uno spessore più grande dello strato legato.

Dalle analisi emerge come le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati (PAV_{R1ns}), e stabilizzati con cemento (PAV_{R4opc}) hanno mantenuto invariato lo spessore dello strato legato, pari a 26 cm. Infatti abbassando di un valore intero lo spessore dello strato non erano più ottenute prestazioni accettabili. È necessario invece, per garantire una vita utile di circa 20 anni,uno spessore dello strato legato di 27 cm per la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (PAV_{R4ckd}), mentre è sufficiente uno spessore di

25 cm sia per la pavimentazione con misto granulare di aggregati naturali (PAV_{N1ns}) che per le altre due pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati (PAV_{R2ns} e PAV_{R3ns}). Le pavimentazioni con misto granulare di aggregati naturali stabilizzati a cemento (PAV_{N2opc}) e con misti granulari di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa} e PAV_{R6sa}), forniscono una vita utile di circa 20 anni con spessori più bassi dello strato legato, rispettivamente di 22, 23 e 24 cm. Per una visione più chiara dei risultati questi sono anche riportati nella Tabella 31

Tabella 31Spessore dello strato legato delle pavimentazioni in analisi.

Spessore (cm)	Pavimentazione
27	PAV_{R4ckd}
26	PAV_{R1ns} - PAV_{R4opc}
25	PAV_{N1ns} - PAV_{R2ns} - PAV_{R3ns}
24	PAV_{R6sa}
23	PAV_{R5sa}
22	PAV _{N2opc}

5.2 Valutazione degli impatti e interpretazione

5.2.1 Scenario1

Come definito al paragrafo 4.1.2, le pavimentazioni in analisi sono state valutate con il metodo ILCD *midpoint* 2011per le categorie d'impatto dell'acidificazione, del cambiamento climatico, tossicità umana, polveri sottili, eutrofizzazione terrestre e riduzione delle risorse minerali, fossili e rinnovabili. La Tabella 32mostra i risultati, in valore assoluto, per le diverse pavimentazioni, mentre il grafico in Figura 30 confronta le pavimentazioni in valore percentuale. Quest'ultimo valore è stato ottenuto considerando che, per ogni categoria d'impatto, la pavimentazione che ha riportato il valore maggiore è stata posta al 100% del carico ambientale, e conseguentemente i valori percentuali delle altre pavimentazioni sono stati ottenuti scalando il loro valore d'impatto rispetto al valore massimo.

Tabella 32. Confronto dei risultati di impatto ambientale per le pavimentazioni in analisi (metodo ILCD *midpoint* 2011)

Categoria d'impatto	PAV _{N1ns}	PAV _{N2opc}	PAV_{R1ns}	PAV _{R2ns}	PAV _{R3ns}	PAV_{R4ckd}	PAV_{R4opc}	PAV_{R5sa}	PAV_{R6sa}	Unità
Acidificazione	1.87	1.49	1.85	1.52	1.69	2.34	2.07	1.85	1.94	Mole H+ eq.
Cambiamento climatico	248.42	210.44	241.26	198.84	220.86	305.05	283.43	245.52	256.62	Kg CO2 eq.
Tossicità umana (cancro)	3.82E-05	2.98E-05	3.39E-05	2.78E-05	3.09E-05	4.30E-05	3.73E-05	2.83E-05	2.96E-05	CTUh
Polveri sottili	0.23	0.18	0.22	0.18	0.20	0.28	0.25	0.22	0.23	Kg PM2,5 eq.
Riduzione delle risorse - minerali, fossili e rinnovabili	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	Kg Sb eq.
Eutrofizzazione terrestre	3.33	2.80	3.34	2.77	3.07	4.22	3.79	3.36	3.51	Mole N eq.

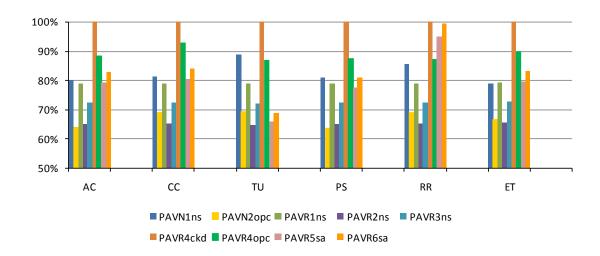


Figura 30. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle pavimentazioni analizzate (metodo ILCD midpoint 2011).(PAV $_{N1ns}$) pavimentazione con misto granulare naturale, (PAV $_{N2opc}$) pavimentazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento, (PAV $_{R5sa}$ e PAV $_{R6sa}$) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV $_{R1ns}$, PAV $_{R2ns}$ ePAV $_{R3ns}$) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW, (PAV $_{R4ckd}$) pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV $_{R4opc}$) pavimentazione con aggregati da CDW stabilizzati con cemento.

Come si può notare, la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (PAV_{R4ckd}rappresentata dalla barra marrone in Fig. 27), risulta avere i maggiori impatti ambientali per tutte le categorie analizzate. Anche la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati a cemento(PAV_{R4opc}, barra verde) risulta essere responsabile di significativi impatti potenziali, in particolare per la categoria del cambiamento climatico, che presenta un valore del solo 8% inferiore rispetto alla pavimentazione prima citata (PAV_{R4ckd}). Per ciò che concerne invece la categoria delle polveri sottili, valori confrontabili con quelli massimi, sono ottenuti dalle pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW

stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa}, barra rosa e PAV_{R6sa}, barra arancione) (rispettivamente 95.1% e 99.5%). Tuttavia le pavimentazioni con aggregati da CDW attivati alcalinamente mostrano, per le categorie analizzate, valori piuttosto eterogenei, come dimostra il fatto che per la categoria della tossicità umana raggiungono percentuali d'impatto relativamente basse, confrontabili con quelle minime. La pavimentazione con misto granulare di aggregati naturali(PAV_{Nlns}, barra blu),presenta valori alti per le categorie della tossicità umana e delle risorse rinnovabili e paragonabili a quelli della pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati a cemento (PAV_{R4opc}barra verde scuro), mentre per le restanti categorie ha impatti inferiori e simili sia alle pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW attivati alcalinamente (PAV_{R5sa})che non attivati(PAV_{R1ns}). tra le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati , quelle denominate rispettivamente PAV_{R1ns}(barra vere chiaro)e PAV_{R3ns}(barra azzurra), mostrano, rispetto alle altre pavimentazioni analizzate e per tutte le categorie, valori d'impatto intermedi e omogenei, mentre la pavimentazione denominata PAV_{R2ns}(barra viola) risulta essere la più vantaggiosa per tutte le categorie d'impatto, tranne che per quelle dell'acidificazione e delle polveri sottili, per le quali tuttavia è solo del 2% superiore all'impatto minimo, raggiunto dalla pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati a cemento (PAV_{N2opc}, barra gialla).

Per tutte le pavimentazioni sono state eseguite delle analisi di contributo al fine di individuare i sottoprocessi responsabili dei maggiori impatti potenziali. I valori riportati nei grafici in Figura 31, 32, 33, 34 e 35 fanno riferimento alla categoria d'impatto del cambiamento climatico ma possono essere estesi anche alle altre categorie in quanto i valori si discostano di pochi punti percentuale.

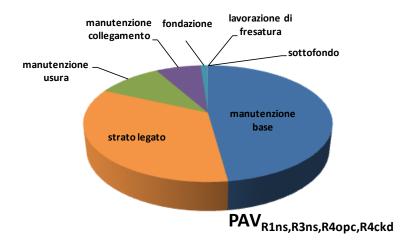


Figura 31. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la pavimentazionePAV_{R1ns} (risultati analoghi sono stati ottenuti per PAV_{R3ns, R4opc,R4ck}.)

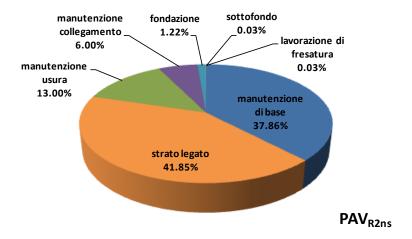
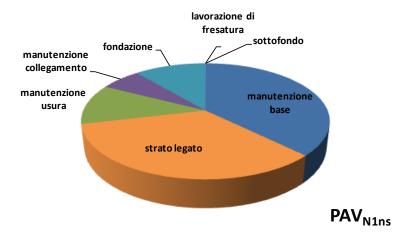


Figura 32. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la pavimentazione PAV_{R2ns} .



 $\textbf{Figura 33.} \ \, \text{Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la pavimentazione } \\ \text{PAV}_{\text{N1ns}}.$



Figura 34. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per le pavimentazioni PAV_{R5sa}(risultati analoghi sono stati ottenuti per PAV_{N2opc}.).



 $\textbf{Figura 35.} \ \, \text{Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la pavimentazione } \\ \text{PAV}_{\text{R6sa}}.$

Dalle analisi emerge che per quasi tutte le soluzioni strutturali analizzate, è lo strato legato a dare il maggiore contributo all'impatto sul cambiamento climatico. Ciò è dovuto principalmente all'impiego del conglomerato bituminoso impiegato nello strato legato superficiale. Inoltre, le operazioni di manutenzione dello strato di base risultano avere un peso significativo per le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati (PAV_{R1ns},PAV_{R3ns}) oltre che per quelle con aggregati da CDW stabilizzate con cemento (PAV_{R4opc}) e con polveri da elettrofiltro(PAV_{R4ckd}). Per la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R6sa}) risulta avere un'incidenza maggiore la realizzazione della fondazione. Il contributo minimo invece è sempre dato dalla costruzione del sottofondo e dall'operazione di fresatura.

5.2.2 Scenario2

Nello scenario 2, analogamente a quanto eseguito per lo scenario 1, le pavimentazioni in analisi sono state valutate per cinque categorie d'impatto del metodo ILCD *midpoint* 2011. La Tabella 33 mostra i risultati, in valore assoluto, per le diverse pavimentazioni, mentre il grafico in Figura 36 confronta le pavimentazioni in valore percentuale. Per il calcolo del valore d'impatto percentuale, per ogni categoria e pavimentazione, è stata seguita la medesima procedura di calcolo prima esposta (paragrafo 5.2.1)

Tabella 33Confronto dei risultati di impatto ambientale per le pavimentazioni in analisi (meodo ILCD midpoint 2011)

Categoria d'impatto	PAV _{N1ns}	PAV _{N2opc}	PAV _{R1ns}	PAV _{R2ns}	PAV _{R3ns}	PAV _{R4ckd}	PAV _{R4opc}	PAV _{R5sa}	PAV _{R6sa}	Unità
Acidificazione	2.10	1.62	1.85	1.89	1.89	2.06	2062.25	2.40	1.94	Mole H+ eq.
Cambiamento climatico	278.52	226.94	241.25	248.01	247.63	269.53	283.42	297.98	317.70	Kg CO2 eq.
Tossicità umana (cancro)	4.24E-05	3.18E-05	3.39E-05	3.47E-05	3.47E-05	3.79E-05	3.73E-05	3.57E-05	3.83E-05	CTUh
Polveri sottili	0.26	0.19	0.22	0.28	0.23	0.25	0.25	0.27	0.28	Kg PM2,5 eq.
Riduzione delle risorse - minerali, fossili e rinnovabili	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	Kg Sb eq.
Eutrofizzazione terrestre	3.75	3.03	3.34	3.44	3.43	3.73	3.79	4.07	4.34	Mole N eq.

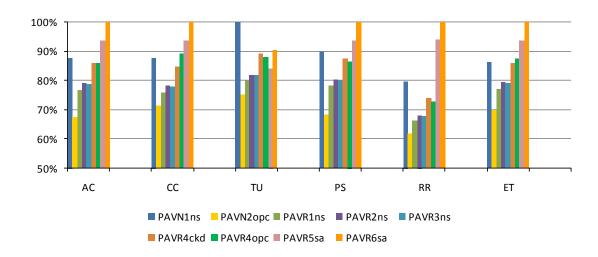


Figura 36. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle pavimentazioni analizzate (metodo ILCD midpoint 2011). (PAV $_{N1ns}$) pavimentazione con misto granulare naturale, (PAV $_{N2opc}$) pavimentazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento, (PAV $_{R5sa}$ e PAV $_{R6sa}$) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV $_{R1ns}$, PAV $_{R2ns}$ ePAV $_{R3ns}$) pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW, (PAV $_{R4ckd}$) pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (PAV $_{R4opc}$) pavimentazione con aggregati da CDW stabilizzati con cemento.

Come si può notare, la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R6sa}barra arancione) risulta avere i maggiori impatti ambientali per tutte le categorie analizzate, ad eccezione della categoria della tossicità umana per la quale il valore massimo è raggiunto dalla pavimentazione con mito granulare di aggregati naturali (PAV_{N1ns}barra blu). Quest'ultima presenta valori d'impatto relativamente alti per tutte le categorie, sebbene leggermente inferiori rispetto alla pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa}barra rosa). Le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (PAV_{R4ckd}barra marrone)e stabilizzati a cemento (PAV_{R4opc}barra verde scuro)hanno valori confrontabili con quelli della pavimentazione con misto granulare con aggregati da CDW naturali (PAV_{Nlns}barra blu), ad eccezione della categoria della tossicità umana. Le tra pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW no stabilizzati (PAV_{R1ns}barra verde, PAV_{R2ns}barra viola e PAV_{R3ns}barra azzurra) mostrano per la categoria delle risorse rinnovabili percentuali d'impatto relativamente basse, confrontabili con quelle minime, mentre per le altre categorie presentano valori intermedi. La pavimentazione con misto granulare di aggregati naturali stabilizzati a cemento (PAV_{N2opc}barra gialla)risulta essere la più vantaggiosa per tutte le categorie d'impatto.

Per tutte le pavimentazioni, oltre ad eseguire un confronto dei risultati di impatto ambientale, è stata eseguita un'analisi di contributo. Analogamente allo scenario 1, i valori riportati nei grafici in Figura 37 e 38fanno riferimento alla categoria d'impatto del cambiamento climatico ma possono essere estesi anche alle altre categorie in quanto i valori si discostano di pochi punti percentuale.

