

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Valutazione sperimentale dell'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato mediante sistemi modello



Relatore

prof. Ezio Santagata

Correlatori

prof. Davide Dalmazzo

prof. Pier Paolo Riviera

ing. Leonardo Urbano

Candidato

Antonio Scanu

Marzo 2019

ABSTRACT

testo

SINTESI

Il crescente sfruttamento delle risorse rinnovabili ha portato, negli ultimi decenni, alla progressiva consapevolezza di dover salvaguardare l'ambiente e i beni liberi per le generazioni future. Partendo dal materiale cardine di questo lavoro, attualmente si assiste ad un continuo coinvolgimento del fresato bituminoso (RAP) nei processi di riciclaggio. Quindi il RAP non è più inteso come un sottoprodotto di scarto derivante dalla filiera dell'edilizia ma come una risorsa.

L'utilizzo del fresato bituminoso all'interno dei conglomerati richiede però un attento studio della miscela, nella fase di mix design, in quanto le proprietà meccaniche di quest'ultima sono fortemente condizionate dalla presenza del bitume invecchiato contenuto nel RAP.

In particolare, uno scorretto impiego del RAP nella miscela bituminosa può comportare il prematuro insorgere di fenomeni di degrado. Per far fronte a questi problemi, si utilizzano dei prodotti (Attivanti Chimici Funzionali) che hanno il compito di rigenerare il RAP andando ad invertire il processo di invecchiamento del bitume in esso contenuto.

Attraverso il presente lavoro di tesi si vuole investigare l'azione rigenerante dei rejuvenators sul bitume invecchiato contenuto nel fresato bituminoso mediante la costruzione di un sistema modello contenente 100% RAP.

Sperimentalmente, si può definire il SISTEMA MODELLO come un sistema accuratamente progettato con il quale indagare particolari fenomeni fisico-meccanici, presupponendo che le acquisizioni sperimentali ottenute possano fornire indicazioni sul comportamento reale del film di bitume ossidato quando interagisce con gli additivi rigeneranti.

I parametri su cui si basa la costruzione del sistema modello sono relative alla sua composizione granulometrica e alla volumetria target dei campioni confezionati.

Il sistema modello è quindi concepito e costruito in modo tale da poter confezionare dei campioni di fresato bituminoso aventi struttura litica sempre identica, con un fissato numero di punti di contatto per unità di volume tra i grani del RAP.

I materiali utilizzati nella sperimentazione sono del RAP di classe granulometrica 5/8 mm, due diversi tipi di rejuvenator ed un bitume vergine. Le possibili combinazioni di questi materiali consentono di confezionare diversi tipi di campioni nel rispetto dei criteri imposti del concetto di sistema modello.

Questi campioni sono poi stati testati con delle prove meccaniche per poter valutare sperimentalmente l'efficacia degli additivi rigeneranti. Le prove alle quali sono stati sottoposti i campioni sono:

- Prova di modulo di rigidezza;
- Prova di resistenza alla rottura per trazione indiretta;
- Prova di modulo resiliente;
- Prova di resistenza alla rottura per compressione semplice;
- Prova di resistenza alla rottura per taglio.

La sperimentazione ha permesso di mettere in luce la differenza in termini di prestazioni meccaniche tra i campioni di solo RAP e quelli additivati coi rejuvenators. È quindi possibile affermare che l'uso di additivi rigeneranti riduce la rigidezza dei sistemi composti da 100% RAP e la loro resistenza in termini di carico di picco, mentre incrementa lo spostamento a rottura rendendo più deformabili i campioni.

RINGRAZIAMENTI

testo

SOMMARIO

ABSTRACT.....	i
SINTESI	iii
RINGRAZIAMENTI.....	v
SOMMARIO	vii
SOMMARIO DELLE TABELLE	ix
SOMMARIO DEI GRAFICI.....	xi
SOMMARIO DELLE FIGURE.....	xiii
1 INTRODUZIONE	1
2 RIUTILIZZO DEL FRESATO BITUMINOSO: STATO DELL'ARTE	5
2.1 Fresato bituminoso (RAP)	6
2.1.1 Origine del RAP	7
2.1.2 Normative in merito all'utilizzo del fresato	8
2.1.3 Gestione del RAP.....	12
2.1.4 Effetti del fresato bituminoso nella miscela	13
2.1.5 Problematiche legate all'uso del RAP	15
2.1.6 Produzione del conglomerato bituminoso contenente RAP	17
2.2 Attivanti Chimici Funzionali (ACF).....	19
2.2.1 Scelta del dosaggio di ACF.....	22
2.2.2 Normativa in merito all'uso di additivi rigeneranti del fresato	23
2.3 Tipologie di indagine sull'efficacia degli ACF	23
3 SPERIMENTAZIONE.....	27
3.1 Scelta della classe granulometrica	28
3.2 Scelta dei materiali.....	29
3.3 Costruzione del sistema modello.....	31
3.4 Analisi dei campioni confezionati seguendo il criterio del sistema modello	32
4 PROPRIETA' DEI MATERIALI E COMPOSIZIONE	35
4.1 RAP	35
4.1.1 Granulometria del RAP classe 5/8	36
4.1.2 Contenuto di legante	40
4.1.3 Granulometria degli aggregati classe 5/8	41

4.1.4	Determinazione della Massima Massa Volumica Teorica.....	45
4.1.5	Lavorabilità.....	47
4.2	ACF.....	53
4.2.1	ECO ACF+.....	54
4.2.2	Polygen RF.....	54
4.3	Bitume vergine.....	55
5	METODOLOGIE DI PROVA.....	57
5.1	Determinazione dei parametri del sistema modello.....	58
5.2	Confezionamento dei campioni.....	60
5.2.1	Campioni da 65 mm e curve di compattazione.....	60
5.2.2	Campioni da 200 mm.....	61
5.3	Modulo di rigidezza (ITSM).....	62
5.4	Resistenza a rottura per trazione indiretta (ITS).....	69
5.5	Modulo resiliente.....	73
5.6	Resistenza a rottura per compressione semplice (UCS).....	75
5.7	Resistenza a rottura a taglio (LPDS).....	77
6	ANALISI DEI RISULTATI.....	79
6.1	Caratteristiche di addensamento.....	79
6.2	Modulo di rigidezza (ITSM).....	83
6.3	Resistenza a rottura per trazione indiretta (ITS).....	86
6.4	Modulo resiliente.....	101
6.5	Resistenza a rottura per compressione semplice (UCS).....	104
6.6	Resistenza a rottura a taglio (LPDS).....	111
7	CONCLUSIONI.....	113
8	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	117

SOMMARIO DELLE TABELLE

tabella 4.1: Valori percentuali di passante progressivo RAP, test 1	38
tabella 4.2: Valori percentuali di passante progressivo RAP, test 2	38
tabella 4.3: Valori percentuali medi di passante progressivo RAP	39
tabella 4.4: Contenuto di legante del RAP	41
tabella 4.5: Valori percentuali di passante progressivo degli aggregati spogli, test 1.....	43
tabella 4.6: Valori percentuali di passante progressivo degli aggregati spogli, test 2	44
tabella 4.7: Valori percentuali medi di passante progressivo degli aggregati spogli.....	45
tabella 4.8: MMVT dei materiali oggetto di studio	47
tabella 4.9: Percentuale di vuoti del RAP a 10, 100 e 180 giri	52
tabella 4.10: Valori di K e C1	52
tabella 5.1: Proprietà volumetriche a 30 rotazioni della pressa giratoria	58
tabella 5.2: VMA target del sistema modello	59
tabella 5.3: Composizione dei campioni snelli.....	61
tabella 5.4: Massa totale ed altezza dei campioni snelli.....	62
tabella 6.1: VMA campioni di RAP	79
tabella 6.2: VMA campioni di RAP + ACF_1	80
tabella 6.3: VMA campioni di RAP + bitume 2.2%	80
tabella 6.4: VMA campioni di RAP + ACF_1 + bitume 2.2%	80
tabella 6.5: VMA campioni di bianco	80
tabella 6.6: VMA campioni di RAP + ACF_2	80
tabella 6.7: Modulo di rigidezza RAP + ACF_1, campione 1 dopo 7 giorni di maturazione	84
tabella 6.8: Moduli di rigidezza corretti al variare del tempo - valori medi	84
tabella 6.9: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP.....	86
tabella 6.10: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP + ACF_1... 86	
tabella 6.11: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP + ACF_2... 87	
tabella 6.12: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni - RAP	87
tabella 6.13: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_1.. 87	
tabella 6.14: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + bitume 2.2%.....	87
tabella 6.15: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_1 + bitume 2.2%	87
tabella 6.16: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – Campioni ricostituiti	88
tabella 6.17: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_2. 88	
tabella 6.18: Carico massimo, spostamento a rottura e ITS a 3 giorni - Valori medi	88
tabella 6.19: Carico massimo, spostamento a rottura e ITS a 28 giorni - Valori medi	90
tabella 6.20: Valori medi di tensione e deformazione a rottura - Prova UCS.....	107

SOMMARIO DEI GRAFICI

Grafico 4.1: Curve granulometriche RAP	39
Grafico 4.2: Curva granulometrica media RAP	39
Grafico 4.3: Curve granulometriche degli aggregati	44
Grafico 4.4: Curve granulometriche medie del RAP e degli aggregati spogli	45
Grafico 4.5: Curva di compattazione RAP a 180 giri	52
Grafico 5.1: Curva RTI carico normalizzato vs spostamento.....	72
Grafico 5.2: Curva di compressione semplice F-s	76
Grafico 6.1: Moduli di rigidezza corretti al variare del tempo - valori medi.....	84
Grafico 6.2: Modulo di rigidezza mediato nel tempo	85
Grafico 6.3: max P - a 3 giorni	88
Grafico 6.4: Spostamento a rottura - a 3 giorni	89
Grafico 6.5: ITS - a 3 giorni	89
Grafico 6.6: max P - a 28 giorni	90
Grafico 6.7: Spostamento a rottura - a 28 giorni.....	91
Grafico 6.8: ITS - a 28 giorni	92
Grafico 6.9: max P - confronto 3 vs 28 giorni.....	93
Grafico 6.10: Spostamento a rottura - confronto 3 vs 28 giorni.....	93
Grafico 6.11: ITS - confronto 3 vs 28 giorni.....	94