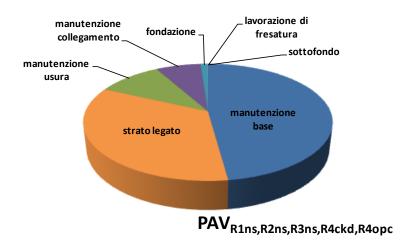


Figura 37. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la pavimentazionePAV_{R1ns} (valori analoghi sono stati ottenuti per PAVR2ns,R3ns,R4opc, R4ck).



Figura 38. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per le pavimentazioni PAV_{N1ns}(valori analoghi sono stati ottenuti per PAVN2opc, R5sa,R6sa).

I risultati ottenuti mostrano che i processi che in generale contribuiscono in modo più significativo agli impatti sono la produzione dello strato legato e le operazioni di manutenzione dello strato di base. La produzione della fondazione risulta abbastanza

significativa (18% degli impatti totali) per le due pavimentazioni con misto granulare di aggregati naturali non stabilizzati (PAV_{N1ns}) e stabilizzati a cemento (PAV_{N2opc}), oltre che per le altre due pavimentazioni in misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa} ed PAV_{R6sa}) (Figura 35), di contro risulta trascurabile per le altre pavimentazioni (Figura 34). Il contributo minimo è invece dato dalla costruzione del sottofondo e dall'operazione di fresatura.

5.2.3 Confronto tra i due scenari e approfondimento sulle fondazioni

In Tabella 34 sono stati messi a confronto i risultati ottenuti dall'analisi LCA e delle prestazioni strutturali effettuate nei due scenari oggetto d'indagine. In particolare in Tabella 34 sono riportati i risultati d'impatto della sola categoria del cambiamento climatico, ma le considerazioni che scaturiscono dal confronto dei risultati possono esser considerate valide qualsiasi sia la categoria d'impatto di riferimento.

Tabella 34Confronto dei risultati dell'analisi LCA e strutturale delle pavimentazioni nei due scenari indagati.

	Scenario utile varia	1: spessori costan	tti (26 cm), vita	Scenario 2: vita utile costante (circa 20 anni), spessori variabili			
Pavimentazione	Vita utile [anni]	Impatto: cambiamento climatico [kgCO ₂ eq.]	Impatto: cambiamento climatico [kgCO ₂ eq]	Spessore [cm]	Impatto: cambiamento climatico [kgCO ₂ eq]	Impatto: cambiamento climatico [kgCO ₂ eq]	
PAV _{N1ns}	29	248.42	80%	25	278.52	87.7%	
PAV _{N2opc}	71	210.44	69%	22	226.94	71.4%	
PAV_{R1ns}	23	241.26	79.1%	26	241.26	75.9%	
PAV _{R2ns}	35	198.84	65.2%	25	248.01	78.1%	
PAV _{R3ns}	28.3	220.86	72.4%	25	247.63	77.9%	
PAV _{R4opc}	19.7	283.43	92.2%	26	283.43	89.2%	
PAV _{R4ckd}	16	305.53	100%	27	269.53	84.8%	
PAV _{R5sa}	52	245.52	80.5%	23	297.98	93.8%	
PAV_{R6sa}	47	256.62	84.1%	24	317.70	100%	

Dal confronto dei risultati d'impatto e di vita utile del primo scenario emerge che anche se mediamente a vite utili più basse corrispondono valori d'impatto più alti ciò non è sempre verificato. Infatti, nel caso in esame, sebbene sia la pavimentazione con misto granulare di aggregati naturali stabilizzati a cemento (PAV_{N2opc}) a garantire le massime prestazioni strutturali, quella che invece presenta il profilo ambientale migliore ha una vita utile più bassa, ed è la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati (PAV_{R2ns}) .

Mettendo in relazione i risultati di spessore e d'impatto dello scenario 2 è possibile notare che per quasi tutte le pavimentazioni a spessori più bassi sono associati valori d'impatto minori, fatta eccezione per le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa} e PAV_{R6sa}), che presentano, in relazione alle diverse pavimentazioni, impatti massimi, mentre gli spessori dello strato legato sono quelli minimi.

Le analisi di confronto dei due scenari mostrano come siano sufficienti piccole variazioni dello strato legato per garantire una variazione significativa della vita utile. A tal proposito funge da esempio la PAV_{N2opc} che con uno spessore dello strato legato di 26 cm presenta una vita utile di 71 anni, mentre con uno spessore di 22 cm una vita utile di circa 20 anni. Inoltre dagli esiti dell'analisi LCA emerge che una stessa pavimentazione risulta avere impatti minori quando la sua vita utile è prolungata rispetto a quando lo spessore degli strati viene ridotto. In entrambi i casi però, per i due scenari considerati, sono i misti granulari di aggregati naturali stabilizzati a cemento (N2opc) e di aggregati da CDW non stabilizzati (R2ns) che garantiscono soluzioni (riga verde) con un profilo ambientale migliore, mentre l'impiego in fondazione di aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (R4ckd) e stabilizzati con soluzione alcalina (R6sa) comporta gli impatti maggiori (riga rossa).

Effettuando un confronto delle analisi di contributo (riportate al paragrafo 5.2.1 e 5.2.2), eseguite nello scenario 1 e 2 per le diverse pavimentazioni analizzate, è emerso che la costruzione della fondazione rappresenta uno dei sotto-processi di maggior contributo. Inoltre la fondazione è lo strato della pavimentazione per la quale sono impiegate le diverse tipologie di miscele in misto granulare analizzate. Dunque, al fine di comprendere in maniera più dettagliata i potenziali impatti ambientali di queste tipologie di materiali, quando impiegati per la costruzione di una strada, è stato eseguito

un confronto dei risultati di impatto ambientale per le fondazioni in analisi. Le fondazioni sono state valutate per cinque categorie d'impatto del metodo ILCD *midpoint* 2011. La Tabella 35 mostra i risultati, in valore assoluto, per le diverse fondazioni, mentre il grafico in Figura 39 confronta le fondazioni in valore percentuale. Per il calcolo del valore d'impatto percentuale, per ogni categoria e fondazione, è stata seguita la medesima procedura di calcolo esposta al paragrafo 5.2.1.

Tabella 35. Confronto dei risultati di impatto ambientale per le fondazioni in analisi (meodo ILCD midpoint 2011).

Categoria d'impatto	F _{N1ns}	F _{N2opc}	F _{R1ns}	F _{R2ns}	F _{R3ns}	F _{R4ckd}	F _{R4opc}	F _{R5sa}	F _{R6sa}	Unità
Acidificazione (AC)	39.60%	54.70%	2.84%	3.25%	2.78%	2.73%	11.30%	95.40%	100.00%	Mole H+ eq.
Cambiamento climatico (CC)	42.30%	71.70%	2.94%	3.37%	2.88%	2.81%	28.20%	95.40%	100.00%	Kg CO2 eq.
Tossicità umana (cancro)(TU)	96.50%	100.00%	1.03%	1.12%	0.97%	1.00%	3.56%	53.30%	55.90%	CTUh
Polveri sottili (PS)	46.40%	57.70%	2.80%	3.20%	2.74%	2.69%	7.42%	95.40%	100.00%	Kg PM2,5 eq.
Riduzione delle risorse - minerali, fossili e rinnovabili (RR)	37.10%	45.70%	2.71%	3.12%	2.66%	2.58%	4.33%	95.40%	100.00%	Kg Sb eq.
Eutrofizzazione terrestre (ET)	35.20%	64.70%	6.01%	6.89%	5.90%	5.78%	19.50%	95.40%	100.00%	Mole N eq.

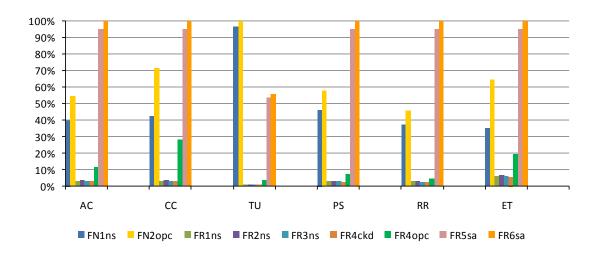


Figura 39. Confronto percentuale tra i risultati di impatto ambientale delle fondazioni analizzate (metodo ILCD *midpoint* 2011).(F_{N1ns}) fondazione con misto granulare naturale, (F_{N2opc}) fondazione con misto granulare naturale stabilizzato a cemento, (F_{R5sa} e F_{R6sa}) fondazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (F_{R1ns} , F_{R2ns} e F_{R3ns}) fondazioni con misto granulare di aggregati da CDW, (F_{R4ckd}) fondazione con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina, (F_{R4opc}) fondazione con aggregati da CDW stabilizzati con cemento.

Dai risultati riportati emerge che la fondazione in misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (F_{R6sa}barra arancione in Figura 36)risulta avere i maggiori impatti ambientali per tutte le categorie, ad eccezione della categoria della tossicità umana per la quale il valore massimo è raggiunto dalla fondazione in misto granulare di aggregati naturali stabilizzati a cemento(F_{N2opc}barra gialla). La fondazione con aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (F_{R5sa}barra rosa) mostra valori confrontabili con quelli massimi, pari al 95.4% per tutte le categorie, tranne che per la categoria della tossicità umana per la quale assume un valore inferiore e pari a 53.3%. La fondazione con aggregati naturali stabilizzati a cemento (F_{N2opc}) è caratterizzata da valori d'impatto alti che risultano essere eterogenei per le diverse categorie, infatti assume per la categoria d'impatto della tossicità umana un valore percentuale pari al 100%, mentre per la categoria delle risorse rinnovabili un valore pari al 45%. Viceversa la fondazione con aggregati naturali non stabilizzati (F_{N1ns}), in relazione alle fondazioni analizzate, presenta per le diverse categorie percentuali d'impatto intermedie e omogenee, ad eccezione della categoria della tossicità umana per la quale presenta valori prossimi a quelli massimi. Le fondazioni con aggregati naturali non stabilizzati (F_{R1ns}barra verde chiaro, F_{R2ns}barra viola e F_{R3ns} barra azzurra), così come quelli stabilizzati con polveri da elettrofiltro (F_{R4ckd} barra marrone)e cemento (F_{R4opc}barra verde scuro)risultano essere le più vantaggiose, mostrando valori nettamente inferiori a quelli assunti dalle altre fondazioni analizzate.

Al fine di interpretare in maniera completa i risultati di impatto ambientale del confronto tra le fondazioni in analisi, e comprendere perché uno specifico materiale per strato di fondazione presenti un maggiore o minore potenziale d'impatto sono stati analizzati i diversi sotto-processi della costruzione della fondazione stessa che risultano avere una minore sostenibilità. I risultati ottenuti sono rappresentati nei grafici in Figura 40, 41 e 42 e sono relativi alla categoria d'impatto sul cambiamento climatico ma le considerazioni possono essere estese anche alle altre categorie analizzate.

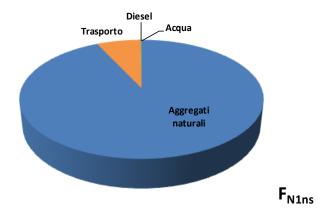


Figura 40. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la fondazione F_{N1ns}



Figura 41. Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la fondazione F_{N2opc} (valori analoghi sono stati ottenuti per $R4_{opc}$).

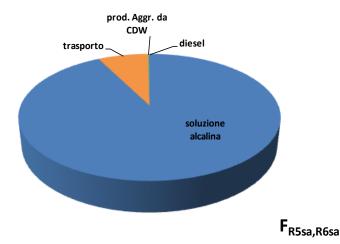


Figura 42Analisi di contributo per la categoria d'impatto del Cambiamento Climatico per la fondazione F_{RSsa} (valori analoghi sono stati ottenuti F_{R6sa}).

Dai risultati riportati emerge che per le fondazioni dei grafici 40, 41 e 42 la produzione dei materiali impiegati dà un alto contributo, mentre il contributo dei trasporti è nettamente inferiore. In particolare,per le fondazioni con aggregati naturali stabilizzati a cemento($F_{N2\text{opc}}$) e aggregati da CDW stabilizzati a cemento ($F_{R4\text{opc}}$) il misto cementato è l'elemento a maggior impatto, mentre per la fondazione con aggregati naturali non stabilizzati ($F_{N1\text{ns}}$) sono gli aggregati naturali ad avere il più altro contributo. Tra gli elementi alternativi, gli aggregati da CDW mostrano sempre un impatto minimo rispetto ai materiali naturali e misto cementato che sono tradizionalmente impiegati per la costruzione di strade, la soluzione alcalina, invece, mostra impatti ambientali alti (vedi fondazione $F_{R5\text{sa}}eF_{R6\text{sa}}$ in Figura 42), e ad influenzare in maniera negativa il carico ambientale della soluzione è il silicato di sodio, con una percentuale di contributo di circa 80%.

Conclusioni

Nell'elaborato di tesi sono stati analizzati e posti a confronto i diversi potenziali impatti ambientali di materiali granulari per la formazione di strati di fondazione di sovrastrutture stradali. Al riguardo sono stati considerati diversi materiali ottenuti sia attraverso l'uso di aggregati vergini naturali, sia di aggregati riciclati. Non solo, queste due fonti di approvvigionamento sono state combinate con leganti ordinari e innovativi ai fini di una loro stabilizzazione. Come noto, nella tecnica stradale la stabilizzazione consente di incrementare le prestazioni meccaniche dei materiali e delle sovrastrutture in cui essi sono impiegati, con vantaggi derivanti principalmente dalla maggior vita utile. A questi vantaggi, tuttavia, sono associati gli svantaggi legati ai costi derivati dal loro approvvigionamento, trattamento e posa, ma anche e soprattutto agli impatti ambientali che ne derivano. L'insieme di questi fattori permette di avere un quadro chiaro della sostenibilità economico-ambientale delle diverse soluzioni tecniche oggi disponibili o di quelle che lo potranno essere in un prossimo futuro.

L'obiettivo è stato perseguito considerando due scenari distinti per un'unità elementare di sovrastruttura (1 m²), per ciascuno dei quali sono state eseguite delle analisi strutturali e ambientali.

Nel primo scenario mediante l'analisi strutturale sono state valutate le prestazioni in termini di vita utile nei riguardi della resistenza a fatica, avendo fissato la geometria della pavimentazione e variando il materiale in fondazione. Successivamente con analisi LCA sono state valutate le prestazioni ambientali. Dal confronto dei risultati è emerso che migliori sono le prestazioni meccaniche dei materiali in fondazione e maggiori sono i vantaggi per la pavimentazione in termini di vita utile e d'impatto ambientale. A una vita utile più alta sono associati carichi ambientali più bassi per il grande contributo d'impatto sulle operazioni di manutenzione; più bassa è la vita utile, più numerose saranno le operazioni di manutenzione da eseguire e quindi più alti saranno gli impatti. Il carico ambientale di una pavimentazione è fortemente condizionato dall'impatto che il materiale impiegato per la costruzione della fondazione ha sull'ambiente. Nel caso in esame, sebbene la pavimentazione con misto granulare di aggregati naturali stabilizzati a cemento (PAV_{N2ope}) garantisca le massime prestazioni strutturali, quella che presenta il profilo ambientale migliore ha una vita utile più bassa ed è la pavimentazione con misto granulare di aggregati da CDW non stabilizzati (PAV_{R2ns}).

Nel secondo scenario, invece, al variare del materiale in fondazione, sono stati determinati gli spessori degli strati legati a bitume tali da garantire una vita utile di circa 20 anni, valutando successivamente l'impatto sull'ambiente delle diverse soluzioni strutturali ottenute. Dal confronto dei risultati emerge che uno spessore inferiore dello strato legato comporta un minor impatto. Ciò dipende dal fatto che a influenzare il profilo ambientale di una pavimentazione in maniera significativa è la produzione del conglomerato bituminoso. In realtà, come accade per lo scenario 1, il carico ambientale di una pavimentazione è fortemente condizionato anche dall'impatto che il materiale stesso impiegato in fondazione ha sull'ambiente. Nel caso in esame, le pavimentazioni con misto granulare di aggregati da CDW stabilizzati con soluzione alcalina (PAV_{R5sa} e PAV_{R6sa}), presentano impatti massimi, mentre gli spessori dello strato legato sono quelli minimi. Questo accade perché negli aggregati da CDW attivati per via alcalina, la soluzione basica stabilizzante ha un elevato impatto ambientale che riduce significativamente i benefici ottenuti dal minore spessore dello strato legato.

I risultati ottenuti dall'analisi LCA e delle prestazioni strutturali sono stati messi a confronto giungendo alle seguenti conclusioni:

- ad influire maggiormente sul carico ambientale di una pavimentazione sono le prestazioni strutturali in termini di vita utile piuttosto che la variazione di spessore dello strato legato; dal confronto dei risultati tra scenario 1 e 2 si osserva che una stessa pavimentazione risulta avere impatti minori quando la sua vita utile è prolungata rispetto a quando lo spessore degli strati viene ridotto;
- gli aggregati da CDW non stabilizzati (R2_{ns}) e gli aggregati naturali stabilizzati a cemento (N2_{opc})sono quelli che consentono di ottenere una sovrastruttura flessibile più sostenibile;
- i materiali a maggior carico ambientale sono gli aggregati da CDW stabilizzati con polveri da elettrofiltro (R4_{ckd}), così come gli aggregati da CDW attivati alcalinamente(R5_{sa} e R6_{sa});
- per i due scenari qui analizzati,il ridotto potenziale d'impatto della produzione di aggregati da CDW non stabilizzati garantisce un buon risultato ambientale della pavimentazione;

- la soluzione alcalina mostra impatti ambientali alti, e a influenzare in maniera negativa il carico ambientale della soluzione è il silicato di sodio, con una percentuale di contributo di circa l'80%;
- il processo che maggiormente influenza il profilo ambientale di una pavimentazione è rappresentato dalla produzione del conglomerato bituminoso.

In base a quest'ultima conclusione, è evidente che opere stradali più sostenibili necessitano di processi di costruzione e manutenzione degli strati i cui materiali siano ottimizzati ed efficienti. Per minimizzare gli impatti è possibile impiegare in fondazione materiali capaci di garantire sufficiente portanza riducendo così gli spessori del pacchetto legato della sovrastruttura. Dall'analisi dei risultati emerge che queste condizioni sono meglio garantite dagli aggregati da CDW non stabilizzati, i quali forniscono una vita utile di circa 20 anni con spessori del pacchetto legato di 26 cm, ma anche un soddisfacente profilo ambientale dell'intera pavimentazione.

Future sperimentazioni potrebbero essere indirizzate allo studio di attivatori alcalini a più ridotto impatto ambientale, ottenuti dalla combinazione di alcali con fonti di silicio amorfe provenienti da prodotti di scarto e quindi a basso impatto ambientale. Al riguardo si segnalano le ceneri derivanti dal trattamento della lolla di riso(Passuello et al., 2017), o dal trattamento di vetri derivati dal riciclaggio degli schermi dei videoterminali. La ricerca potrebbe essere inoltre estesa all'impiego di attivatori alcalini combinati con materiali amorfi altamente reattivi (es. le loppe d'altoforno macinate), il cui contenuto potrebbe essere fortemente ridotto rispetto agli attuali livelli necessari per una stabilizzazione con soli liquidi alcalini.

Ulteriori miglioramenti dell'analisi strutturale condotta in questo lavoro, e che ha preceduto l'analisi LCA, derivano dalla presa in considerazione di ulteriori meccanismi di ammaloramento della sovrastruttura, tra tutti l'analisi di accumulo delle deformazioni permanenti. Una più accurata valutazione delle prestazioni strutturali potrà certamente rendere più solida la successiva analisi ambientale sull'impiego dei materiali di riciclaggio nella formazione degli strati di fondazione delle pavimentazioni flessibili.

BIBLIOGRAFIA

- Albertì J, Balaguera A., Brodhag C., Fullana-i-Palmer P., (2017). Towards life cycle sustainability assessent of cities. *A review background knoweledge. Sci. Total Environ.* 609,1049-1063.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., 2014. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. Transp. Res. Part D 32 (0), 97–110. http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.006.
- Balaguera A., Carvajal G. I., Albertì J., Fullana-i-Palmer P.(2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: Aliterature review. *Resources, Conservation end Recycling* 132, 37-48.
- Blengini GA (2009) Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy. *Building and Environment* 44, 319–330.
- Blengini GA and Garbarino E (2010) Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* 18, 1021–1030.
- Blengini GA, Santagata E., Farina A., Zanetti MC. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Journal of Resources, Conservation and Recycling* 117, 204-212.
- Bassani, M., Riviera, P. P., Tefa, L., (2017). Short-Term and Long-Term Effects of Cement Kiln Dust Stabilization of Construction and Demolition Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 4016286.
- Capitolato CIRS, norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati speciali d'appalto
- Chowdhury, R., Apul, D., Fry, T., 2010. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. Resour.Conserv.Recycl. 54 (4), 250–255. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007.

- Del Rey, I., Ayuso, J., Galvìn, A. P., Jiménez, J., Barbudo, A. (2016). Feasibility of using unbound mixed recycled aggregates from CDW over expansive clay subgrade in unpaved rural roads. *Materials*, 9, 931.
- Eurobitume, 2012. European Bitumen Association.
- European Commission, 2003. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-CycleThinking. Brussels.
- European Commission, 2011. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. Official Journal of the European Union.
- Heukelom, W., Klomp, J.G., Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. *Proceeding of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbour, Michigan, 20-24 aug. 1962, pp 667-679
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., & Agrela, F. (2012b). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34-43. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042
- ISO, 2006. Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework. ISO 14040
- ISO, 2006. Environmental Management Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines. ISO 14044 (English).
- ISPRA, Rapporto Rifiuti Speciali, Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Roma, Italia, 2016.
- Laurent A, Bakas I, Clavreul J, et al. (2014) Review of LCA studies of solidwaste management systems. Part I. Lessons learned and perspectives. *Waste Management* 34, 573–588.

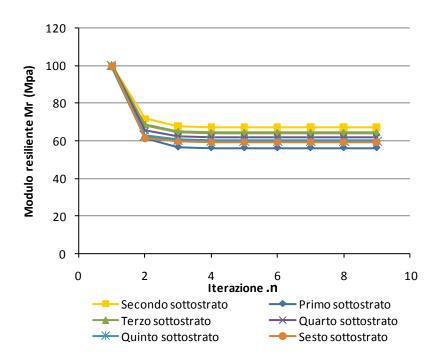
- Mercante I.T, Boeva M.D, Ibanez-Fores V., Arena P.A., (2012). Life cycle assessment of construction and demolition waste management system: a Spanish case study. *Int J Life Cycle Assess* (2012) 17: 232–241. DOI 10.1007/s11367-011-0350-2
- M.D. Boeva, J.C Powell (2016). Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management 50, 151-172*.
- Mroueh, U.-M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., 2001. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. Waste Manage. 21 (3), 271–277. http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00100-8.
- Pacheco- torgal, F., Castro-Gomes, J., &Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22, 1305-1314.
- ParlamentoEuropeo. (2008). Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive) Environment European Commission. Retrieved August 15, 2017, from http://ec.europa.eu/environment/waste/framework
- Passuello A., Rodrigìguez E., Hirt E., Longhi M., Bernal S.a., Provis J. L., Kirchheim A. P., (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Productin 166*, 680-689.
- Salas D. A., Ramirez A. D., Ulloa N., Baykara H., Boero A. J., (2018). Life cycle assessment of geopolymer concrete. Construction and Building Materials 190, 170-177
- Santagata E., Blengini G.A., Farina A., Zanetti M.C., Chiappinelli G. (2013). Life cycle assessment of road pavement base and foundation courses containing reclaimed asphalt pavement (RAP). Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 30 Settembre-4 Ottobre 2013.

ALLEGATO 1:Risultati del confronto dei codici di calcoloBISAR3.0 e KENLAYER

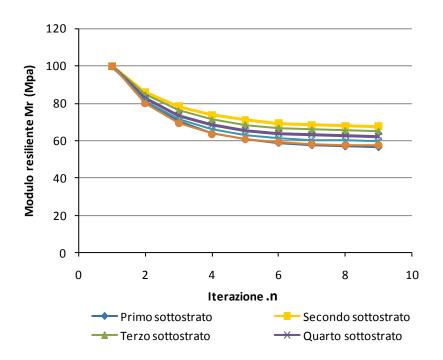
Nel seguente Allegato sono riportati, sia in forma di tabelle che con diagrammi, i moduli resilienti dei diversi sottostrati delle fondazione con materiale $R2_{NS(7)}$ ottenuti mediante l'utilizzo del codice di calcolo Bisar 3.0 e Kenlayer e l'utilizzo del modello costitutivo di Hicks-Monismith

BISAR 3.0			Numero de	i sottostrat		
DISAR 3.U	2	3	4	5	6	7
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	100	100	100	100	100	100
2	61.47	71.77	68.81	65.52	62.72	61.48
3	56.68	67.80	65.09	62.53	60.32	59.60
4	56.31	67.29	64.61	62.10	60.02	59.32
5	56.31	67.22	64.55	62.05	59.97	59.28
6	56.30	67.22	64.55	62.05	59.97	59.28
7	56.30	67.22	64.55	62.05	59.97	59.28
8	56.30	67.22	64.55	62.05	59.97	59.28
9	56.30	67.22	64.55	62.05	59.97	59.28

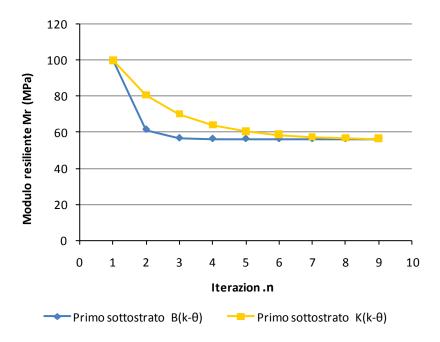
KENLAYER			Numero de	i sottostrat	i	
KEINLATEK	2	3	4	5	6	7
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)
1	100	100	100	100	100	100
2	80.7	86.14	84.38	82.74	81.19	79.71
3	70.01	78.23	75.77	73.47	71.27	69.18
4	63.96	73.6	70.91	68.38	65.95	63.62
5	60.51	70.87	68.13	65.54	63.06	60.66
6	58.52	69.24	66.52	63.95	61.46	59.06
7	57.37	68.28	65.59	63.04	60.58	58.19
8	56.71	67.71	65.05	62.52	60.08	57.72
9	56.34	67.37	64.74	62.23	59.8	57.46



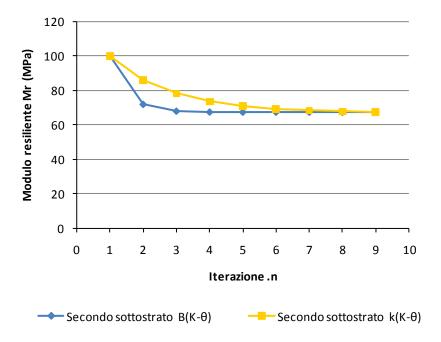
Allegato 1. 1Moduli elastici degli strati di fondazione calcolati con il codice BISAR mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



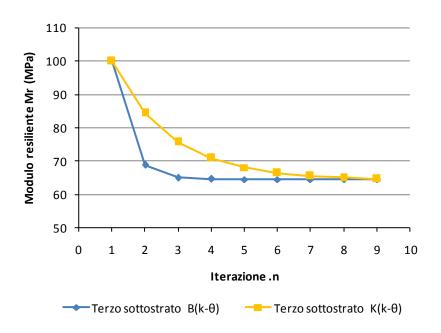
Allegato 1. 2Moduli elastici degli strati di fondazione calcolati con il codice KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