SOMMARIO DELLE FIGURE

Figura 1.1: Schema del sistema modello	3
Figura 2.1: Costo del conglomerato bituminoso al crescere della percentuale di RAP.....	6
Figura 2.2: Costo del bitume negli ultimi 25 anni	6
Figura 2.3: RAP; Fresa stradale al lavoro	7
Figura 2.4: Percentuali di fresato impiegabili per la produzione di CB.....	10
Figura 2.5: Schema rappresentante il concetto di partial blending.....	14
Figura 2.6: Alligator cracking e thermal cracking.....	16
Figura 2.7: Rutting.....	16
Figura 2.8: Bleeding di una pavimentazione.....	17
Figura 2.9: Impianto di produzione HMA.....	19
Figura 2.10: Composizione del bitume in funzione del grado di invecchiamento (Zaumanis, 2014).....	20
Figura 2.11: Schema della diffusione del rejuvenator (Zaumanis, 2014)	21
Figura 2.12: Schema della sperimentazione di Zaumanis, 2014.....	24
Figura 3.1: Campioni di solo RAP di differenti classi granulometriche	29
Figura 3.2: Schema dei campioni compattati seguendo il criterio del sistema modello .	31
Figura 4.1: Alcune frazioni granulometriche costituenti il cumulo di RAP; RAP.....	36
Figura 4.2: Cumulo di RAP steso per favorire l'essiccazione.....	36
Figura 4.3: Setacciatore elettromagnetico	37
Figura 4.4: Carbolite.....	40
Figura 4.5: Aggregati spogli prima della setacciatura; Preparazione del test.....	42
Figura 4.6: Impianto a vuoto; Picnometri corredati di tappi	46
Figura 4.7: Picnometri contenenti il campione appena deaerato	46
Figura 4.8: Pressa giratoria; Schema di compattazione.....	48
Figura 4.9: Fustella per la pressa giratoria.....	49
Figura 4.10: Monitoraggio della temperatura; miscelazione del RAP con Rejuvenator...	50
Figura 4.11: Alloggiamento della fustella nella pressa giratoria.....	50
Figura 4.12: Interfaccia per il settaggio della modalità di compattazione	51
Figura 4.13: Campione di RAP compattato con la pressa giratorio; Estrusione del campione	51
Figura 4.14: Additivo ECO ACF+; Additivo Polygen RF	53
Figura 4.15: Spruzzini contenenti i rejuvenators	54
Figura 4.16: Stoccaggio del bitume vergine.....	55
Figura 5.1: Scelta della modalità di compattazione.....	60
Figura 5.2: Campioni da 65 mm contrassegnati in bianco per indicare il tipo di materiale	61
Figura 5.3: Campione di solo RAP, h=200 mm.....	62
Figura 5.4: Struttura di carico del NAT; Unità pneumatica; Unità di acquisizione dati e controllo.....	64
Figura 5.5: Schematizzazione dell'impulso di carico.....	65
Figura 5.6: Caratteristiche tensodeformative del campione durante la prova di modulo di rigidezza	65
Figura 5.7: Castelletto per prova ITSM; Cornice di fissaggio dei trasduttori	67
Figura 5.8: Trasduttore LVDT	67
Figura 5.9: Messa in carico dei trasduttori LVDT fino all'intervallo di lavoro.....	67
Figura 5.10: Schema di prova ITSM estratta da UNI EN 12697-26	68

Figura 5.11: Pressa statica.....	70
Figura 5.12: schema della configurazione di prova ITS.....	71
Figura 5.13: Pressa statica; Campioni sottoposti alla prova di trazione indiretta	72
Figura 5.14: Tipologie di rottura a trazione indiretta.....	73
Figura 5.15: Equipaggiamento per l'esecuzione della prova di modulo resiliente	74
Figura 5.16: Esecuzione prova di compressione semplice; Campione portato a rottura .	76

1 INTRODUZIONE

Attraverso il presente lavoro di tesi si vuole investigare l'azione rigenerante dei rejuvenators sul bitume invecchiato contenuto nel fresato bituminoso mediante la costruzione di un sistema modello contenente 100% RAP.

Sperimentalmente, si può definire il SISTEMA MODELLO come un sistema accuratamente progettato con il quale indagare particolari fenomeni fisico-meccanici, presupponendo che le acquisizioni sperimentali ottenute possano fornire indicazioni sul comportamento reale del film di bitume ossidato quando interagisce con gli additivi rigeneranti.

Il contesto nel quale si inquadra la presente sperimentazione è articolato ed ampio. Partendo dal materiale cardine di questo lavoro, attualmente si assiste ad un continuo coinvolgimento del fresato bituminoso nei processi di riciclaggio: l'obiettivo è quello di rivitalizzarlo, andando sempre più intensamente verso la concezione di economia circolare. Il fresato bituminoso, quindi, non è più inteso come un sottoprodotto di scarto derivante dalla filiera dell'edilizia ma come una risorsa.

Studi di settore mostrano come il RAP sia una vera e propria fonte alternativa, tecnicamente valida, per la costruzione di pavimentazioni stradali. Infatti, la moderna concezione di pavimentazione stradale si fonda anche su criteri di economicità e sostenibilità, congiunti ad elevate prestazioni. Oltre ad abbattere i costi diretti ed indiretti di produzione, l'aggiunta del fresato nelle miscele di nuova generazione comporta un'importante riduzione dello sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili, prevalentemente materiali lapidei e legante bituminosi di origine idrocarburica.

L'utilizzo del fresato bituminoso all'interno dei conglomerati richiede però un attento studio della miscela, nella fase di mix design, in quanto le proprietà meccaniche di quest'ultima sono fortemente condizionate dalla presenza del bitume invecchiato contenuto nel RAP.

In particolare, uno scorretto impiego del RAP nella miscela bituminosa può comportare il prematuro insorgere di fenomeni di degrado, essenzialmente legati all'eccessiva rigidità globale del conglomerato, quali crack termico, fessurazione per fatica, spogliamento degli aggregati, etc.

Per far fronte a questi problemi, si utilizzano dei prodotti che hanno il compito di

rigenerare il RAP andando ad invertire il processo di invecchiamento del bitume in esso contenuto. Ciò avviene poiché tali prodotti (noti come Attivanti Chimici Funzionali, ACF o nel linguaggio internazionale Rejuvenators) implementano i gruppi funzionali volatilizzati durante il processo ossidativo del legante, ristabilendone la giusta proporzione all'interno del bitume.

L'efficacia degli ACF è ampiamente comprovata infatti, in letteratura si trovano svariati studi che lo dimostrano. Tali studi sfruttano differenti approcci per valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti: alcuni includono test di tipo reologico sul bitume invecchiato e successivamente rigenerato estratto dal RAP, altri includono test sul conglomerato bituminoso contenente RAP additivato con i rejuvenators.

In generale, le sperimentazioni a riguardo sono mirate ad indagare il comportamento reologico del bitume e quello meccanico delle miscele sotto le condizioni ritenute più critiche per il RAP.

Alcuni esempi di test maggiormente eseguiti in letteratura sono quello sul punto di rammollimento, la determinazione del modulo complesso G^* ed angolo di fase δ , il test sulla rottura per effetti termici (thermal stress restrained specimen test TSRST), il test di resistenza alla rottura per trazione indiretta ed il test di resistenza all'ormaiamento.

Col presente lavoro di tesi si vuole sviluppare una procedura di prova sperimentale atta a valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato bituminoso con un approccio innovativo: si sfrutta infatti il concetto di sistema modello per ridurre al minimo le incertezze legate alla composizione granulometrica del materiale, forma e dimensione degli aggregati, tipo e quantità di bitume invecchiato del fresato bituminoso.

Ciò permette di evidenziare il comportamento del legante rispetto a quello dello scheletro litico, così da poter valutare l'effetto degli additivi rigeneranti e del bitume vergine di aggiunta al RAP.

In questo modo si è cercato di ridurre la dipendenza dallo scheletro litico rendendolo una costante per tutti i campioni e si è fatta variare solo la composizione del legante in essi contenuto.

Il sistema modello è concepito e costruito in modo tale da poter confezionare dei campioni di fresato bituminoso aventi struttura litica sempre identica, con un fissato numero di punti di contatto per unità di volume tra i grani del RAP. Il parametro che consente di realizzare quanto appena detto è la VMA (Voids in Mineral Aggregates), la

quale viene posta costante.

Per realizzare il sistema modello è stata estratta dal cumulo di RAP la frazione granulometrica 5/8 mm per ottenere un sistema quasi monogranulare che, essendo composto da aggregati con una forma regolare, può essere schematizzato con delle sferette di diametro compreso all'interno del range 5/8 mm.

Questo consente di avere un minor numero di punti di contatto tra i grani del RAP ed allo stesso tempo una percentuale di vuoti maggiore, che metta maggiormente in risalto il comportamento del legante.

Una volta fissati i parametri che definiscono in maniera univoca il sistema modello, sono stati confezionati dei campioni con VMA target contenenti una combinazione di RAP, due differenti rejuvenators ed un bitume vergine di classe 50/70.

L'immagine di seguito riporta la schematizzazione dei campioni aventi volumetria target, con il modello delle sferette:

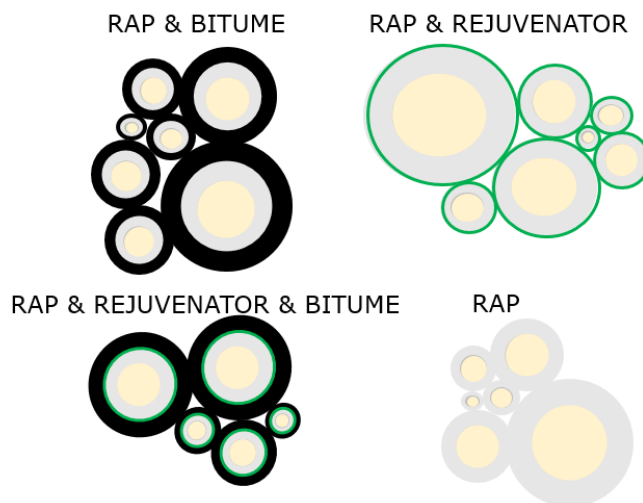


Figura 1.1: Schema del sistema modello

I campioni così confezionati sono stati testati per determinare le caratteristiche meccaniche e poter così valutare sperimentalmente l'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato bituminoso.

La campagna sperimentale si è focalizzata sulla realizzazione delle prove per la determinazione del modulo di rigidità (ITSM), della resistenza a rottura per trazione indiretta (ITS), del modulo resiliente, della resistenza a rottura a compressione semplice (UCS), della resistenza a rottura a taglio (LPDS).

Al termine della fase sperimentale si è poi proceduto all'elaborazione e critica dei risultati

ottenuti per poter trarre le conclusioni.

Il presente lavoro di tesi è strutturato in capitoli, ognuno dei quali riporta nello specifico le fasi in cui si può suddividere la sperimentazione.

Dopo una prima fase di studio della letteratura, descritta nel capitolo 2, viene sviluppata la metodologia sperimentale:

- Capitolo 3: SPERIMENTAZIONE, nel quale viene descritto nel dettaglio il programma sperimentale;
- Capitolo 4: PROPRIETA' DEI MATERIALI E COMPOSIZIONE, che riporta la caratterizzazione dei materiali impiegati durante la sperimentazione;
- Capitolo 5: METODOLOGIE DI PROVA, nel quale vengono descritti i protocolli seguiti nella fase sperimentale;
- Capitolo 6: ANALISI DEI RISULTATI, che riporta l'elaborazione ed il commento sui risultati delle prove eseguite;
- Capitolo 7: CONCLUSIONI, nel quale vengono sintetizzati i commenti sui parametri investigati, vengono fornite le conclusioni e i possibili sviluppi futuri dello studio.

2 RIUTILIZZO DEL FRESATO BITUMINOSO: STATO DELL'ARTE

Il crescente sfruttamento delle risorse rinnovabili, così come l'immissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera e l'eccessivo impatto antropico sui sistemi naturali ha portato, negli ultimi decenni, alla progressiva consapevolezza di dover salvaguardare l'ambiente e i beni liberi per le generazioni future. Tale problema, ormai radicato anche nel settore dell'ingegneria civile, ha dato luogo ad una maggiore attenzione verso lo sviluppo sostenibile ed ecocompatibile con la conseguente tendenza al riutilizzo dei materiali nel settore di afferenza.

I governi e i gestori della rete stradale hanno quindi iniziato ad effettuare ricerche per caratterizzare ed ottimizzare le caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi contenenti il fresato stradale (più comunemente noto come RAP).