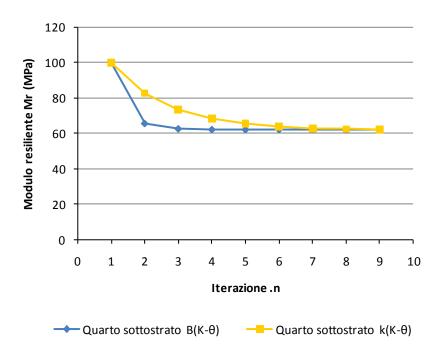
Allegato 1. 3Moduli elastici del primo strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



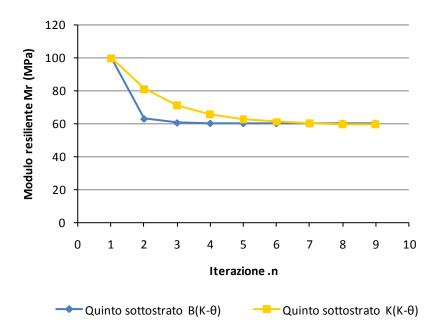
Allegato 1. 4Moduli elastici del secondo strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



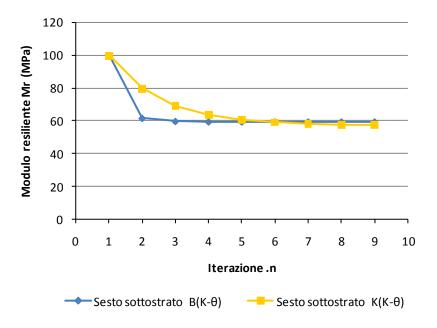
Allegato 1. 5Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



Allegato 1. 6Moduli elastici del quarto strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith



Allegato 1. 7Moduli elastici del quinto strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith

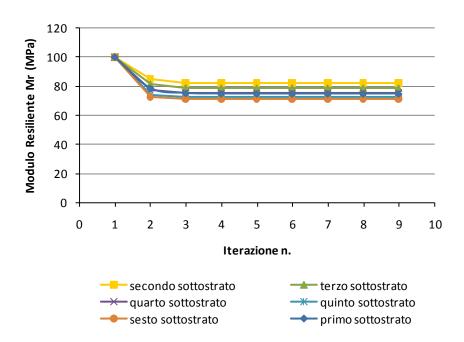


Allegato 1. 8Moduli elastici del sesto strato di fondazione calcolati con il codice BISAR e KANLAYER e mediante l'utilizzo del modello di Hicks-Monismith

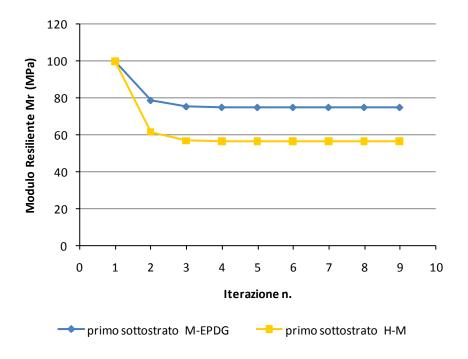
ALLEGATO 2:Risultati del confronto dei modelli costitutivi MEPGD ed Hicks-Monismith

Nel seguente Allegato sono riportati, sia in forma di tabelle che con diagrammi, i moduli resilienti dei diversi sottostrati delle fondazione con materiale R2_{NS(7)} ottenuti mediante l'utilizzo del codice di calcolo Bisar 3.0 e l'utilizzo del modello costitutivo di Hicks-Monismith e MEPDG.

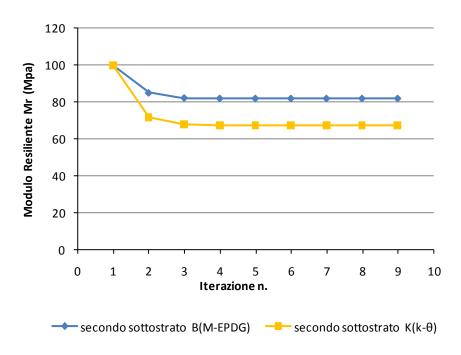
BISAR			Layer N	lumber		
M-EPDG	2	3	4	5	6	7
ITERAZIONE	Mr (MPa)					
1	100	100	100	100	100	100
2	78.59	85.13	81.48	77.72	74.43	72.41
3	75.21	82.42	79.10	75.83	72.97	71.30
4	74.83	82.17	78.88	75.64	72.82	71.18
5	74.79	82.15	78.85	75.62	72.80	71.17
6	74.79	82.15	78.85	75.62	72.80	71.17
7	74.79	82.15	78.85	75.62	72.80	71.17
8	74.79	82.15	78.85	75.62	72.80	71.17
9	74.79	82.15	78.85	75.62	72.80	71.17



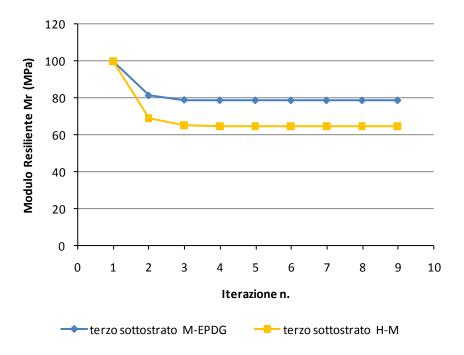
 $\textbf{Allegato 1. 9} \\ \text{Moduli elastici deglistrati di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo MEPDG e utilizzando il codice di calcolo BISAR.}$



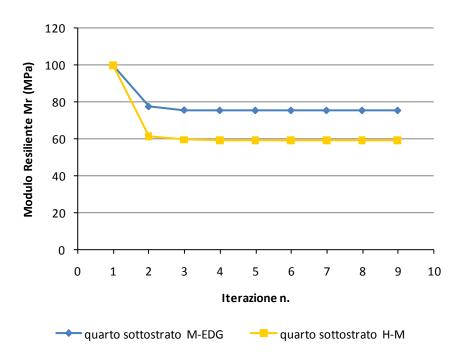
Allegato 1. 10Moduli elastici del primo strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.



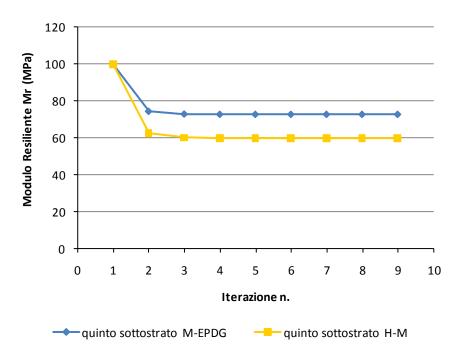
Allegato 1. 11Moduli elastici del secondo strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.



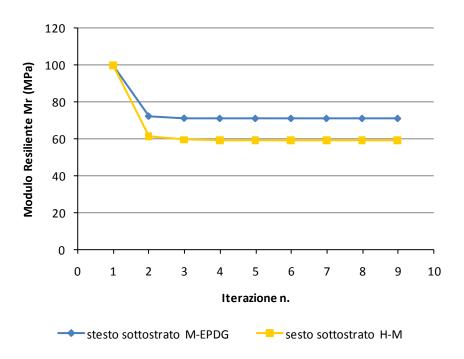
Allegato 1. 12Moduli elastici del terzo strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.



Allegato 1. 13Moduli elastici del quarto strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.



Allegato 1. 14Moduli elastici del quinto strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.



Allegato 1. 15Moduli elastici del sesto strato di fondazione calcolati mediante il modello costitutivo di Hicks-Monosmith e MEPDG, utilizzando il codice di calcolo BISAR.

Allegato 3: Comportamento meccanico delle pavimentazioni indagate per spessori costanti dello strato legato

1. Comportamento meccanico del bitume e del conglomerato bituminoso nei 4 periodi stagionali di riferimento e per uno spessore dello strato legato di 26 cm.

Mesi di D-G-F

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°		(MPa)
40/60	0.0199	8	5.3	50	25	52	-0.7	237

٧	ol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
	12	83	5	13300

Mesi di M-A-M

classe bitume	Tempodi carico	Tempodi carico	Temp Bitume°C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.5	50	25	52	-0.7	42.1

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4900

Mesi di G-L-A

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°င	°		(MPa)
40/60	0.0199	8	31.2	50	25	52	-0.7	5

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	1170

Mesi di S-O-N

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.9	50	25	52	-0.7	40.4

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4770

2. Comportamento meccanico della fondazione al variare dei materiali indagati nei quattro periodi stagionali indagati

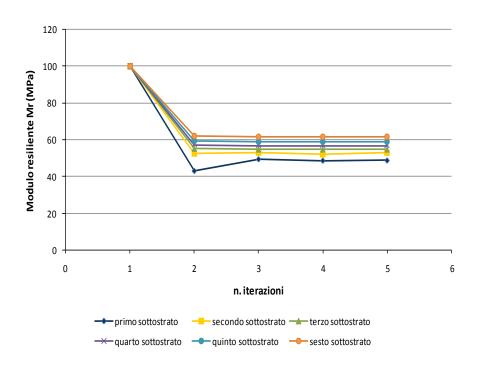
 F_{N1ns}

D-G-F		Numero del sottostrato						
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	43.08	52.65	55.28	57.38	59.53	62.10		
3	49.43	52.94	54.92	56.89	58.99	61.50		
4	48.65	52.11	54.93	56.91	59.01	61.51		
5	48.73	52.92	54.93	56.90	59.00	61.51		

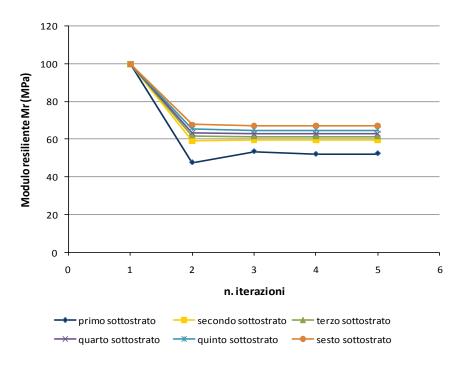
M-A-M	Numero del sottostrato						
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	47.67	59.25	61.97	63.71	65.52	67.99	
3	53.54	59.73	61.49	63.10	64.88	67.31	
4	52.12	59.63	61.50	63.11	64.90	67.32	
5	52.46	59.65	61.49	63.10	64.89	67.31	

G-L-A		Numero del sottostrato						
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	63.42	73.04	75.79	76.53	77.34	79.20		
3	63.15	75.01	76.03	76.56	77.35	79.22		
4	62.51	73.89	75.50	76.14	76.99	78.84		
5	62.48	73.90	75.50	76.14	76.97	78.82		

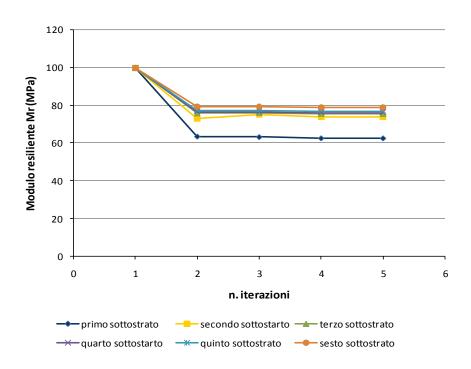
S-O-N		Numero del sottostrato						
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	47.93	59.49	62.20	63.92	63.23	68.18		
3	53.61	59.95	61.70	63.26	63.42	67.50		
4	52.27	59.85	61.70	63.29	63.46	67.51		
5	52.52	59.86	61.71	63.29	63.47	67.51		



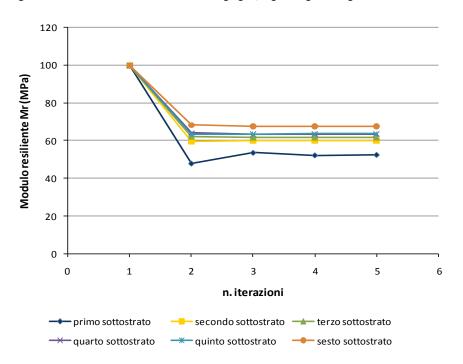
Allegato 2. 1 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $N1_{ns}$



Allegato 2. 2 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale N1_{ns}



Allegato 2. 3 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale N1_{ns}



Allegato 2 4 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $N1_{ns}$

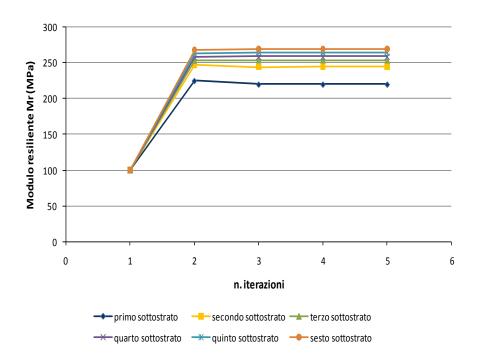
F_{N2opc}

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (Mpa)	Mr (MPa)	Mr (Mpa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	225.04	247.25	253.35	258.24	263.12	268.69		
3	220.05	243.98	253.53	259.14	264.22	269.90		
4	220.05	244.24	253.61	259.16	264.24	269.91		
5	220.05	244.24	253.61	259.16	264.24	269.91		

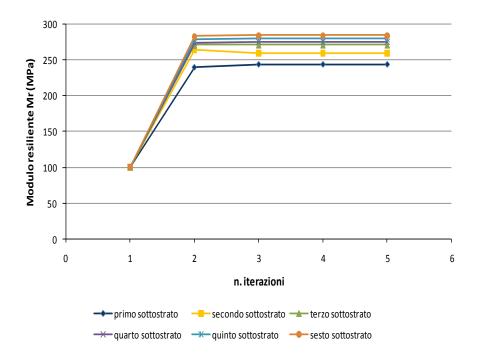
NA A NA	Numero del sottostrato						
M-A-M	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	240.03	265.04	270.72	274.46	278.28	283.18	
3	244.12	260.05	271.20	275.79	279.73	284.62	
4	244.12	260.05	271.20	275.79	279.73	284.62	
5	244.12	260.05	271.20	275.79	279.73	284.62	