I benefici che si hanno grazie all'uso del conglomerato bituminoso di recupero sono molteplici e universalmente riconosciuti. Il più importante è sicuramente quello ambientale, con il risparmio di materie prime non rinnovabili. Ciò influenza il *Carbon Footprint* e la LCA (Life Cycle Assessment) inerenti la produzione di conglomerati bituminosi. Infatti, il riutilizzo condiziona positivamente gli indici correlati a:

- l'impiego di materie prime non rinnovabili poiché il fresato prende il posto di aggregati e bitume vergini che derivano da lavorazioni ad elevato impatto ambientale;
- la riduzione della gestione dei materiali derivanti dalla demolizione delle pavimentazioni esistenti e/o del loro stoccaggio in discarica;
- le emissioni dirette poiché la possibilità di utilizzare tecnologie innovative a minori temperature consente di abbassare le emissioni dei bruciatori anche del 50%;
- i trasporti visto che la possibilità di eseguire lavorazioni direttamente in situ consente di ridurre o addirittura eliminare gli impatti dovuti al trasporto verso il cantiere.

Un ulteriore vantaggio nell'uso del RAP è quello economico, infatti si stima che il costo per tonnellata di conglomerato bituminoso prodotto con percentuale di RAP variabile da 0% a 100% segua l'andamento rappresentato in figura (Zaumanis, 2014): il costo del conglomerato a caldo contenente 100% RAP si riduce del 50/70% rispetto ad un conglomerato composto da solo materiale vergine. Questi risultati sono coerenti con le

stime effettuate dai produttori di miscele bituminose contenenti 100% RAP. (Zaumanis, 2004).

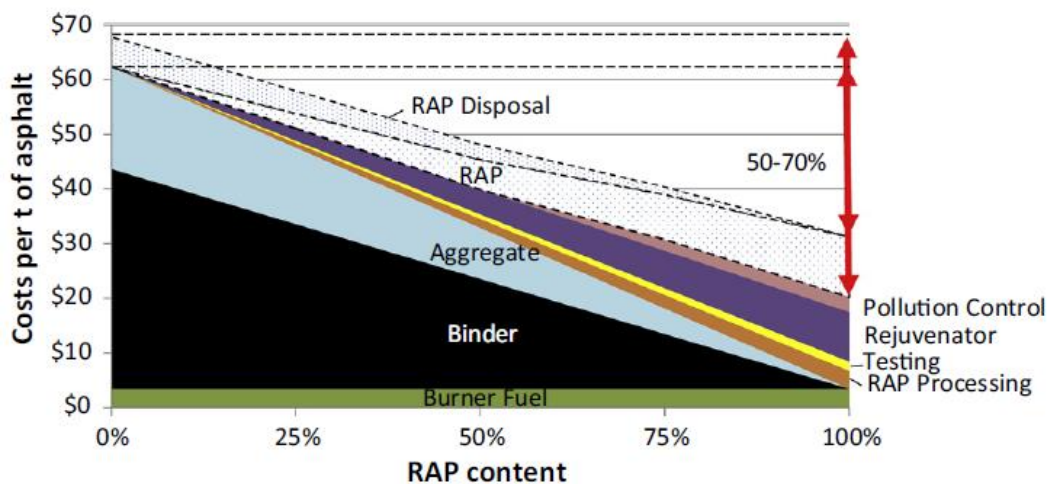


Figura 2.1: Costo del conglomerato bituminoso al crescere della percentuale di RAP

Chiaramente, la maggior parte dei costi deriva dal prezzo del bitume: la seguente figura mostra l'andamento del prezzo del bitume, componente di maggior costo nei conglomerati bituminosi, negli ultimi 25 anni (Zaumanis, 2004).

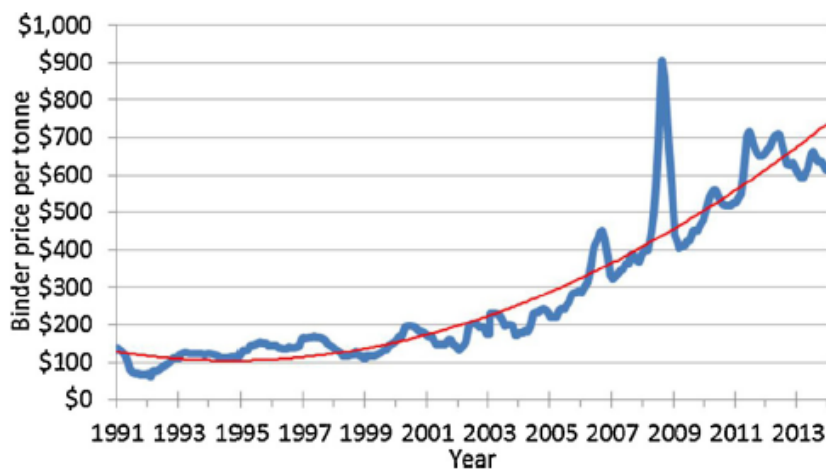


Figura 2.2: Costo del bitume negli ultimi 25 anni

2.1 FRESATO BITUMINOSO (RAP)

RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) è il termine utilizzato per indicare il conglomerato bituminoso rimosso dalla pavimentazione stradale e successivamente processato (FHWA-<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>).

2.1.1 ORIGINE DEL RAP

Il RAP è composto da aggregati lapidei e bitume invecchiato e si genera quando, attraverso la demolizione completa o la fresatura, si rimuove la pavimentazione per la ricostruzione della stessa, il rifacimento del manto di usura o per avere accesso alle utenze interraste.



Figura 2.3: RAP; Fresa stradale al lavoro

Nella maggior parte dei casi, il fresato bituminoso è conferito presso impianti autorizzati: può essere direttamente stoccato o soggetto ad una serie di operazioni tra cui la frantumazione, vagliatura e stoccaggio. Sebbene la maggior parte del materiale bituminoso di risulta dalle operazioni di demolizione sia trasportato negli impianti di lavorazione, vi è anche la possibilità di riutilizzare il RAP immediatamente dopo la fresatura con tecniche a freddo (cold mix). Infatti, il fresato può essere impiegato nella formazione di strati di base o stabilizzato attraverso l'uso del macchinario pulvimixer il quale miscela in situ il RAP con altri materiali (aggregati vergine, legante, additivi rigeneranti). Il RAP così miscelato viene steso e subito compattato mediante rulli.

Gli Stati Uniti sono stati i precursori delle tecniche di reimpiego del RAP: infatti, il riciclaggio del fresato fu sperimentato per la prima volta agli inizi del secolo scorso. Tuttavia si diffuse su larga scala solo nel corso degli anni Settanta. Il fattore chiave fu l'aumento del costo del greggio del petrolio per via dell'embargo imposto dai Paesi Arabi. Il recupero del fresato nella costruzione di nuove pavimentazioni è una procedura consolidata anche in Europa. Non solo attraverso tecniche a caldo ma anche per mezzo di tecnologie a tiepido e a freddo.

Tuttavia, malgrado le numerose esperienze internazionali e la letteratura tecnica a disposizione, il contesto italiano esula da quello mondiale (l'utilizzo medio del fresato è

del 20-30% su quanto prodotto annualmente). Al tempo stesso nonostante la normativa italiana sia in fase evolutiva, sono fornite alcune indicazioni sulle modalità di riciclo del fresato bituminoso:

- direttamente in situ come “aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici o bitume”;
- in impianto come “aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici”;
- in impianto come “aggregati più bitume” per la produzione di sottobasi, ecobasi e conglomerati bituminosi con controllo secondo Norma UNI EN 13108 – 8, per la Marcatura CE dei conglomerati bituminosi.

(Il fresato: materiale ecosostenibile per la produzione di miscele bituminose – Strade & Autostrade)

2.1.2 NORMATIVE IN MERITO ALL'UTILIZZO DEL FRESATO

La classificazione, descrizione e riutilizzo del fresato bituminoso è regolamentata dalle normative UNI EN 13108/8 e la AASHTO M 323 a cui si affiancano le linee guida descritte dal Capitolato ANAS.

In Italia, il Capitolato ANAS fornisce delle linee guida da seguire per l'integrazione del fresato nei conglomerati bituminosi:

“In caso di utilizzo di materiale fresato, la classificazione del materiale andrà fatta secondo la UNI EN 13108/8.

I conglomerati bituminosi fresati dalle pavimentazioni, per brevità chiamati nel seguito “fresati”, sono materiali provenienti da fresature dirette, a freddo o a caldo, o da demolizioni a blocchi di pavimentazioni preesistenti sottoposte a successiva frantumazione. Essi vanno utilizzati o nei conglomerati bituminosi, con o senza altri materiali vergini, oppure per la costruzione di rilevati di qualsiasi tipo, per piazzole di sosta, rampe di conversione o d'uscita per usi di servizio o in condizioni di blocco stradale, allargamento di corsie d'emergenza, aree di parcheggio, d'atterraggio elicotteri ecc. e per tutte le sottofondazioni delle pavimentazioni.

L'impiego del fresato deve rispondere a quanto prescritto dal TU Ambientale 152/06. In particolare, la messa in riserva e l'impiego di fresato per gli usi sopra descritti, al di fuori dei conglomerati bituminosi, è subordinato all'esecuzione del “test di cessione” sul rifiuto

eseguito sul materiale tal quale, secondo il metodo riportato in allegato n° 3 al Decreto Ministeriale del Ministero dell'Ambiente n° 72 del 5 febbraio 1998 (Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del DL n° 22 del 5 febbraio 1997).

I materiali risultanti positivi o vengono inertizzati prima dell'uso (per lavaggio o per rivestimento con calce) o devono essere inviati a discarica autorizzata.

La durata della messa a riserva provvisoria non deve mai superare un anno, ed il suo utilizzo al di fuori dei conglomerati bituminosi deve essere accompagnato da un progetto da presentare con la richiesta di sistemazione definitiva.

Ai fini del massimo reimpiego nelle miscele a caldo di conglomerati bituminosi fresati, si danno qui di seguito le indicazioni necessarie al corretto utilizzo.

Per gli strati di base base-binder e binder si possono usare fresati di qualsiasi provenienza, mentre per le miscele da impiegare negli strati di usura va usato solo fresato proveniente da strati di usura drenanti o meno.

Tutto il fresato prima dell'impiego va "vagliato" al 30 mm, per gli strati di base e base-binder, e al 20 mm per gli strati di binder e usura; ciò al fine di evitare di comprendere elementi grossolani e per ridurre la "variabilità" della miscela.

L'impiego dei fresati comporta l'impiego di rigeneranti (1 - 5% in peso sul bitume totale) per il vecchio bitume; tali rigeneranti devono essere approvati come indicato all'art 6.3 e vanno impiegati in particolari zone (es. zone ad elevato traffico) e sempre su indicazione della DL.

In caso di impiego di fresato le percentuali minime di bitume totale salgono di 0,2% per tutte le miscele (vedi punti 7.1.7 e 7.1.8) considerando nella miscela totale anche il bitume contenuto nel fresato.

Il controllo della percentuale di fresato da parte della DL potrà essere effettuato direttamente in impianto.

Ai fini del reimpiego (in base alla disponibilità e alla tipologia dell'impianto) e possibile impiegare le seguenti percentuali di fresato:

	% di impiego di fresato														
	Usura a			Usura b			Binder			Basebinder			Base		
Tipologia bitume	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD
% di fresato	≤10	≤15	≤15	≤10	≤15	≤15	≤15	≤25	≤20	≤15	≤25	≤20	≤15	≤30	≤25
% di ACF sul bitume	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	3-5	3-5	3-5	3-5	3-5	3-5

Figura 2.4: Percentuali di fresato impiegabili per la produzione di CB

Vengono date inoltre delle linee guida per effettuare la rigenerazione del fresato mediante emulsione bituminosa modificata:

“La rigenerazione in sito a freddo mediante emulsione modificata delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso viene realizzata reimpiegando materiali fresati da pavimentazioni stradali, opportunamente selezionati, legati nuovamente con emulsione, stesi e compattati.