G-L-A		Numero delsottostrato						
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	284.62	301.54	305.75	306.66	307.75	310.48		
3	290.29	290.86	304.88	306.71	307.79	310.25		
4	290.20	290.46	304.90	306.65	307.71	310.19		
5	290.20	290.46	304.90	306.65	307.71	310.19		

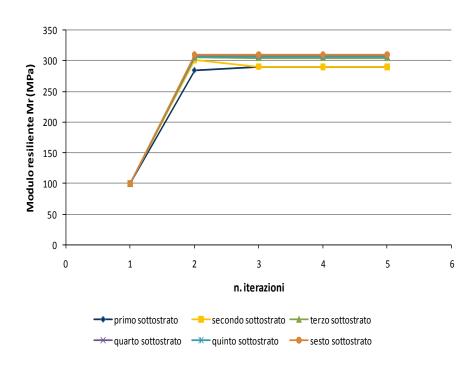
S O N		Numero del sottostrato						
S-O-N	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	240.78	265.66	271.32	275.01	278.79	283.66		
3	244.93	260.57	271.81	276.34	280.24	285.10		
4	244.93	260.43	271.79	276.34	280.24	285.10		
5	244.93	260.43	271.79	276.34	280.24	285.10		



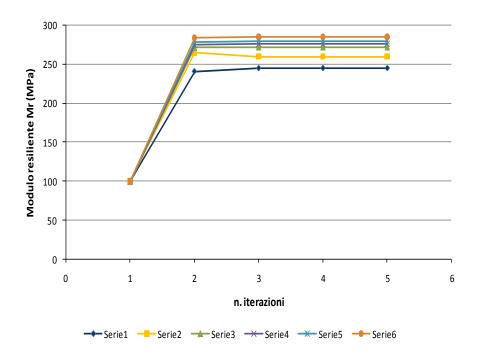
Allegato 2.5 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $N2_{opc}$



Allegato 2.6 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale N2_{opc}



Allegato 2. 7 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale N2_{opc}



Allegato 2. 8 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale N2_{opc}

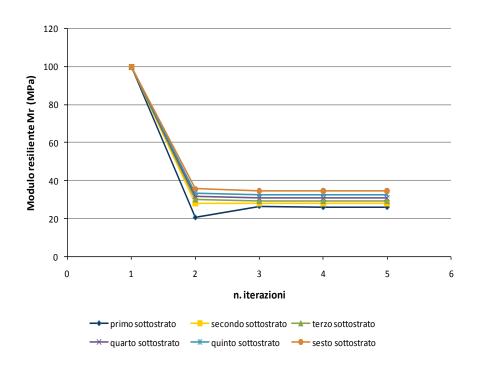
 $F_{R1ns} \\$

D.C.F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	20.85	28.12	30.17	31.82	33.53	35.65		
3	26.79	27.99	29.33	30.84	32.50	34.50		
4	26.22	28.02	29.39	30.88	32.53	34.52		
5	26.28	28.01	29.38	30.88	32.53	34.52		

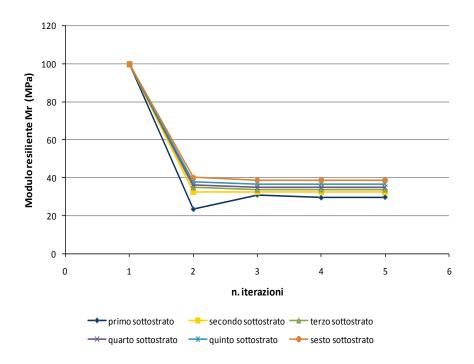
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	23.58	32.79	35.05	36.48	37.99	40.15		
3	31.15	32.72	33.83	35.12	36.62	38.67		
4	29.65	32.69	33.90	35.17	36.66	38.70		
5	29.94	32.69	33.88	35.16	36.65	38.70		

G-L-A	Numero del sottostrato							
	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	34.02	42.59	45.27	46.04	46.89	48.77		
3	35.38	43.19	43.97	44.64	45.58	47.43		
4	34.73	43.04	43.95	44.62	45.54	47.39		
5	34.90	43.05	43.93	44.61	45.54	47.39		

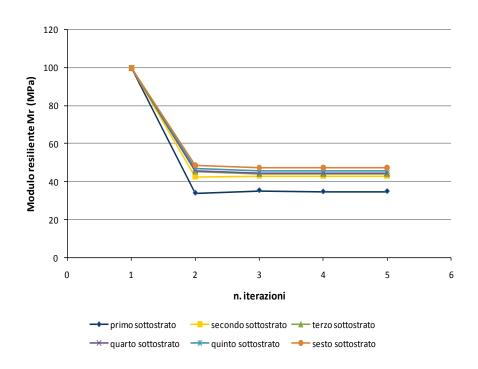
S-O-N	Numero del sottostrato							
	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	23.75	32.95	35.22	36.64	35.91	40.30		
3	31.22	32.85	33.96	35.22	35.84	38.80		
4	29.75	32.84	34.04	35.30	35.94	38.84		
5	30.03	32.85	34.03	35.29	35.92	38.83		



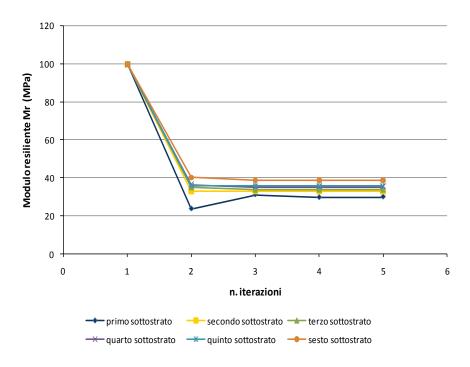
Allegato 2. 9 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R1_{ns}$



Allegato 2. 10 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $R1_{ns}$



Allegato 2. 11 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale $R1_{ns}$



Allegato 2. 12 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R1_{ns}$

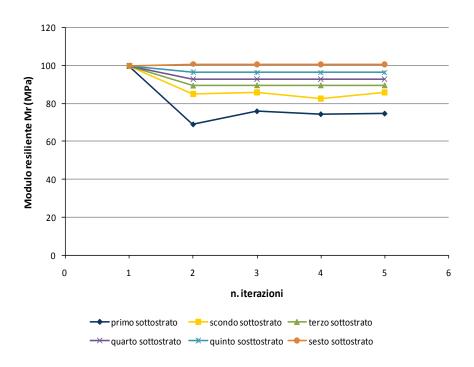
 F_{R2ns}

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	68.94	85.14	89.48	92.90	96.41	100.68		
3	75.90	85.94	89.63	92.91	96.37	100.61		
4	74.34	82.61	89.61	92.92	96.38	100.62		
5	74.67	85.89	89.61	92.91	96.37	100.61		

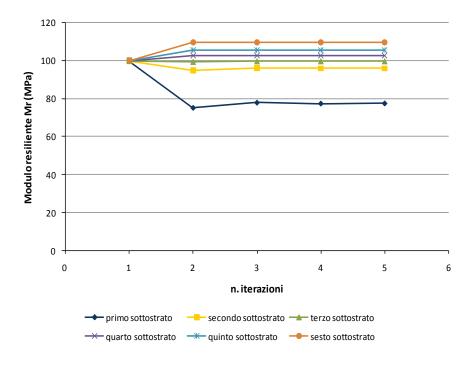
M-A-M	Numero del sottostrato						
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	75.31	94.98	99.55	102.40	105.39	109.57	
3	78.04	96.17	99.85	102.57	105.51	109.67	
4	77.56	96.05	99.86	102.58	105.51	109.68	
5	77.64	96.07	99.86	102.58	105.51	109.68	

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	97.82	114.52	119.51	120.93	122.48	125.89		
3	98.58	115.55	120.15	120.15	123.01	126.39		
4	98.59	115.46	120.15	121.50	123.00	126.38		
5	98.59	115.46	120.15	121.50	123.00	126.38		

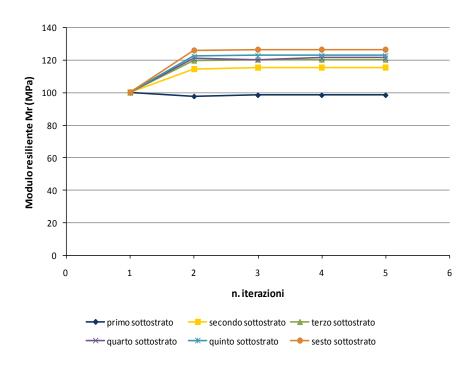
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IV	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	75.70	95.32	99.89	102.72	101.29	109.86		
3	78.19	96.48	100.18	102.79	101.26	109.99		
4	77.72	96.36	100.15	102.80	101.27	109.99		
5	77.82	96.38	100.16	102.80	101.27	109.99		



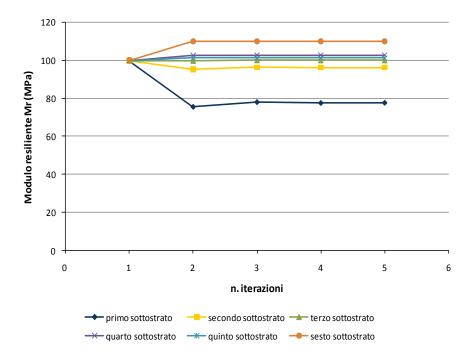
Allegato 2. 13 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns}$



Allegato 2. 14 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns}$



Allegato 2. 15 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns}$



Allegato 2. 16 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns}$

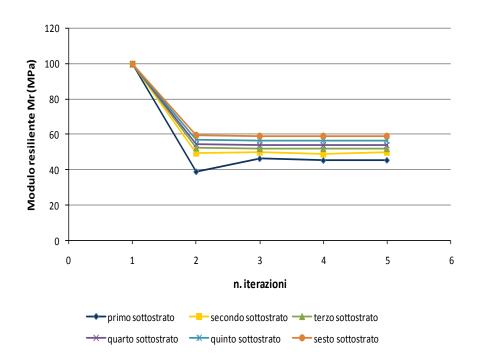
 F_{R3ns}

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	39.12	49.49	52.36	54.65	57.00	59.86		
3	46.48	49.85	51.94	54.07	56.37	59.13		
4	45.48	49.05	51.97	54.10	56.39	59.16		
5	45.61	49.83	51.96	54.09	56.38	59.15		

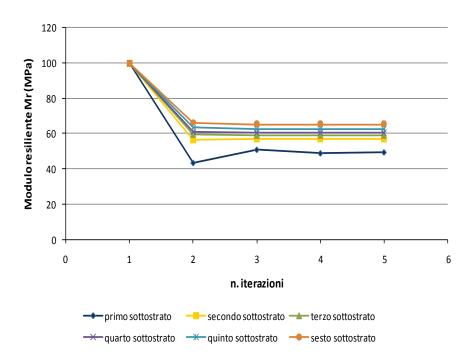
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	43.59	56.36	59.39	61.32	63.35	66.15		
3	51.02	56.99	58.85	60.61	62.59	65.33		
4	49.02	56.86	58.87	60.63	62.61	65.36		
5	49.56	56.89	58.86	60.63	62.61	65.35		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	59.55	70.66	73.95	74.87	75.87	78.13		
3	58.51	71.89	73.64	73.64	75.45	77.68		
4	58.50	71.87	73.65	74.42	75.44	77.68		
5	58.50	71.87	73.65	74.42	75.44	77.68		

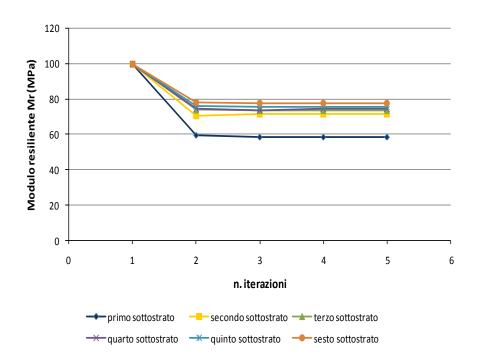
S O N	Numero del sottostrato							
S-O-N	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	43.85	56.60	59.64	61.55	60.68	66.37		
3	51.05	57.21	59.06	60.77	60.94	65.54		
4	49.09	57.08	59.08	60.82	61.01	65.56		
5	49.64	57.11	59.07	60.81	61.00	65.56		



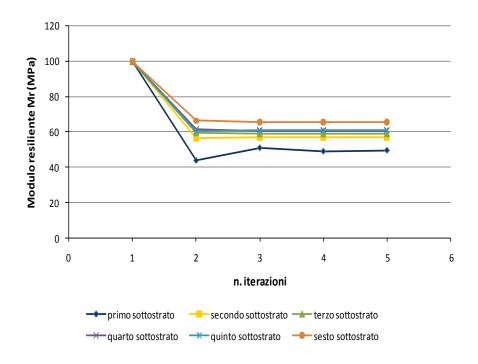
Allegato 2. 17 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R3_{ns}$



Allegato 2. 18 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $R3_{ns}$



Allegato 2. 19 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R3_{ns}



Allegato 2. 20 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale R3_{ns}

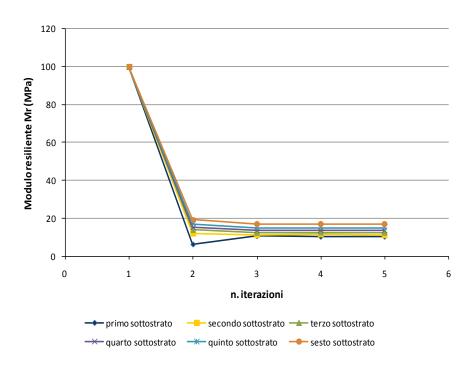
F_{R4opc}

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	6.49	12.07	13.92	15.46	17.17	19.44		
3	10.85	11.15	12.39	13.62	15.18	17.12		
4	10.50	11.61	12.54	13.70	15.23	17.16		
5	10.54	11.27	12.51	13.70	15.24	17.17		