La tecnologia viene impiegata per riciclare pacchetti di conglomerato bituminoso ammalorati in sito o già stoccati in cantiere (fresati).

La tecnologia del riciclaggio con emulsione prevede diverse modalità operative: in sito mediante treno di riciclaggio mobile o tramite idonee riciclatrici in impianto fisso o tramite impianti semoventi (su rimorchi) che hanno la possibilità di essere collocati in aree vicino al sito di stesa.

Gli spessori degli strati compattati potranno variare da 12 a 20 cm.”

Per quanto riguarda i materiali inerti:

“La tecnologia del riciclaggio con emulsione permette di riciclare fresati di pavimentazioni ammalorate per la formazione di strati di base e base-binder, miscelando con emulsione bituminosa modificata, cemento e acqua il fresato (in sito o in impianto idoneo) stendendo (con finitrice) e compattando il pacchetto risultante.

Per la realizzazione della miscela ai fini del raggiungimento delle necessarie caratteristiche tecniche (granulometria, resistenza, portanza) è consentita l'integrazione con aggregati

frantumati di cava (frantumazione 100%) nella percentuale massima del 30%.”

La UNI EN 13108-8 specifica i requisiti per la classificazione e la descrizione del conglomerato bituminoso di recupero, con leganti bituminosi, come materiale costituente di miscele bituminose:

“Il crescente utilizzo del riciclaggio nella produzione di conglomerati bituminosi rende necessario specificare il conglomerato bituminoso di recupero commercializzato come materiale costituente in modo simile a quello di aggregati e leganti. Nelle norme di prodotto relative a conglomerati bituminosi, dal prEN 13108-1 al prEN 13108-7 incluso, l'utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero è consentito con requisiti correlati all'aggiunta in percentuale.

Il conglomerato bituminoso di recupero comprende conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati di rivestimento stradale, frantumazione delle lastre provenienti da squarci di pavimentazioni asfaltiche, blocchi provenienti da lastre e conglomerato bituminoso proveniente da scarti di produzione e sovrapproduzione. Il conglomerato bituminoso di recupero (RA) può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in un impianto di miscelazione a caldo, in conformità alle specifiche di dette miscele.

La presente norma europea contiene i requisiti del conglomerato bituminoso di recupero relativi alle proprietà del legante e dell'aggregato e alle materie estranee, applicabili a tutti i casi di utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero. Inoltre, la presente norma europea indica quali proprietà del conglomerato bituminoso di recupero e dei suoi materiali costituenti devono essere dichiarate e documentate in caso di richiesta di descrizione del cumulo.

La granulometria dell'aggregato, le proprietà del legante e le materie estranee presenti nel conglomerato bituminoso di recupero sono importanti per la qualità del prodotto, ovvero del conglomerato bituminoso fresco col quale esso si mescola. La dimensione delle particelle di conglomerato bituminoso contenute nel conglomerato bituminoso di recupero, che può variare da grossi blocchi a materiale finemente macinato, è importante solo ai fini del procedimento da utilizzare per la miscelazione con il conglomerato bituminoso fresco.

Siccome i requisiti per le miscele di conglomerato bituminoso sono gli stessi, sia che le

miscele contengano o meno il conglomerato bituminoso di recupero, è il livello di omogeneità del materiale che determina, in pratica, la quantità massima di conglomerato bituminoso di recupero che può essere utilizzato. ...”

La normativa AASHTO M 323 dà indicazioni sulla procedura da seguire per il mix design di conglomerati contenenti percentuali variabili di RAP da 0% a 100%.

Il problema viene affrontato andando a selezionare opportunamente il PG del bitume vergine in funzione della percentuale di RAP contenuta nella miscela, come di seguito riportato:

%B < 15: si sceglie un bitume vergine avente lo stesso PG che si sceglierebbe nel caso di miscela contenente solo materiale vergine. Ovvero si assume che per percentuali basse di RAP non si abbia alcun effetto sulla miscela;

15 < % B < 25: si sceglie un legante vergine che abbia un PG di una classe più morbido rispetto a quello che si userebbe se non ci fosse la presenza di RAP in miscela;

%B > 25: si raccomanda di utilizzare i *blending charts* o le *blending equations* per valutare il PG del bitume vergine da impiegare nella miscela. Tali equazioni richiedono di conoscere la temperatura critica massima e minima del bitume contenuto nel RAP.

2.1.3 GESTIONE DEL RAP

La maggior parte del RAP prodotto annualmente viene riciclato e utilizzato, sebbene non sempre nello stesso anno in cui viene prodotto. È stato stimato che negli Stati Uniti circa 33 milioni di tonnellate di RAP vengono usate ogni anno per produrre del conglomerato bituminoso vergine o come aggregato negli strati di base. Parte del RAP che non viene utilizzato in tempi brevi, viene stoccato in attesa di essere impiegato in futuro o conferito in discarica per essere smaltito (meno del 20% del RAP prodotto annualmente) (FHWA-<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>).

La maggior parte delle strutture per la lavorazione del RAP si trova negli impianti di produzione del conglomerato bituminoso così da eliminare il costo del trasporto del fresato allo stabilimento di produzione. Rispetto alla tecnica di produzione tradizionale, l'uso del fresato non comporta sostanziali cambiamenti ma è necessario che l'impianto di produzione sia dotato di sistemi meccanici per l'integrazione del fresato, e si richiede di caratterizzare il RAP secondo la normativa vigente.

Infine, durante il ciclo produttivo, è fondamentale tenere in considerazione le incertezze legate alla natura del RAP:

- Presenza di clusters (agglomerati di aggregati e bitume invecchiato che non vengono disgregati né durante la fresatura della pavimentazione, né durante la frantumazione effettuata durante la fase di processamento del RAP);
- Distribuzione non uniforme di bitume sugli aggregati, dovuta alla presenza di aggregati degli strati non legati all'interno del RAP, oppure alla presenza di grani di RAP frantumati (la superficie di rottura degli aggregati risulterà essere spoglia di bitume);
- Contenuto di bitume inertizzato (bitume troppo invecchiato per poter essere riattivato mediante l'aggiunta di ACF o col semplice calore, durante la miscelazione per la produzione di nuovo conglomerato bituminoso).

L'utilizzo del RAP può presentare però alcune problematiche da affrontare per la corretta gestione della produzione quali la variabilità del bitume (risolvibile con l'omogeneizzazione del cumulo) e il contenuto di bitume inertizzato (ovvero che ha perso la funzione di legante e difficilmente sarà riattivato). Quest'ultimo punto verrà affrontato nel seguente paragrafo.

2.1.4 EFFETTI DEL FRESATO BITUMINOSO NELLA MISCELA

Uno dei motivi di incertezza nell'uso del RAP è legato al fatto che la percentuale inertizzata di bitume non è facilmente identificabile.

A tal proposito vi sono diverse teorie che spiegano il reale comportamento del bitume contenuto nel RAP e di conseguenza del RAP stesso:

- Black Rock: il bitume che ricopre gli aggregati del RAP, fortemente invecchiato, risulta essere totalmente inertizzato, portando il materiale a comportarsi come un aggregato;
- Total Blending: il bitume del RAP si miscela completamente con il legante vergine: il legante risultante dalla completa miscelazione possiederà delle caratteristiche meccaniche uniformi in ogni suo punto;
- Partial Blending: una parte del bitume che ricopre gli aggregati del RAP si lega col legante vergine. Vi sarà dunque una pellicola di bitume (ottenuta dalla miscelazione del legante invecchiato e del legante vergine) che possiede caratteristiche meccaniche che variano con continuità da quelle del bitume

vergine a quelle del bitume invecchiato, muovendosi dalla parte più esterna verso l'interno. La parte di legante invecchiato che non si lega avrà dunque un comportamento da black rock.

La figura seguente mostra il concetto di partial blending (Development of Laboratory Mix Design for RAP MIXES-Burns Cooley Dennis, INC.).

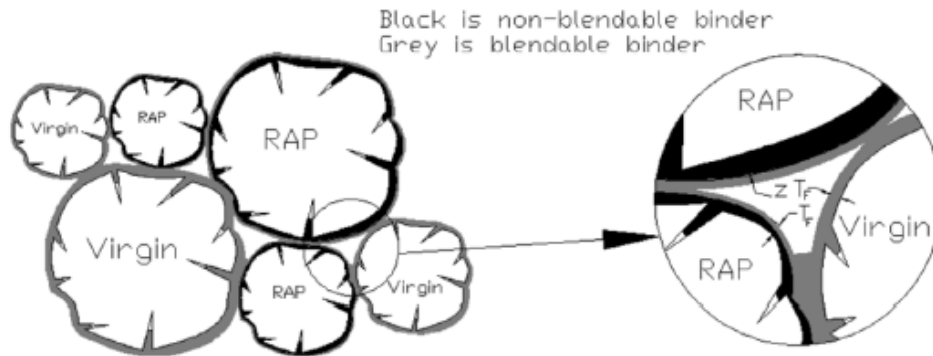


Figura 2.5: Schema rappresentante il concetto di partial blending

Numerosi studi mostrano che la teoria del “Partial blending” risulti essere quella più idonea per descrivere il reale comportamento del RAP incluso all’interno di conglomerati bituminosi di nuova produzione.

In particolare, la ricerca condotta da Huang et al (2005) sfrutta il tricloroetilene per rimuovere in fasi consecutive i layers di bitume che rivestono gli aggregati di RAP. I leganti, successivamente depurati dal solvente, vengono testati al Dynamic Shear Rheometer (DSR) per valutare le proprietà meccaniche. Si è osservato che gli strati di legante rimossi dal RAP presentano viscosità crescente man mano che ci si muove verso i layers più interni, confermando così la teoria del Partial Blending. Di conseguenza la quantità di legante ossidato che si lega al bitume vergine (dunque l’entità della diffusione) risulta essere funzione del tipo di leganti, della temperatura, del tempo di miscelazione e dell’invecchiamento del bitume del RAP.

Un altro aspetto che merita notevole considerazione riguarda il grado di invecchiamento del bitume. Di fatti, se non opportunamente trattato, il legante ossidato inficia le prestazioni finali della tecnologia contenente RAP, portando la pavimentazione a prematuri fenomeni di dissesto, come descritto nel paragrafo successivo.

Premesso che gli oli, le resine e gli asfalteni sono gli elementi che conferiscono lavorabilità, viscosità, duttilità ed elasticità al bitume, l’invecchiamento è dovuto

principalmente a mutamenti fisico-chimici dovuti a:

- l'evaporazione per volatilità in aria degli oli aromatici;
- l'assorbimento selettivo di oli, resine e asfalteni da parte degli aggregati;
- l'essudazione superficiale degli oli con relativa asportazione;
- i cambiamenti della composizione per reazioni di ossidazione dovuto all'ambiente atmosferico;
- la polimerizzazione e ristrutturazione molecolare con effetti anche tixotropici.

Tale deterioramento scaturisce nelle fasi di:

- produzione e posa in opera, che necessitano tradizionalmente del riscaldamento per consentire la lavorabilità dei prodotti (Short Term Aging – invecchiamento a breve termine, simulato in laboratorio con il Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT);
- esercizio, dove gli agenti atmosferici producono l'ossidazione.

(Il fresato: materiale ecosostenibile per la produzione di miscele bituminose – Strade & Autostrade)

2.1.5 PROBLEMATICHE LEGATE ALL'USO DEL RAP

A fine vita utile, i bitumi risultano altamente viscosi, duri e fragili. Se non controllata e controbilanciata, tale condizione comporta nei nuovi conglomerati bituminosi con fresato problemi di posa in opera e la riduzione della vita utile della nuova pavimentazione. In particolare i fenomeni di degrado delle pavimentazioni correlati all'utilizzo di elevate percentuali di RAP sono:

- **Cracking:** dovuto essenzialmente all'irrigidimento del conglomerato ad opera del bitume invecchiato il quale, perdendo elasticità, va incontro a rottura per effetto della fatica o per effetti termici. Il National Cooperative Highway Research Program (NCHRP- <http://www.trb.org/NCHRP/NCHRP.aspx>) ha dimostrato che la rigidità di conglomerati contenenti il 55% di RAP subisce un incremento percentuale del 25-60% rispetto a miscele di solo materiale vergine.



Figura 2.6: Alligator cracking e thermal cracking

D'altro canto, gli studi condotti da Zaumanis (2004) hanno mostrato un incremento della resistenza a fatica delle miscele contenenti almeno il 40% di RAP rispetto alle miscele tradizionali.

- **Rutting:** molteplici studi hanno mostrato un'elevata resistenza all'ormaiamento di miscele contenenti alte percentuali di RAP per effetto del più rigido bitume (McDaniel et al, Silva et al, Karlsson e Isacson). D'altro canto se gli additivi rigeneranti sono utilizzati impropriamente, si riscontra un aumento della vulnerabilità nei confronti delle deformazioni permanenti. Per questo motivo il dosaggio di rejuvenator deve essere scelto con cura per evitare un eccessivo rammollimento del bitume. Inoltre, la diffusione dell'additivo nel bitume invecchiato deve avvenire coerentemente con i tempi di apertura al traffico dell'infrastruttura.



Figura 2.7: Rutting

- **Bleeding e Flushing:** l'uso di una dose eccessiva di rejuvenator può portare ad una migrazione di oli verso la superficie della pavimentazione rendendola così viscida e compromettendo la sicurezza della stessa.



Figura 2.8: Bleeding di una pavimentazione

In realtà, è stato dimostrato che l'utilizzo di bitumi invecchiati non è un problema se il fresato è pari solo al 10% rispetto la massa del HMA finale (perché non inficia in modo sostanziale le prestazioni finali) o se adeguatamente rigenerato con prodotti che consentono di ripristinare le prestazioni del bitume invecchiato, per percentuali superiori al 10%.

La suscettibilità all'acqua risulta essere invece migliorata. Infatti, dal momento che gli aggregati del RAP sono già coperti da una pellicola di bitume, ci sono meno possibilità che l'acqua penetri all'interno degli aggregati stessi. Questo fatto rende i conglomerati contenenti alte percentuali di RAP meno suscettibili all'acqua rispetto ai conglomerati tradizionali.

2.1.6 PRODUZIONE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO CONTENENTE RAP

Per la maggior parte degli impianti di produzione del conglomerato bituminoso, se la percentuale di RAP rispetto al peso totale del conglomerato si mantiene sotto il 50%, non è necessario apportare grosse modifiche all'impianto. Per percentuali superiori però è necessario prendere degli accorgimenti in modo tale da fronteggiare le seguenti sfide:

- Riscaldare il RAP fino alla temperatura desiderata senza incorrere nella combustione indesiderata del tamburo;
- Minimizzare il sovrainvecchiamento del RAP;
- Controllare le emissioni in atmosfera.

Tali accorgimenti possono essere sintetizzati essenzialmente nella modalità di

riscaldamento degli aggregati: negli impianti tradizionali, gli aggregati vergine vengono riscaldati con fiamma diretta e successivamente mixati al RAP, il quale viene in tal modo riscaldato indirettamente. Incrementando la percentuale di RAP, si richiederebbe un sovrariscaldamento degli aggregati vergine con conseguente produzione di “blue smoke”. Ciò impone quindi delle limitazioni alla percentuale di RAP utilizzabile dagli impianti tradizionali. Per ovviare a questo problema, gli impianti in grado di trattare fino al 100% di RAP, riscaldano il RAP indirettamente per portarlo alla temperatura desiderata in modo più graduale, scongiurando il sovrainvecchiamento del legante e la produzione di “blue smoke”. Al mondo esistono almeno dieci diverse tipologie di impianto in grado di trattare fino al 100% di RAP e di seguito ne vengono descritte due:

- ALL RAP PROCESS: tale impianto si trova a New York e la principale caratteristica è quella di avere un tamburo tradizionale equipaggiato con un sistema di filtrazione in grado di catturare i gas di combustione e tenere le emissioni al di sotto del limite di legge. Il rejuvenator viene spruzzato sul RAP caldo all'interno dell'essiccatore e miscelato meccanicamente al legante contenuto nel fresato.
- ALEX SIN MANUFACTURING PLANT: questo impianto si trova in California e ha la peculiarità di utilizzare un sistema a doppia camera per riscaldare il tamburo contenente il RAP dall'esterno. A tal scopo vengono usati sette bruciatori perpendicolari al tamburo perciò il RAP viene di conseguenza riscaldato per conduzione attraverso il guscio metallico.



Figura 2.9: Impianto di produzione HMA

2.2 ATTIVANTI CHIMICI FUNZIONALI (ACF)

L'aggiunta del bitume vergine (ad elevata penetrazione) è stata una delle prime tecniche utilizzate per compensare l'invecchiamento del bitume contenuto nel RAP. Questa tecnica aveva lo scopo di conferire la viscosità finale corretta per la lavorazione e la posa in opera della miscela bituminosa: è evidente che il bitume risultante ha prestazioni differenti rispetto entrambi i componenti. Tuttavia, l'andamento degli ultimi anni è stato quello di utilizzare oli da recupero come per esempio olio lubrificante esausto, olio vegetale e tallolo (sottoprodotto della filiera produttiva della carta). Questi ultimi consentono di abbassare la viscosità del bitume invecchiato e garantire la facilità di posa in opera dei conglomerati contenenti fresato. È evidente che anch'essi presentano però il medesimo problema: non rigenerano i gruppi funzionali mancanti nel legante invecchiato, non garantendo prestazioni maggiori e sufficiente vita utile alla nuova pavimentazione.

Per rigenerare il bitume invecchiato contenuto nel RAP, sono stati sviluppati dei prodotti (ACF) da miscelare al fresato.

I rejuvenators sono costituiti da oli di origine organica e/o idrocarburica. Diverse ricerche (Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators – Soohyok; 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis - Martins Zaumanis) dimostrano che i prodotti che garantiscono una rigenerazione più efficace del

bitume invecchiato sono quelli ad alto contenuto di frazione maltenica e basso contenuto di oli saturi.

L'obiettivo principale è quello di rigenerare il bitume ossidato, attraverso l'integrazione di gruppi funzionali dispersi a causa dei processi di invecchiamento: durante il processo di invecchiamento il rapporto malteni/asfalteni si riduce. Il cambiamento tra le proporzioni dei gruppi funzionali contenuti nel legante si traduce in un irrigidimento ed infragilimento del bitume (The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review - Taher Baghaee Moghaddam).

Al tempo stesso, gli ACF svolgono la funzione di attivanti di adesione e riduzione di viscosità.

La figura seguente mostra la composizione percentuale del bitume durante i diversi stadi di invecchiamento (100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis - Martins Zaumanis). È interessante notare come l'uso dei rigeneranti tenda a ripristinare la composizione originaria.

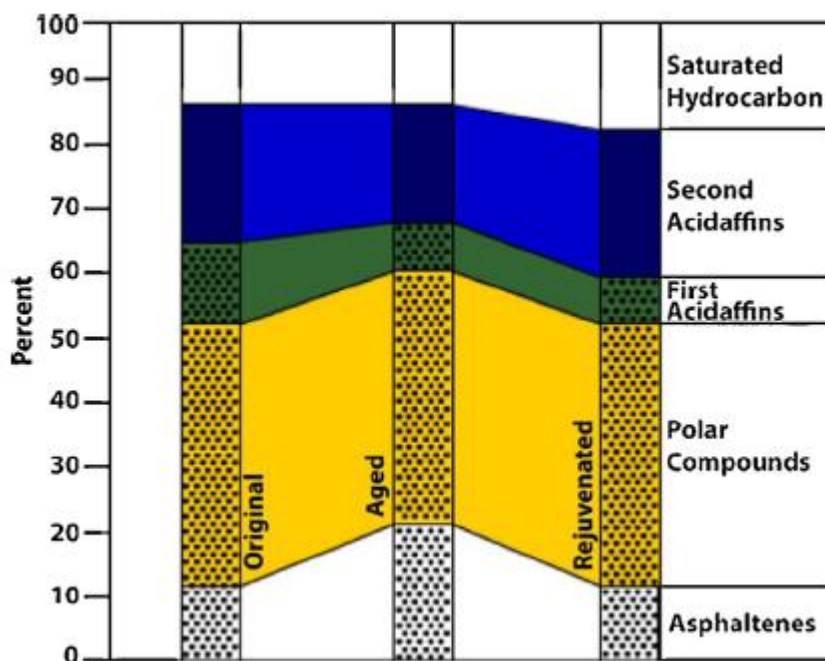


Figura 2.10: Composizione del bitume in funzione del grado di invecchiamento (Zaumanis, 2014)

La corretta azione rigenerante passa attraverso lo sviluppo nel tempo di alcuni fenomeni:

- diffusione nella pellicola di bitume invecchiato
- dispersione omogenea in ogni punto della pellicola

Tutto prescinde dalla idoneità del prodotto scelto e dal dosaggio introdotto. Come

anticipato, il lavoro svolto dai rejuvenators porta in conto fenomeni tempo-dipendenti:

- breve termine: i rejuvenators consentono la produzione di conglomerati bituminosi ad alta percentuale di RAP andando a ridurre la consistenza del bitume invecchiato al fine di migliorare la lavorabilità della miscela sia durante il processo di produzione che durante la stesa. È opportuno che il processo di diffusione giunga a compimento prima che l'infrastruttura venga aperta al traffico così da evitare un deterioramento prematuro della pavimentazione. In generale tale fenomeno può progredire nel tempo fino al raggiungimento dell'equilibrio. La velocità di diffusione degli additivi rigeneranti all'interno del bitume del RAP dipende infatti dalle proprietà del bitume e dell'additivo stesso ed è favorita dalle alte temperature. In particolare la velocità del processo è governata dalla viscosità della fase frazione maltenica. La figura di seguito riportata mostra schematicamente come avviene il processo di diffusione del rejuvenator all'interno del bitume del RAP: si può notare come a partire dal momento dell'applicazione del rejuvenator, si abbia la diffusione dello stesso all'interno del bitume invecchiato, fino al raggiungimento dell'equilibrio.

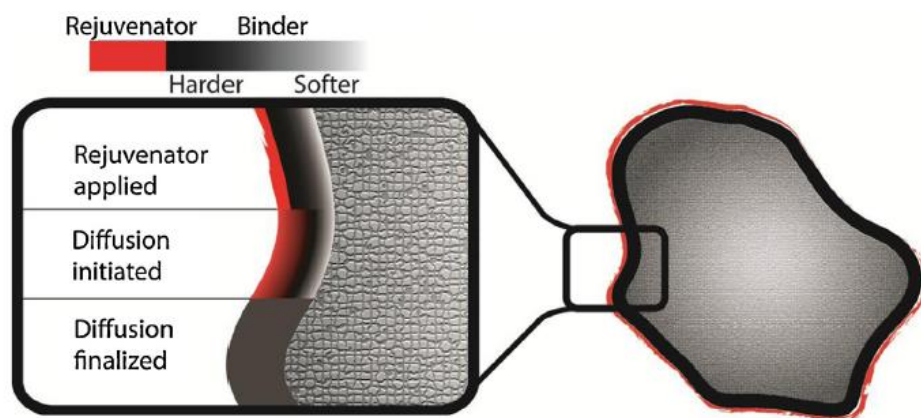


Figura 2.11: Schema della diffusione del rejuvenator (Zaumanis, 2014)

- Effetti a lungo termine: i rejuvenators ricostituiscono i gruppi funzionali fondamentali e le proprietà meccaniche del bitume invecchiato garantendogli un ulteriore ciclo vitale. La reologia del bitume viene dunque modificata per ridurre la possibilità che si verifichino fessurazioni della pavimentazione a causa del fenomeno della fatica e del crack termico. È però necessario che il bitume non venga eccessivamente rammollito per contrastare il fenomeno del rutting. Inoltre il mix deve possedere sufficiente coesione da evitare lo spogliamento degli

aggregati e lo sgranamento della pavimentazione (Zaumanis-2004).