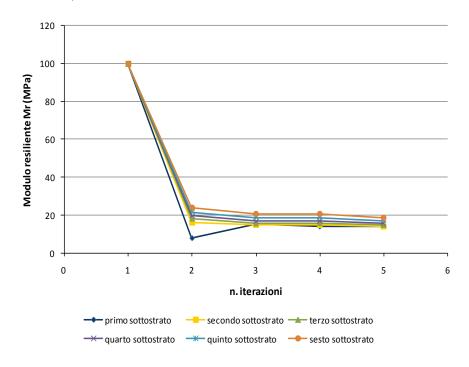
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	8.00	15.97	18.32	19.86	21.57	24.18		
3	15.34	14.81	15.77	17.10	18.72	20.96		
4	14.14	14.97	15.94	17.23	18.80	21.01		
5	14.10	14.10	14.97	15.95	17.23	18.80		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	15.45	25.20	28.88	30.04	31.32	34.20		
3	24.39	25.39	25.79	26.81	28.22	30.84		
4	21.94	25.02	25.78	26.75	28.12	30.72		
5	20.54	20.54	25.05	25.86	26.81	28.18		

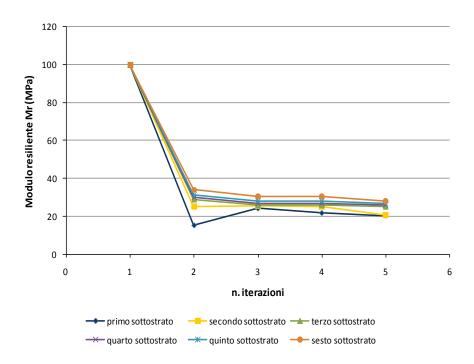
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	8.10	16.11	18.48	20.02	19.07	24.34		
3	15.25	14.79	15.75	17.06	18.09	21.18		
4	13.78	15.01	15.98	17.26	18.34	21.24		
5	14.08	14.96	15.95	17.24	18.31	21.22		



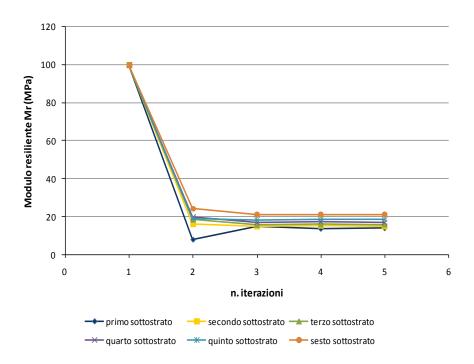
Allegato 2. 21 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R4_{opc}$



Allegato 2. 22 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R4_{opc}



Allegato 2. 23 Moduli elastici relativi ai mesi giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R4_{opc}



Allegato 2. 24 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R4_{opc}$

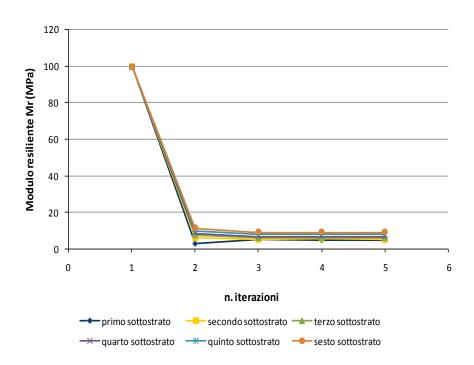
$F_{R4ckd} \\$

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	2.97	6.38	7.58	8.62	9.78	11.39		
3	5.09	5.30	6.01	6.88	7.90	9.15		
4	4.93	5.58	6.05	6.89	7.89	9.12		
5	4.94	5.35	6.06	6.90	7.89	9.13		

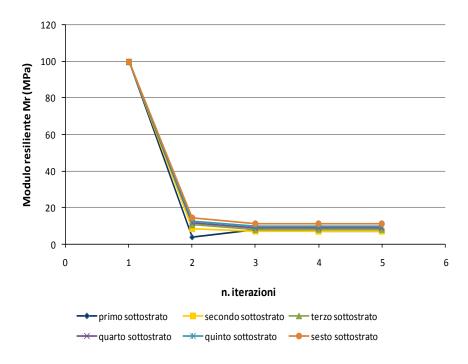
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	3.77	8.85	10.48	11.57	12.80	14.72		
3	7.68	7.26	7.90	8.81	9.92	11.41		
4	7.03	7.39	8.00	8.84	9.91	11.37		
5	7.11	7.35	7.97	8.83	9.89	11.36		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	8.13	14.98	17.79	18.71	19.72	22.04		
3	15.23	13.83	14.07	14.90	16.04	17.98		
4	12.97	13.51	13.98	14.75	15.82	17.73		
5	12.17	12.17	13.60	14.05	14.78	15.87		

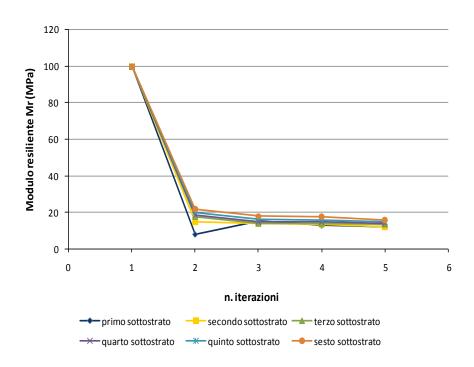
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	3.83	8.95	10.59	11.68	10.97	14.84		
3	7.72	7.30	7.94	8.84	9.68	11.55		
4	7.03	7.41	8.02	8.87	9.74	11.47		
5	7.11	7.36	7.99	8.85	9.72	11.45		



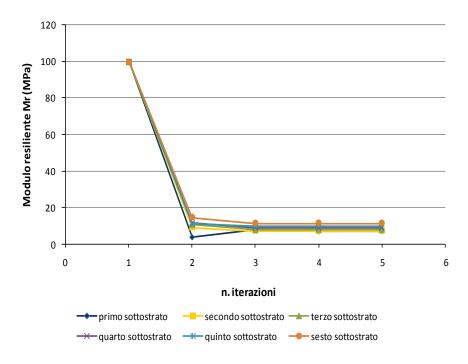
Allegato 2. 25 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R4_{ckd}$



Allegato 2. 26 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggiodegli strati della fondazione con materiale R4_{ckd}



Allegato 2. 27 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R4_{ckd}



Allegato 2. 28 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre,ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R4_{ckd}$

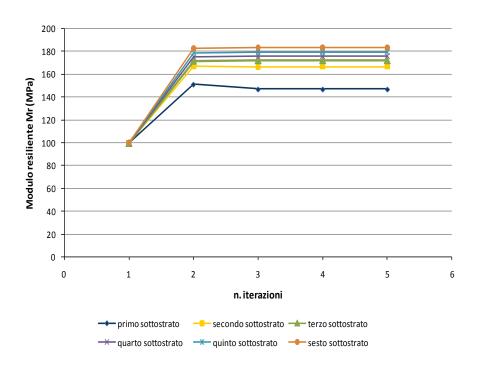
 $F_{R5sa} \\$

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	151.24	167.32	171.78	175.35	178.93	183.01		
3	146.98	166.74	172.16	175.94	179.57	183.70		
4	146.98	166.85	172.20	175.95	179.58	183.71		
5	146.96	166.96	172.22	175.96	179.57	183.71		

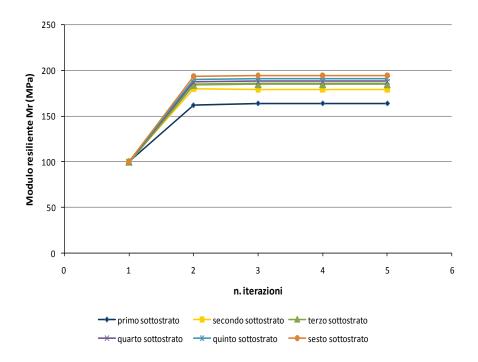
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	162.22	180.42	184.57	187.32	190.13	193.73		
3	164.28	179.49	185.27	188.27	191.09	194.69		
4	164.28	179.49	185.27	188.27	191.09	194.69		
5	164.28	179.49	185.27	188.27	191.09	194.69		

CLA	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	195.15	207.55	210.62	211.28	212.07	214.06		
3	198.57	204.68	211.17	212.07	212.78	214.64		
4	198.55	204.45	211.13	212.03	212.73	214.61		
5	198.55	204.45	211.13	212.03	212.73	214.61		

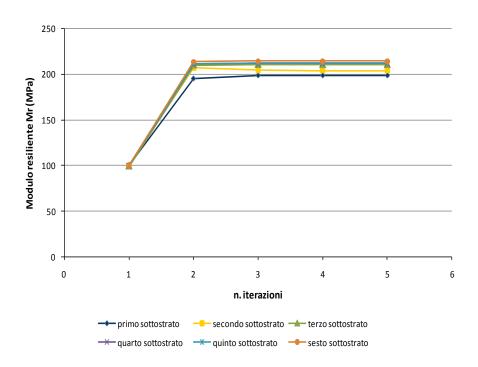
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	162.78	180.87	185.02	187.73	187.22	194.08		
3	164.84	179.88	185.72	188.64	185.41	195.08		
4	164.84	179.83	185.69	188.62	185.35	195.08		
5	164.84	179.83	185.69	188.62	185.35	195.08		



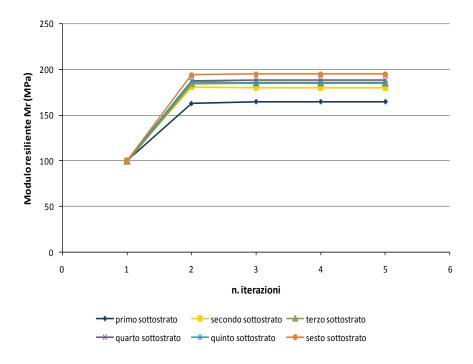
Allegato 2. 29 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R5_{sa}$



Allegato 2. 30 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R5_{sa}



Allegato 2. 31 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R5_{sa}



Allegato 2. 32 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R5_{sa}$

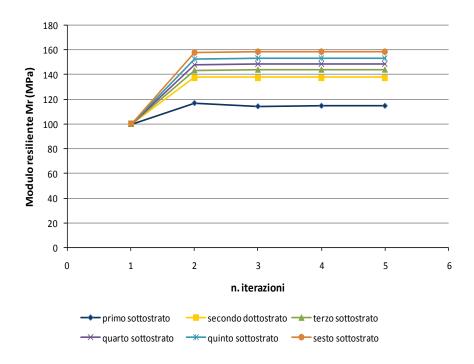
 $F_{R6sa} \\$

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	117.08	137.73	143.40	147.93	152.52	157.94		
3	114.40	137.81	143.91	148.54	153.16	158.64		
4	114.84	137.92	143.95	148.55	153.18	158.66		
5	114.84	137.92	143.95	148.55	153.18	158.66		

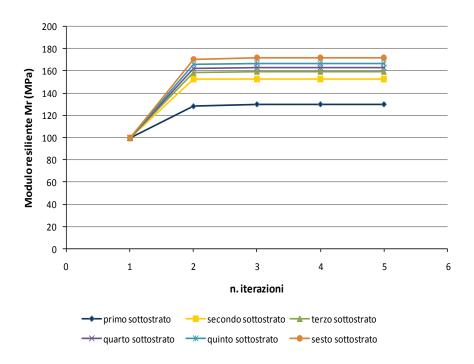
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	128.29	152.75	158.41	162.06	165.85	170.90		
3	130.07	152.67	159.34	163.13	166.91	172.02		
4	130.07	152.59	159.32	163.13	166.91	172.02		
5	130.07	152.59	159.32	163.13	166.91	172.02		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	164.96	184.07	189.30	190.62	192.11	195.60		
3	168.53	181.41	190.21	191.78	193.21	196.62		
4	168.51	181.10	190.16	191.75	193.18	196.57		
5	168.51	181.10	190.16	191.75	193.18	196.57		

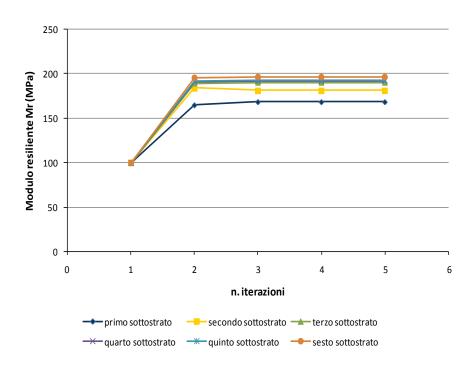
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	128.90	153.28	158.93	162.55	161.35	171.34		
3	130.70	153.14	159.82	163.53	159.48	172.49		
4	130.70	153.04	159.79	163.48	159.39	172.52		
5	130.70	153.04	159.79	163.48	159.39	172.52		



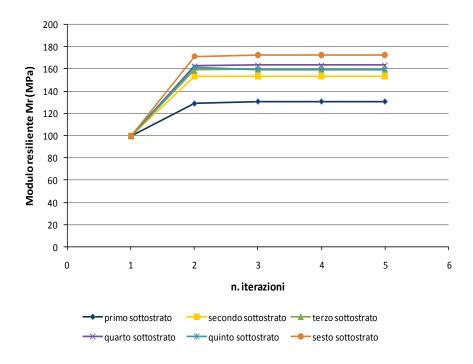
Allegato 2. 33 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 2. 34 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 2. 35 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 2. 36 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$

Allegato 4: Comportamento meccanico delle pavimentazioni indagate per spessori variabili dello strato legato

1. Comportamento meccanico del bitume e conglomerato bituminoso nei quattro periodi stagionali per uno spessore della pavimentazione di 25, 26 e 27cm

Mesi di D-G-F

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	င		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	5.3	50	25	52	-0.7	237