2.2.1 SCELTA DEL DOSAGGIO DI ACF

La scelta del dosaggio da impiegare è funzione del tipo di prodotto e dalla quantità di RAP da rigenerare. L'obiettivo è quello di ottimizzare le caratteristiche meccaniche finali del conglomerato, così da prevenire i fenomeni di degrado già descritti, legati all'insufficiente rigenerazione del bitume o all'eccessivo rammollimento dello stesso.

Generalmente, il dosaggio è studiato attraverso prove prestazionali o empiriche sulla miscela di legante estratta dal RAP e agenti rigeneranti. In questo modo si sceglie la percentuale di rejuvenator da aggiungere per raggiungere il target stabilito in fase di mix design. Zaumanis et al. (2014) hanno dimostrato che il cambiamento nel Performance Grade (sia ad alte che a basse temperature) è quasi lineare al variare del contenuto del medesimo rejuvenator. Dalla prova di penetrazione emerge invece che i valori di penetrazione aumentano esponenzialmente con l'aumentare del contenuto di additivo rigenerante. In generale, si è osservato che hanno maggiore efficienza nel rammollimento del bitume invecchiato i prodotti contenenti oli organici rispetto a quelli di origine petrolchimica. Una ricerca condotta da Zaumanis (2014) ha dimostrato su 6 diversi rejuvenators che il dosaggio di additivo calcolata per raggiungere lo stesso valore di penetrazione del bitume vergine garantisce il raggiungimento, da parte del bitume rigenerato, dello stesso performance grade del bitume vergine. In questo studio, è stato elaborato un processo di ottimizzazione della dose di rejuvenator, tenendo in considerazione anche la variabilità del bitume contenuto nel RAP legata a differenti provenienze e gradi di invecchiamento.

Ci sono però degli inconvenienti nella scelta del dosaggio di rejuvenator sulla base delle sole proprietà del legante:

- Lo studio è effettuato sul legante estratto dal RAP, presupponendo che questo entri interamente in miscela col rejuvenator e quindi si attivi interamente;
- Il raggiungimento della viscosità desiderata al valore di penetrazione target non necessariamente comporta l'effettiva rigenerazione del legante per mezzo degli additivi;
- Il raggiungimento del PG desiderato non ci mette al sicuro dal prematuro crack termico;
- Additivi rigeneranti non compatibili con i componenti del conglomerato o il

sovradosaggio dello stesso, possono causare perdita di coesione della miscela e quindi deterioramento della pavimentazione, soprattutto per opera dell'acqua Zaumanis (2014).

2.2.2 NORMATIVA IN MERITO ALL'USO DI ADDITIVI RIGENERANTI DEL FRESATO

Il Capitolato ANAS fornisce inoltre delle linee guida da seguire per l'impiego degli additivi rigeneranti:

“Gli ACF sono composti chimici da utilizzare sempre nelle lavorazioni (a caldo e a freddo) in cui si reimpiegano materiali fresati. Essi devono avere caratteristiche tali da modificare e migliorare le proprietà di adesione, suscettibilità termica, coesione, viscosità e resistenza all'invecchiamento del legante totale (vecchio + nuovo). Il dosaggio sarà indicativamente dello 0,2%-0,8% in peso rispetto al legante totale, secondo indicazioni della DL ed in accordo con i Laboratori accreditati o con il CSS; a seconda dell'impiego l'additivo può essere disperso nell'acqua o nel legante di aggiunta (bitume od emulsione). Può anche essere aggiunto nel fresato, durante la fresatura, nel caso di impiego diretto. I prodotti devono essere approvati dalla DL sulla base di specifiche prove eseguite dai Laboratori accreditati valutandone il dosaggio e l'efficacia, eventualmente con metodologie concordate e/o definite da CSS per la relativa accettazione. Inoltre i prodotti devono essere accompagnati dalle schede tecniche che ne indicano caratteristiche, sicurezza e modalità di impiego, che potranno essere verificati anche con appositi test di cantiere. Per la verifica delle effettive quantità impiegate, vanno fornite in copia alla DL le bolle di consegna.”

2.3 TIPOLOGIE DI INDAGINE SULL'EFFICACIA DEGLI ACF

La letteratura tecnica fornisce diversi approcci per valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti. Tra questi viene citato lo studio condotto da Zaumanis nel 2014: si è occupato di valutare l'effetto di cinque diversi rejuvenator (Olio vegetale di scarto, grasso vegetale residuo, olio organico, tallolo e olio esausto) sulle proprietà del RAP.

Gli esperimenti sono stati condotti facendo riferimento a quattro diversi campioni di materiale:

- Il primo campione è costituito dal 100% di RAP con una percentuale del 12% di rejuvenator (sei tipi diversi) rispetto alla massa totale del binder.
- Un campione di materiale con inerti aventi pezzatura pari a 9.5 mm ottenuto rimuovendo dal RAP il binder per mezzo di un forno ad ignizione; gli inerti sono

stati poi miscelati con il 5.94% di bitume vergine PG 64-22, ossia con la stessa percentuale di bitume presentata dai campioni ringiovaniti;

- Il terzo campione in cui è stata testata la qualità del bitume estratto dal RAP e miscelato con il 12% di rejuvenators.
- L'ultimo campione, utilizzato per il confronto, è rappresentato da un bitume con PG 64-22.

Come mostrato dallo schema seguente i campioni rigenerati sono dunque stati sottoposti a diverse prove. Tali prove includono test di tipo reologico sul bitume invecchiato e rigenerato estratto dal RAP. Altri includono test su campioni contenenti 100% RAP additivato con i rejuvenators come mostrato nella figura seguente:

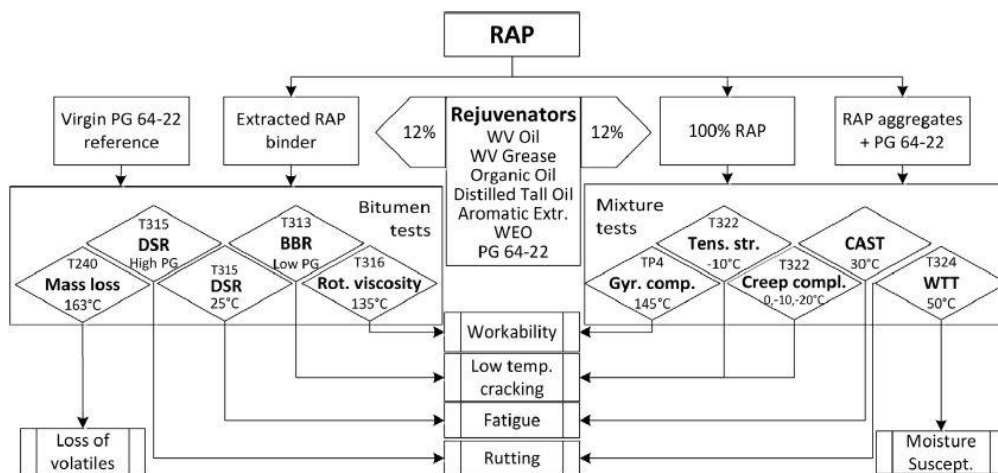


Figura 2.12: Schema della sperimentazione di Zaumanis, 2014

I campioni di bitume estratti dal RAP sono stati sottoposti a test reologici con il Dynamic Shear Rheometer (DSR) per determinare la risposta del materiale alle alte temperature (Ormaiamento). La resistenza alle basse temperature è stata invece valutata attraverso il Bending Beam Rheometer (BBR) in accordo con la AASHTO T 313. La risposta alla fatica a temperature intermedie (25 gradi) è stata invece determinata sempre attraverso il DSR con la valutazione del modulo complesso G^* ed angolo di fase δ .

I test eseguiti sui conglomerati bituminosi sono invece quello sulla rottura per effetti termici (thermal stress restrained specimen test TSRST), test di resistenza all'ormaiamento (Hamburg wheel tracking test), prova di creep, test di resistenza a trazione indiretta, test di taglio in configurazione coassiale (CAST).

I test hanno portato alla conclusione che 5 su 6 rejuvenators dosati al 12% hanno soddisfatto i requisiti PG 64-22 così come la resistenza a fatica e la lavorabilità richiesta dal SUPERPAVE.

L'elevato PG dei campioni rigenerati ha inoltre mostrato come la resistenza all'ormaiamento sia migliorata rispetto al campione di bitume di riferimento.

Un altro studio sull'effetto dei rejuvenators sul RAP è stato condotto da Aybike Ongel e Martin Hugener nel 2015. In particolare, è stato confrontato il comportamento di un bitume PG 40-50 miscelato con tre diversi rejuvenators rispetto a un bitume target PG 70-100.

I test reologici condotti includono il punto di rammollimento, penetrazione e il modulo complesso G^* . I test sono stati condotti a tre gradi di invecchiamento: bitume vergine, bitume invecchiato tramite RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) e RTFOT combinato con il PAV (Pressure Aging Vessel).

Il risultato chiave mostrato in questo studio è l'effettiva riuscita nell'ottenimento delle caratteristiche reologiche del bitume vergine target rendendo così possibile l'utilizzo di RAP nel conglomerato bituminoso.

3 SPERIMENTAZIONE

Come ampiamente discusso nel precedente capitolo, uno dei principali problemi connessi al riutilizzo del fresato bituminoso all'interno di nuove miscele è legato alla presenza del bitume ossidato. Se non opportunamente considerato, il legante invecchiato inficia le performance finali della miscela bituminosa, con conseguenti ricadute sulla durabilità della pavimentazione stradale.

Di conseguenza, è fondamentale rigenerare il legante contenuto nel RAP attraverso particolari prodotti, i "rejuvenators", con l'obiettivo di garantire adeguate prestazioni alla tecnologia innovativa e, ovviamente, ridurre il consumo di legante vergine.

In generale, gli attivanti chimici funzionali tendono a ripristinare le proprietà del legante invecchiato attraverso la ricostituzione dei componenti chimici originari (Shen et al. 2007).

È di primaria importanza lo studio dell'interazione bitume invecchiato-rejuvenator: l'efficacia della rigenerazione passa anche attraverso il miglioramento della risposta meccanica del conglomerato bituminoso contenente RAP.

Come precedentemente esposto, la letteratura tecnica fornisce diversi approcci per valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti: alcuni degli studi che sono stati effettuati in precedenza includono test di tipo reologico sul bitume invecchiato e rigenerato estratto dal RAP, altri includono test sul conglomerato contenente RAP additivato con i rejuvenators.

In particolare, test reologici di rilievo sono quello sul punto di rammollimento (test palla-anello), determinazione del modulo complesso G^* ed angolo di fase δ (Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen, Aybike Ongel & Martin Hugener - 2015), test di penetrazione, test di viscosità (The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation, Jim Brownridge), test di caratterizzazione del bitume (PG) seguendo le linee guida Superpave definite dalla AASHTO M320.