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	13300

Mesi di M-A-M

	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.5	50	25	52	-0.7	42

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4890

Mesi di G-L-A

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	31.2	50	25	52	-0.7	5

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	1170

Mesi di S-O-N

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.9	50	25	52	-0.7	40.3

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4760

2. Comportamento meccanico del bitume e conglomerato bituminoso nei quattro periodi stagionali per uno spessore della pavimentazione di 24 e 23cm

Mesi di D-G-F

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	5.29	50	25	52	-0.7	238

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	13300

Mesi di M-A-M

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.56	50	25	52	-0.7	42

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4890

Mesi di G-L-A

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	31.2	50	25	52	-0.7	5

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	1170

Mesi di S-O-N

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.86	50	25	52	-0.7	40.3

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4760

3. Comportamento meccanico del bitume e conglomerato bituminoso nei quattro periodi stagionali per uno spessore della pavimentazione di 22 cm

Mesi di D-G-F

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	5.27	50	25	52	-0.7	298

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	13300

Mesi di M-A-M

classe	Tempo di	•	Temp	Pen	Temp	Punto di	Indice	Rigidezza
bitume	carico	di carico	Bitume °C	0.1mm	Pen	rammoll.	Pen.	Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	18.57	50	25	52	-0.7	41.9

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4880

Mesi di G-L-A

classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
	(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
40/60	0.0199	8	31.2	50	25	52	-0.7	5

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	1170

Mesi di S-O-N

	classe bitume	Tempo di carico	Tempo di carico	Temp Bitume °C	Pen 0.1mm	Temp Pen	Punto di rammoll.	Indice Pen.	Rigidezza Bitume
		(s)	(Hertz)	°C		°C	°C		(MPa)
Ī	40/60	0.0199	8	18.9	50	25	52	-0.7	40.01

Vol. perc. Bitume %v/v	Vol. perc. Aggr. %v/v	Perc. Vuoti %v/v	Rigidezza congl.bitum.(MPa)
12	83	5	4740

4. Comportamento meccanico della fondazione al variare dei materiali indagati nei quattro periodi stagionali

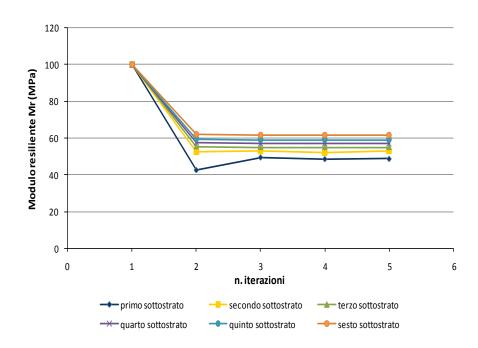
 F_{N1ns} con spessore dello strato legato di 25 cm

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	42.75	52.91	55.50	57.60	59.73	62.32		
3	49.62	53.17	55.10	57.06	59.15	61.67		
4	48.73	52.27	55.12	57.09	59.17	61.69		
5	48.84	53.15	55.11	57.08	59.16	61.69		

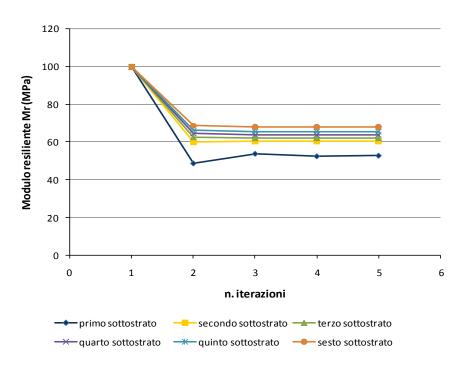
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	48.61	59.96	62.64	64.31	66.06	68.53		
3	53.73	60.41	62.11	63.66	65.40	67.82		
4	52.38	60.30	62.12	63.67	65.41	67.83		
5	52.71	60.33	62.11	63.67	65.41	67.83		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	65.05	74.48	77.10	77.70	78.38	80.15		
3	64.12	75.29	76.79	77.30	78.02	79.79		
4	64.11	75.29	76.80	77.30	78.02	79.79		
5	64.11	75.29	76.80	77.30	78.02	79.79		

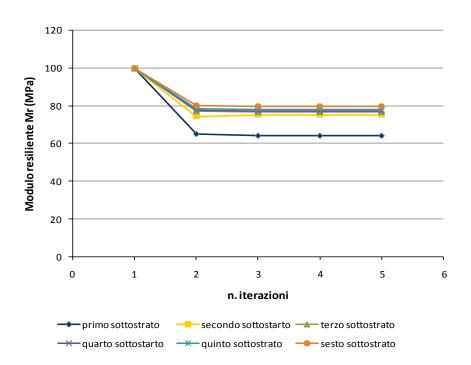
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	48.87	60.20	62.88	64.54	66.27	68.73		
3	53.80	60.65	62.35	63.89	65.61	68.03		
4	52.48	60.55	62.36	63.90	65.63	68.04		
5	52.48	60.55	62.36	63.90	65.63	68.04		



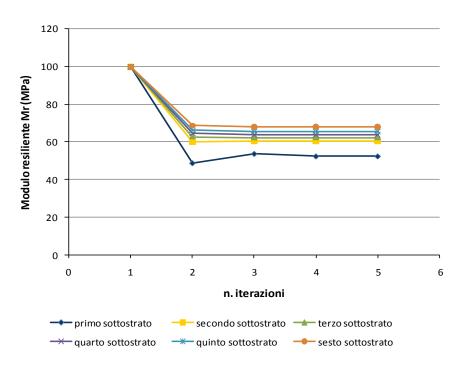
Allegato 3. 1 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $N1_{ns}$



Allegato 3. 2 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale N1_{ns}



Allegato 3. 3 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale N1_{ns}



Allegato 3. 4 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $N1_{ns}$

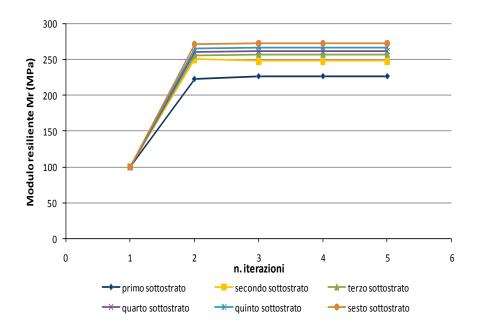
 F_{N2opc} con spessore dello strato legato di 22cm

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	223.34	250.70	256.51	261.04	265.66	271.22		
3	227.16	247.86	257.33	262.47	267.20	272.78		
4	227.16	247.78	257.34	262.47	267.21	272.79		
5	227.16	247.78	257.34	262.47	267.21	272.79		

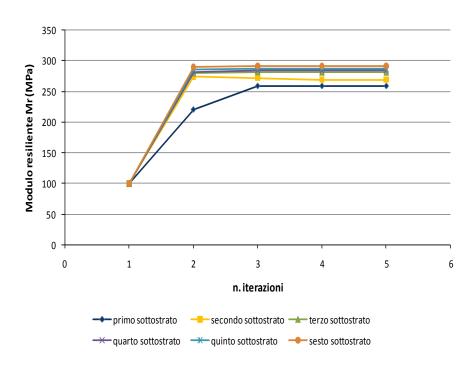
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	220.50	274.86	279.75	282.64	285.69	290.14		
3	258.81	272.63	281.62	284.83	287.78	292.01		
4	258.81	269.84	281.01	284.52	287.54	291.81		
5	258.81	269.84	281.01	284.52	287.54	291.81		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	304.99	318.38	320.73	319.94	319.48	320.91		
3	312.74	307.71	319.73	319.39	318.75	319.78		
4	312.56	306.88	319.61	319.24	318.60	319.63		
5	312.56	306.88	319.61	319.24	318.60	319.63		

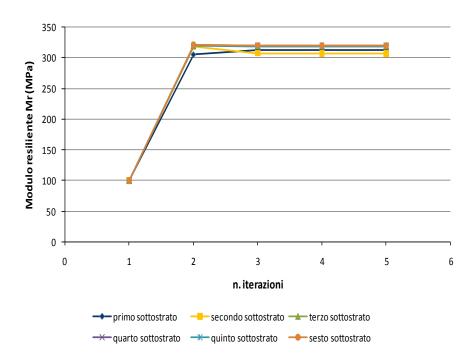
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (Mpa)	Mr (Mpa)	Mr (Mpa)	Mr (Mpa)	Mr (Mpa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	257.11	279.92	284.56	287.27	290.16	294.42		
3	263.00	275.25	285.78	289.13	291.99	296.03		
4	263.00	274.93	285.79	289.11	291.96	295.99		
5	263.00	274.93	285.79	289.11	291.96	295.99		



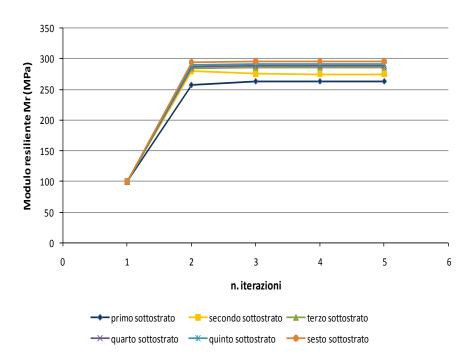
Allegato 3. 5 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $N1_{\text{opc}}$



Allegato 3. 6 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $N1_{opc}$



 $\textbf{Allegato 3. 7} \ \, \textbf{Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale \\ \textbf{N1}_{opc}$



Allegato 3. 8 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $N1_{opc}$

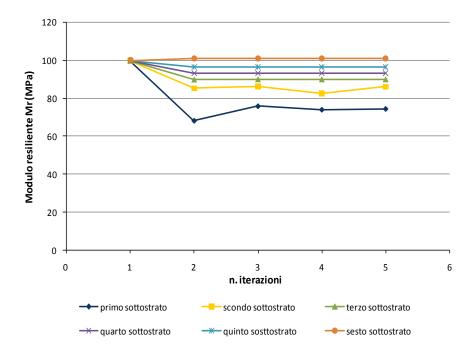
 F_{R2ns} con spessore dello strato legato di 25 cm

D.C.F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	68.31	85.50	89.83	93.21	96.68	100.99		
3	75.95	86.34	89.98	93.21	96.64	100.90		
4	74.11	82.73	89.96	93.21	96.65	100.92		
5	74.54	86.29	89.95	93.20	96.64	100.91		

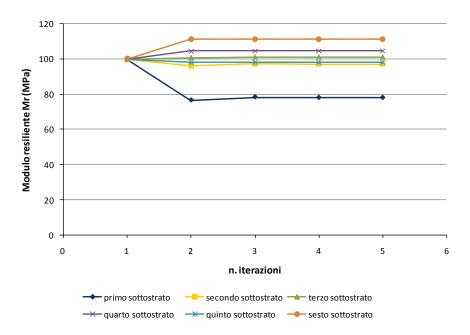
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	76.66	96.08	100.85	104.51	98.15	111.13		
3	78.45	97.24	101.16	104.59	98.26	111.29		
4	78.09	97.15	101.14	104.58	98.28	111.29		
5	78.09	97.15	101.14	104.58	98.28	111.29		

CLA	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	100.04	116.48	121.30	122.53	123.88	127.19		
3	100.88	117.44	121.97	121.97	124.45	127.71		
4	100.90	117.34	121.99	123.10	124.43	127.70		
5	100.90	117.34	121.99	123.10	124.43	127.70		

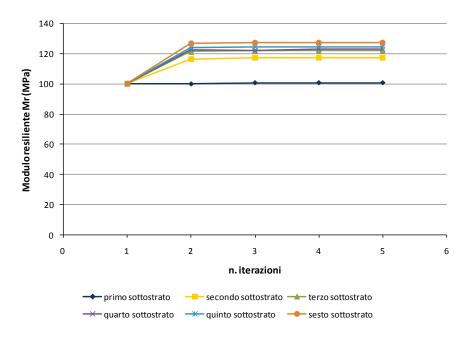
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	77.09	96.34	100.87	103.60	106.47	110.64		
3	78.74	97.54	101.20	103.77	106.63	110.77		
4	78.43	97.46	101.21	103.79	106.63	110.77		
5	78.43	97.46	101.21	103.79	106.63	110.77		



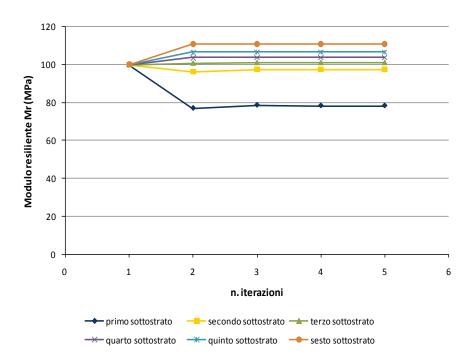
Allegato 3. 9 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns.}$



Allegato 3. 10 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R2_{ns.}



Allegato 3. 11 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns.}$



Allegato 3. 12 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R2_{ns.}$

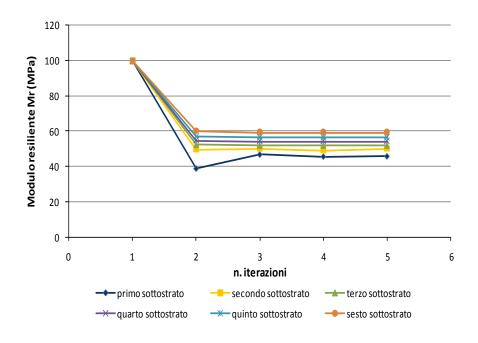
 F_{R3ns} con spessore dello strato legato di 25 cm

DCF	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	38.74	49.76	52.61	54.87	57.20	60.08		
3	46.70	50.09	52.14	54.24	56.52	59.31		
4	45.55	49.21	52.17	54.27	56.55	59.33		
5	45.70	50.07	52.15	54.26	56.54	59.33		