I test maggiormente eseguiti sui conglomerati bituminosi sono invece quello sulla rottura per effetti termici (thermal stress restrained specimen test TSRST), test di resistenza all'ormaiamento (Hamburg wheel tracking test), prova di creep, test di resistenza a trazione indiretta, test di taglio in configurazione coassiale (Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100%

recycled asphalt mixtures, Martins Zaumanis).

In questa sede, l'efficacia dei rejuvenators sul legante contenuto nel fresato bituminoso è valutata attraverso la costruzione di un sistema modello composto da RAP, additivi rigeneranti e/o bitume vergine.

Sperimentalmente, si può definire il SISTEMA MODELLO come un sistema accuratamente progettato con il quale indagare particolari fenomeni fisico-meccanici, presupponendo che le acquisizioni sperimentali ottenute possano fornire indicazioni sul comportamento reale del film di bitume ossidato quando interagisce con gli additivi rigeneranti.

Il sistema modello ha lo scopo di rendere minima la variabilità dei risultati legata alla composizione granulometrica del materiale, forma e dimensioni degli aggregati, tipo e quantità di bitume invecchiato del fresato bituminoso.

3.1 SCELTA DELLA CLASSE GRANULOMETRICA

La composizione del sistema modello è stata ottimizzata per avere una percentuale di vuoti molto alta e quindi minimizzare l'ingranamento degli inerti. Il concetto è quello di poter fissare il numero di punti di contatto, per unità di volume, tra i grani del RAP. Per perseguire l'obiettivo di evidenziare le proprietà del legante rigenerato, si vuole che la densità dei punti di contatto sia molto bassa e costante per tutti i campioni che sono stati confezionati.

Ciò permette di porre in rilievo il comportamento del bitume rispetto a quello dello scheletro litico, così da poter valutare l'effetto degli additivi rigeneranti e del bitume vergine di aggiunta al RAP.

In questo modo si è cercato di ridurre la dipendenza dallo scheletro litico rendendolo una costante per tutti i campioni e si è fatta variare solo la composizione del legante in essi contenuto.

Per poter trovare la composizione granulometrica che sfrutti al meglio il concetto di sistema modello sono state estratte dal cumulo di RAP ed indagate quattro classi granulometriche: $D < 0.5$ mm, 0.5/2 mm, 2/5 mm, 5/8 mm.

L'ampiezza delle classi granulometriche è stata scelta per ottenere un sistema quasi monogranulare che, essendo composto da aggregati con una forma regolare, può essere schematizzato con delle sferette di diametro compreso all'interno del range considerato.

N.B. Successivamente, verrà mostrata la schematizzazione del sistema modello per

ognuna delle combinazioni di materiali oggetto di studio, seguendo quanto appena detto. Di ogni classe è stata studiata la composizione granulometrica all'interno dei limiti dimensionali della stessa, è stato determinato il contenuto di legante ed infine è stata eseguita una compattazione a 150°C con la pressa giratoria al fine di studiarne le caratteristiche di addensamento.

Visivamente, i campioni delle diverse classi granulometriche compattati a 180 rotazioni della pressa giratoria si presentano in questo modo:



Figura 3.1: Campioni di solo RAP di differenti classi granulometriche

Passando da sinistra verso destra si ha diametro crescente del RAP.

Coerentemente con quanto atteso, al ridursi del diametro del RAP, si ha un incremento del contenuto di legante per effetto della maggior superficie specifica degli aggregati.

Dopo un'attenta valutazione delle differenti classi si è scelto di procedere nel corso della sperimentazione con la classe 5/8 mm per avere un minor numero di punti di contatto tra i grani del RAP ed allo stesso tempo una percentuale di vuoti maggiore, che metta maggiormente in risalto il comportamento del legante.

3.2 SCELTA DEI MATERIALI

Una volta scelta la classe granulometrica di riferimento, è stato necessario definire le combinazioni di materiali da sottoporre ai test meccanici per valutare l'effetto degli additivi rigeneranti.

I materiali di partenza a disposizione erano:

- RAP (proveniente tutto dal medesimo impianto per limitarne la variabilità) da cui è stata estratta la frazione granulometrica 5/8 mm ed è stata utilizzata per confezionare dei campioni caratterizzati da una composizione quasi monogranulare nel rispetto del concetto di sistema modello;
- Due diversi tipi di Rejuvenator;
- Un tipo di bitume vergine di classe 50/70.

Combinando i materiali appena elencati, è stato possibile confezionare e testare dei campioni composti da:

- **RAP**: campioni di solo RAP, il cui contenuto di bitume invecchiato è pari al 4.4%;
- **RAP + ACF_1 (0.35%)**: campioni di RAP miscelato al rejuvenator n°1. La percentuale di Rejuvenator è stata scelta seguendo le indicazioni del produttore;
- **RAP + ACF_1 (0.35%) + bitume vergine (2.2%)**: campioni di RAP miscelato al rejuvenator n°1 e al bitume vergine;
- **RAP + ACF_2 (0.35%)**: campioni di RAP miscelato al rejuvenator n°2. La percentuale è stata scelta pari a quella del rejuvenator n°1 per uniformare la composizione dei campioni contenenti gli ACF, come fatto in precedenza da Zaumanis et al., 2014;
- **RAP + bitume vergine (2.2%)**: campioni di RAP miscelato al bitume vergine in percentuale tale da incrementare il contenuto di bitume del 50%. Maggiori quantità di bitume sono state impiegate per i primi tentativi di miscelazione, durante i quali si è manifestato un eccesso di bitume che colava dal conglomerato;
- **Bianco + bitume vergine (4.4%)**: si tratta di un materiale ricostituito ovvero composto da una matrice litica (quella del RAP, una volta eliminato il legante con il forno ad ignizione) a cui è stato aggiunto del bitume vergine in percentuale pari al 4.4, così da replicare la volumetria dei campioni di solo RAP;
- **Bianco + bitume vergine (6.6%)**: si tratta di un materiale ricostituito ovvero composto da una matrice litica (quella del RAP, una volta eliminato il legante con il forno ad ignizione) a cui è stato aggiunto del bitume vergine in percentuale pari al 6.6, così da replicare la volumetria dei campioni di RAP + bitume vergine (2.2%).

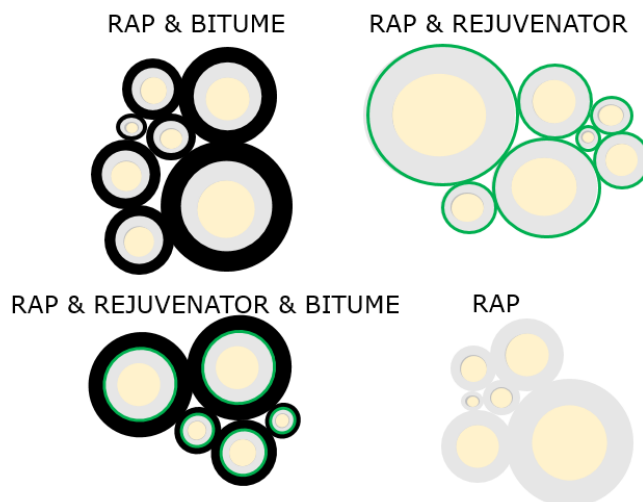


Figura 3.2: Schema dei campioni compattati seguendo il criterio del sistema modello

3.3 COSTRUZIONE DEL SISTEMA MODELLO

Una volta scelta la composizione dei campioni da testare, si è proceduto alla definizione dei parametri volumetrici del sistema modello: il parametro che si sfrutta a tal proposito è la VMA (Voids in Mineral Aggregate) definita come la percentuale intergranulare di spazio occupata da bitume ed aria all'interno di un campione di conglomerato bituminoso. La VMA target, si intende geometrica in quanto la massa volumica considerata per il calcolo è quella geometrica.

Per l'elaborazione del parametro VMA target, si è partiti dalla curva di compattazione del solo RAP fino a 180 rotazioni della pressa giratoria. Le 180 rotazioni sono state necessarie per studiare la lavorabilità del materiale e per valutare in termini pratici se il campione compattato avrebbe mantenuto la forma propria una volta estruso.

L'incertezza scaturisce dal fatto che, lavorando con del bitume invecchiato, non si ha la certezza dell'adesione mutua tra i grani di RAP, neanche combinando l'elevata temperatura ed energia di compattazione. Poiché il campione compattato a 180 giri della pressa giratoria ha manifestato una grande capacità coesiva, si è scelto di partire, per le successive compattazioni, da un numero di giri molto basso (30 rotazioni) e di incrementarlo con step di 10/20 rotazioni della pressa fino al raggiungimento di una condizione in cui il campione avrebbe avuto sufficiente coesione da essere testato.

Si è proceduto quindi alla compattazione di un campione di solo RAP a 30 rotazioni, che si sono rivelate sufficienti a garantire coesione al campione estruso.

La scelta del numero di giri di riferimento (30) è stata fatta al fine di poter ottimizzare la

volumetria del sistema modello per ottenere un basso livello di ingranamento degli inerti e quindi minimizzare i punti di contatto tra i grani.

Una volta note tutte le grandezze necessarie, si è proceduto al calcolo della VMA del campione di RAP in corrispondenza delle 30 rotazioni della pressa.

In questo modo è stato determinato il parametro target del sistema modello, al quale hanno fatto riferimento tutti i campioni compattati indipendentemente dalla presenza di rejuvenator o di bitume di aggiunta, imponendo una tolleranza di $\pm 1\%$ sulla VMA target.

Nota l'altezza raggiunta dal campione di prova di solo RAP a 30 rotazioni della pressa e la massa introdotta nella fustella è stato possibile ricavare, mediante proporzione lineare, la massa che è necessario impiegare per compattare con VMA target i campioni di altezza voluta.

Tali compattazioni sono state quindi eseguite settando sulla pressa giratoria la modalità di compattazione "ad altezza" per eliminare la variabilità legata alla diversa lavorabilità dei materiali studiati, ad opera dell'aggiunta di additivi e/o bitume, rispetto ai campioni di solo RAP.

L'altezza target per i campioni è stata definita in accordo con le normative sulle prove meccaniche eseguite. In particolare, sono stati compattati campioni cilindrici di altezza 65 mm e 200 mm, di 100 mm di diametro.

3.4 ANALISI DEI CAMPIONI CONFEZIONATI SEGUENDO IL CRITERIO DEL SISTEMA MODELLO

Per raggiungere l'obiettivo di sviluppare una procedura di prova sperimentale atta a valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato bituminoso, la campagna sperimentale si è focalizzata sulla realizzazione dei seguenti tipi di test:

- Modulo di Rigidezza (ITSM) su campioni cilindrici di altezza 65 mm e diametro 100 mm. Questo test, spesso eseguito anche in letteratura, è stato scelto perché non essendo distruttivo consente di monitorare i valori di modulo di rigidezza nel tempo;
- Resistenza a rottura per Trazione Indiretta (ITS) su campioni cilindrici di altezza 65 mm e diametro 100 mm. È un test ampiamente praticato sui conglomerati contenenti elevate percentuali di RAP;
- Modulo Resiliente e successivo Quick Shear Test su campioni cilindrici di altezza 200 mm e diametro 100 mm. Generalmente eseguito sui terreni o su materiali

granulari, il modulo resiliente è un test non distruttivo che è stato scelto per indagare il comportamento dei materiali oggetto di studio sotto condizioni di carico cicliche. Al termine del test di modulo resiliente, si esegue il Quick Shear Test su diversi campioni al variare della pressione di confinamento per ottenere gli involuppi di rottura dei materiali. Poiché tutti i campioni sono dotati di elevata coesione, il macchinario di prova non è in grado di portarli a rottura;

- Resistenza a rottura a Compressione Semplice (UCS) su campioni cilindrici di altezza 200 mm e diametro 100 mm. La prova UCS è assimilabile ad un Quick Shear Test con tensione di confinamento nulla. Poiché i campioni testati al Quick Shear Test hanno resistenza superiore al limite di sicurezza della macchina, si sceglie di portare a rottura per compressione semplice i campioni con una pressa statica in grado di sviluppare una maggiore forza;
- Resistenza a rottura a taglio (Leutner) (LPDS) su campioni cilindrici di altezza 200 mm e diametro 100 mm. Questo test è stato scelto per valutare la coesione e la resistenza a taglio dei campioni.