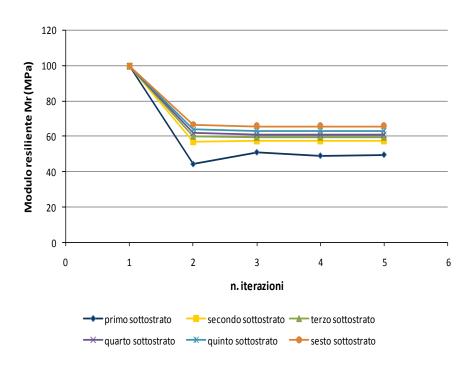
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (Mpa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	44.53	57.09	60.09	61.95	63.91	66.72		
3	51.21	57.68	59.49	61.18	63.13	65.86		
4	49.28	57.55	59.50	61.21	63.15	65.89		
5	49.82	57.57	59.49	61.20	63.14	65.87		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	61.20	72.14	75.31	76.08	76.95	79.13		
3	60.16	73.32	75.00	75.00	76.54	78.70		
4	60.15	73.31	75.00	75.64	76.54	78.70		
5	60.15	73.31	75.00	75.64	76.54	78.70		

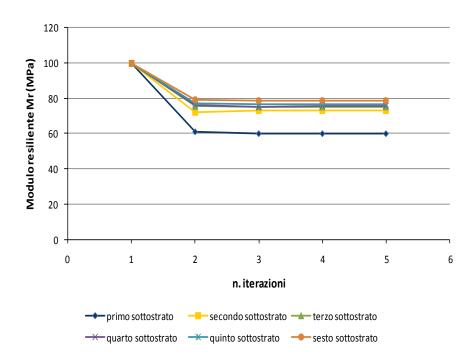
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	44.80	57.34	60.35	62.19	64.14	66.94		
3	51.29	57.94	59.73	61.43	63.36	66.09		
4	49.37	57.80	59.76	61.45	63.37	66.11		
5	49.94	57.84	59.75	61.44	63.37	66.10		



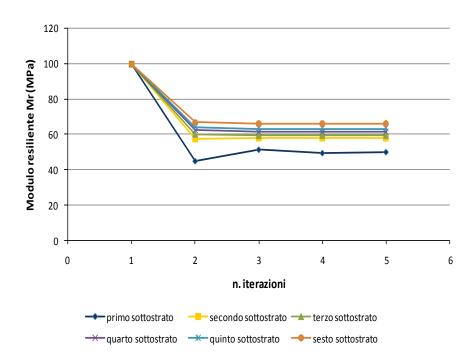
Allegato 3. 13 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R3_{ns.}$



Allegato 3. 14 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R3_{ns.}



Allegato 3. 15 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R3_{ns.}



Allegato 3. 16 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale R3_{ns.}

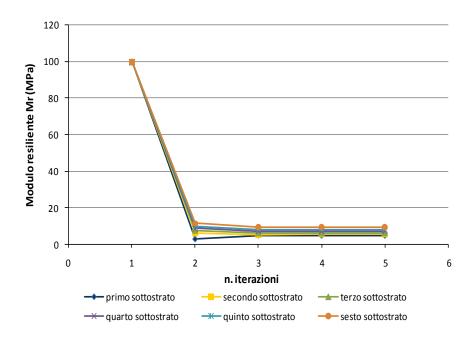
 $\mathbf{F}_{\mathbf{R4ckd}}$ con spessore dello strato legato di 27 cm

D-G-F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	3.09	6.34	7.54	8.58	9.75	11.33		
3	5.11	5.38	6.10	6.97	7.99	9.24		
4	4.97	5.63	6.13	6.99	7.98	9.22		
5	4.97	5.63	6.13	6.99	7.98	9.22		

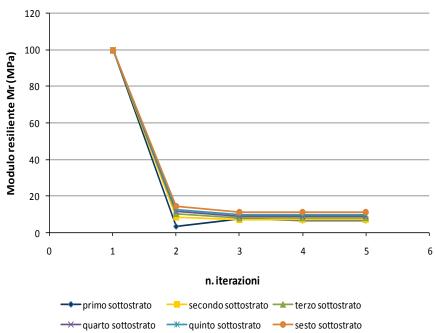
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	3.59	8.65	10.27	11.37	12.61	14.51		
3	7.52	7.18	7.84	8.76	9.87	11.34		
4	6.95	7.33	7.96	8.82	9.88	11.34		
5	6.95	7.33	7.96	8.82	9.88	11.34		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	7.66	14.38	17.16	18.14	19.20	21.50		
3	14.67	13.30	13.59	14.46	15.61	17.53		
4	12.52	13.05	13.56	14.34	15.44	17.33		
5	11.91	11.91	13.11	13.60	14.39	15.48		

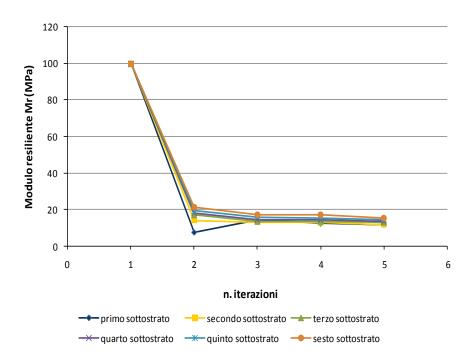
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	3.65	8.74	10.37	11.47	12.71	14.62		
3	7.62	7.26	7.91	8.84	9.95	11.43		
4	7.03	7.41	8.04	8.89	9.96	11.42		
5	7.03	7.41	8.04	8.89	9.96	11.42		



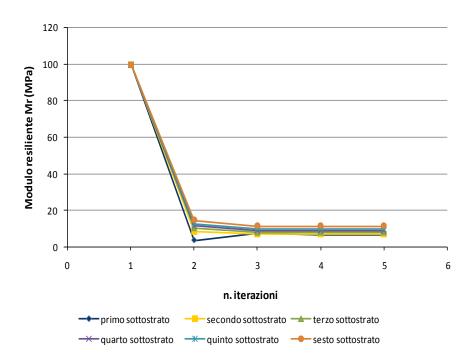
Allegato 3. 17 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R4_{ckd.}$



Allegato 3. 18 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R4_{ckd.}



Allegato 3. 19 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R4_{ckd.}



Allegato 3. 20 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R4_{ckd}$.

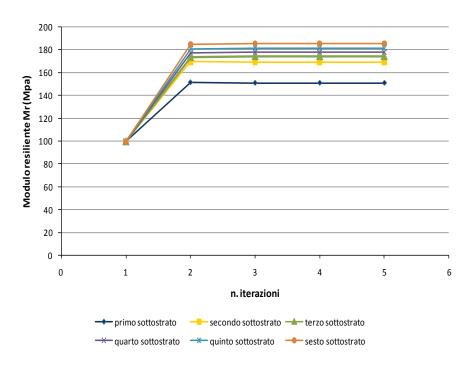
 $\mathbf{F}_{\mathbf{R5sa}}$ con spessore dello strato legato di 23 cm

D.C.F	Numero del sottostrato							
D-G-F	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	151.74	169.67	173.96	177.32	180.72	184.79		
3	151.26	169.18	174.58	178.12	181.56	185.66		
4	151.26	169.25	174.61	178.13	181.57	185.67		
5	151.26	169.25	174.61	178.13	181.57	185.67		

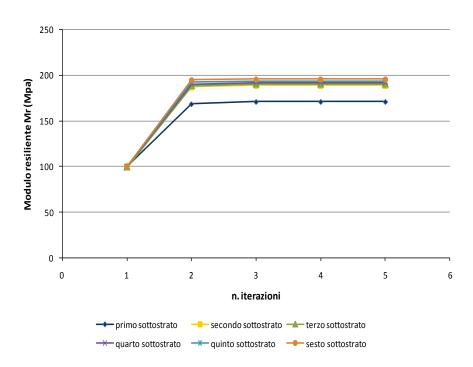
M-A-M	Numero del sottostrato							
IVI-A-IVI	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	168.65	187.19	189.07	190.98	192.86	194.74		
3	171.15	189.08	190.69	192.35	194.07	195.80		
4	171.18	189.10	190.69	192.37	194.07	195.82		
5	171.18	189.10	190.69	192.37	194.07	195.82		

G-L-A	Numero del sottostrato							
G-L-A	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	206.31	216.96	219.04	218.78	218.75	220.06		
3	210.68	214.15	219.72	219.54	219.33	220.47		
4	210.62	213.83	219.64	219.47	219.26	220.40		
5	210.62	213.83	219.64	219.47	219.26	220.40		

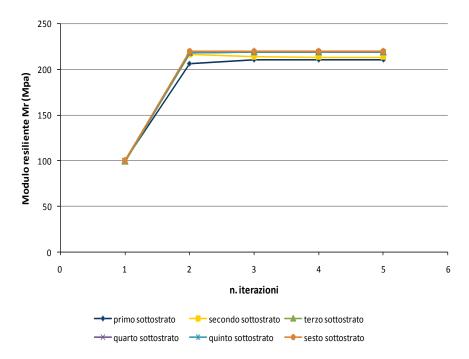
S-O-N	Numero del sottostrato							
3-U-IN	1	2	3	4	5	6		
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)		
1	100	100	100	100	100	100		
2	169.53	186.00	189.74	192.02	194.39	197.75		
3	172.30	185.18	190.79	193.23	195.58	198.90		
4	172.32	185.13	190.79	193.24	195.58	198.89		
5	172.32	185.13	190.79	193.24	195.58	198.89		



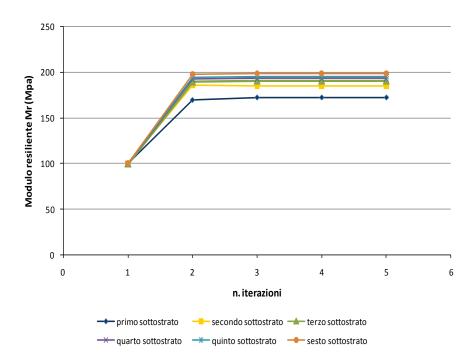
Allegato 3. 21 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R5_{sa}$



Allegato 3. 22 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale R5_{sa}



Allegato 3. 23 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale R5_{sa}



Allegato 3. 24 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R5_{sa}$

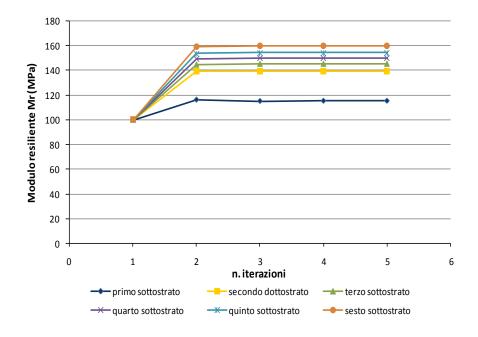
 F_{R6sa} con spessore dello strato legato di 24 cm

D-G-F	Numero del sottostrato						
	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	116.43	139.19	144.78	149.17	153.66	159.10	
3	115.33	139.46	145.45	149.91	154.41	159.92	
4	115.50	139.50	145.48	149.91	154.42	159.93	
5	115.50	139.50	145.48	149.91	154.42	159.93	

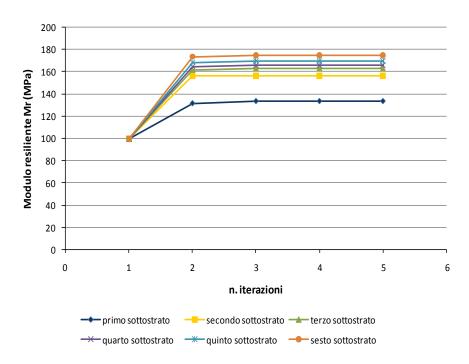
M-A-M	Numero del sottostrato						
	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	131.53	156.26	161.68	165.03	168.54	173.50	
3	133.48	156.26	162.82	166.28	169.79	174.75	
4	133.48	156.25	162.82	166.30	169.79	174.76	
5	133.48	156.25	162.82	166.30	169.79	174.76	

G-L-A	Numero del sottostrato						
	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	172.91	190.97	195.52	196.17	197.04	200.08	
3	177.14	188.05	196.51	197.36	198.13	201.01	
4	177.09	187.73	196.45	197.30	198.08	200.96	
5	177.09	187.73	196.45	197.30	198.08	200.96	

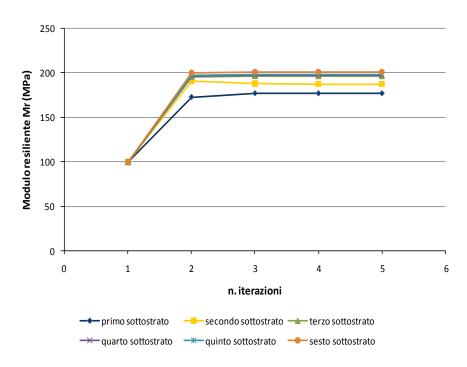
S-O-N	Numero del sottostrato						
	1	2	3	4	5	6	
ITERAZIONE	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	Mr (MPa)	
1	100	100	100	100	100	100	
2	133.56	156.83	162.25	165.57	169.02	173.98	
3	135.77	156.73	163.40	166.82	170.28	175.23	
4	135.77	156.63	163.37	166.77	170.28	175.26	
5	135.77	156.63	163.37	166.77	170.28	175.26	



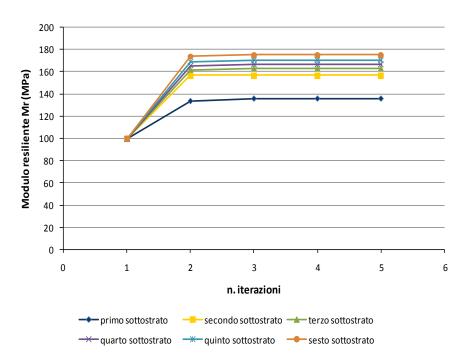
Allegato 3. 25 Moduli elastici relativi ai mesi di dicembre, gennaio e febbraio degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 3. 26 Moduli elastici relativi ai mesi di marzo, aprile e maggio degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 3. 27 Moduli elastici relativi ai mesi di giugno, luglio e agosto degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$



Allegato 3. 28 Moduli elastici relativi ai mesi di settembre, ottobre e novembre degli strati della fondazione con materiale $R6_{sa}$