Tutti i test sono stati eseguiti, dopo il condizionamento dei campioni in cella climatica ad una temperatura di 20°C, ad intervalli di tempo differenti in funzione del parametro da indagare.

In particolare, per ricercare un'eventuale effetto tempo dipendente, i test non distruttivi sono stati eseguiti sui medesimi campioni al variare del tempo (3, 7, 10, 15, 28 giorni), mentre i test distruttivi sono stati eseguiti su differenti campioni a 3 ed a 28 giorni.

4 PROPRIETA' DEI MATERIALI E COMPOSIZIONE

il seguente capitolo descrive le proprietà dei materiali oggetto di studio:

- per quanto concerne il fresato stradale, si è a conoscenza di informazioni relative all'infrastruttura di provenienza, tipo di legante in esso contenuto e impianto di provenienza mentre per quanto riguarda la volumetria, composizione, massima massa volumica teorica, granulometria e curve di compattazione, si fa riferimento a dei test di laboratorio;
- per quanto riguarda gli additivi rigeneranti del fresato, si è a conoscenza delle informazioni fornite dal produttore quali la scheda di sicurezza e alcune informazioni generali relative agli effetti dei vari prodotti.
- Per quanto concerne il bitume vergine di aggiunta, sono noti l'impianto di produzione, classe di penetrazione.

4.1 RAP

Il fresato a disposizione è proveniente dall'impianto SITALFA di Salbertrand ed è un mix di strati di base, binder ed usura, derivanti dalla demolizione della pavimentazione dell'autostrada A32. Si tratta di un fresato la cui composizione originaria è la seguente:

- Base: contenuto di bitume 4%, percentuale di polimero 0.3%
- Binder: contenuto di bitume 5%, percentuale di polimero 0.3%
- Usura: contenuto di bitume 5.5%, percentuale di polimero 0.3%

Il mix tra gli strati appena citati presenterà una composizione intermedia tra i precedenti valori, perciò si procederà con un test di laboratorio alla determinazione del reale contenuto di bitume. È bene ricordare che lavorando con un sistema modello quasi mono granulare (5/8 mm), si è reso necessario separare le frazioni granulometriche di interesse dal cumulo di RAP (la cui pezzatura va dal filler, fino a clusters di diametro 20 cm), dunque tutti i test riportati sono stati eseguiti su questa classe granulometrica.



Figura 4.1: Alcune frazioni granulometriche costituenti il cumulo di RAP; RAP

Una volta estratta la classe 5/8 dal cumulo di RAP opportunamente essiccato, si procede con la determinazione della granulometria della frazione scelta, successivamente si determina il contenuto di bitume e una volta ottenuti gli aggregati spogli dopo l'ignizione del RAP, si determina anche la granulometria dei soli aggregati.



Figura 4.2: Cumulo di RAP steso per favorire l'essiccazione

4.1.1 GRANULOMETRIA DEL RAP CLASSE 5/8

In accordo con la normativa UNI EN 12697-2, 2003 viene determinata la curva granulometrica della classe 5/8 del RAP così da poter osservare come si distribuiscono le varie pezzature all'interno dei limiti dimensionali imposti.

Il seguente test consiste nella determinazione della curva granulometrica attraverso setacciatura automatica. Il macchinario impiegato a tal scopo è un setacciatore elettromagnetico in grado di imprimere un'azione di scuotimento tridimensionale alla pila di setacci (azione verticale, orizzontale lungo x e orizzontale lungo y) per un tempo fissato

a 15 minuti. Poiché la classe scelta presenta diametro variabile da 5 mm a 8 mm, l'apertura dei setacci scelti ricadrà all'interno di questi limiti, in particolare, sono stati scelti i diametri in mm: 8, 6.3, 6, 5 ed infine il fondello che raccoglie eventuali residui di dimensioni minori di 5 mm.



Figura 4.3: Setacciatore elettromagnetico

Una volta selezionato il peso del campione in funzione della granulometria, in accordo con la normativa sopra citata, si può procedere all'esecuzione del test. Il Rap viene così posizionato in cima alla pila di setacci, opportunamente ordinati con diametro decrescente dal basso verso l'alto, i quali sono fissati al setacciatore attraverso due vitoni in modo tale da rendere il moto dei setacci solidale a quello del macchinario. Al termine della prova, ogni setaccio viene pesato sia prima di essere vuotato dal materiale che dopo, in modo tale da permettere di conoscere il peso del trattenuto per differenza di pesate. Da questi valori è possibile determinare il passante progressivo ad ogni setaccio e costruire così la curva granulometrica. La curva granulometrica rappresenta la percentuale di materiale complessivamente passante al setaccio avente una certa apertura della maglia quadrata. Sull'asse delle ordinate si trova quindi la percentuale di passante e sull'asse delle ascisse si ha il logaritmo dell'apertura della maglia dei setacci.

Le equazioni impiegate sono:

- Trattenuto parziale [%]

$$r_i = 100 \cdot \frac{m_i}{m_{tot}}$$

- Trattenuto progressivo [%]

$$R_i = \sum_{j=0}^i r_j$$

- Passante progressivo [%]

$$P_i = 100 - R_i$$

La curva granulometrica di riferimento per il RAP classe 5/8 è stata determinata mediando i valori ottenuti da due differenti setacciature, le cui rispettive tabelle che riportano i passanti progressivi e le curve granulometriche sono presentate di seguito:

RAP	
apertura setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
8	100,0
6,3	57,2
6	28,3
5	2,2

tabella 4.1: Valori percentuali di passante progressivo RAP, test 1

RAP	
apertura setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
8	100,0
6,3	55,7
6	27,2
5	2,4

tabella 4.2: Valori percentuali di passante progressivo RAP, test 2

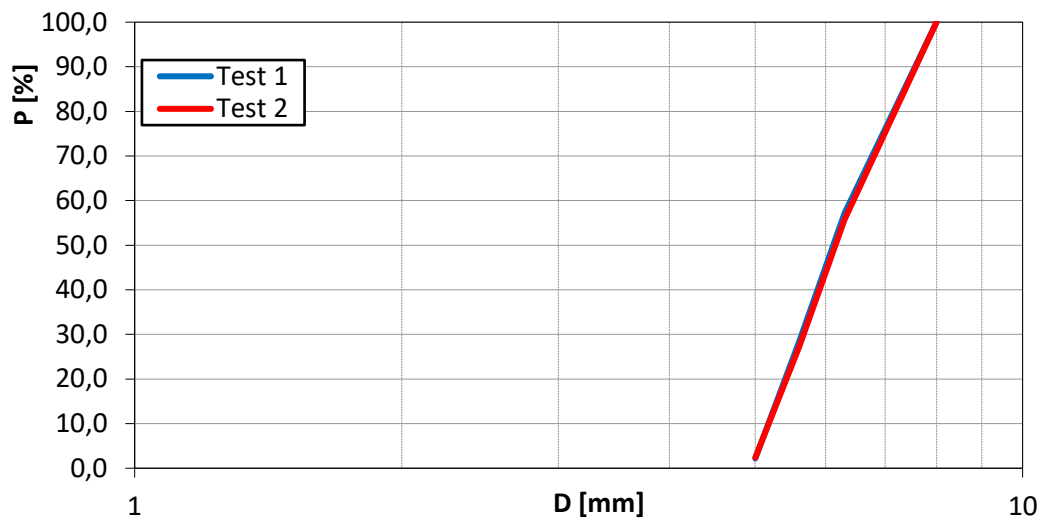


Grafico 4.1: Curve granulometriche RAP

Di seguito viene riportata la tabella contenente i valori medi, su due determinazioni, di passante progressivo e la corrispondente curva granulometrica:

RAP	
apertura setaccio [mm]	Passante progressivo [%]
8	100,0
6,3	56,4
6	27,7
5	2,3

tabella 4.3: Valori percentuali medi di passante progressivo RAP

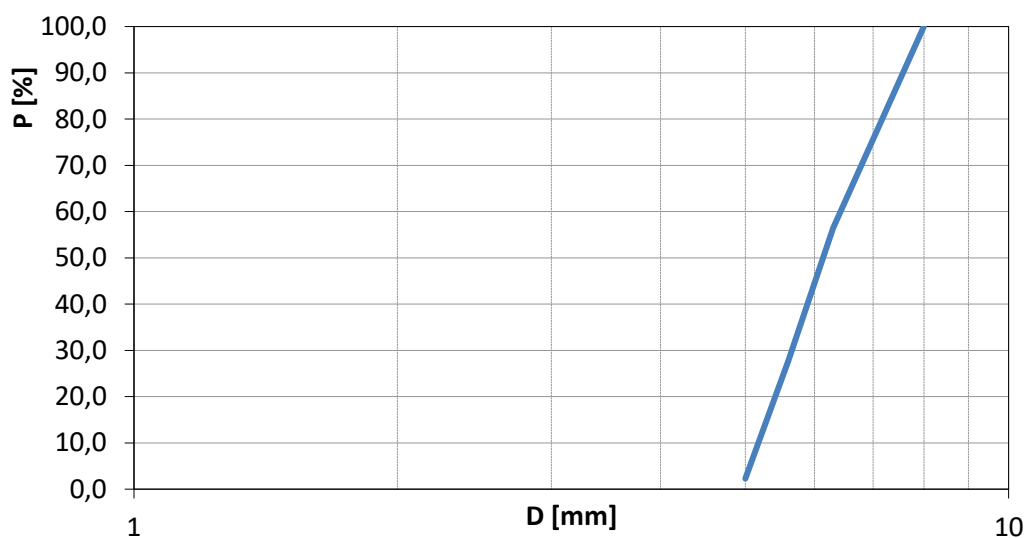


Grafico 4.2: Curva granulometrica media RAP

4.1.2 CONTENUTO DI LEGANTE

Il RAP appena utilizzato per determinare la curva granulometrica media, è stato successivamente impiegato per il test sul contenuto di bitume. La tipologia di test utilizzata per determinare il contenuto di legante è quella che prevede l'uso del forno ad ignizione, seguendo le direttive della normativa UNI EN 12697-39, 2004, annesso A e B). Tale metodo consiste nella separazione del bitume e tutte le sostanze volatili dagli aggregati mediante l'ignizione del conglomerato.

L'apparato di prova consiste in un forno ad ignizione, noto anche come Carbolite, dotato di un sistema continuo di monitoraggio del peso del campione, il quale monitora la perdita di peso dello stesso, dovuta all'ignizione delle componenti volatili. La prova cessa autonomamente quando in un intervallo di tempo di alcuni minuti non si registra più alcuna fluttuazione di peso. Il software del macchinario è quindi in grado di calcolare il contenuto di bitume del campione, sia rispetto alla miscela che rispetto agli aggregati, semplicemente inserendo attraverso l'interfaccia utente il peso del cestello contenente il RAP e quello combinato, dato dalla somma del peso del cestello e del RAP.



Figura 4.4: Carbolite

La procedura inizia con la suddivisione del campione di materiale sciolto, le cui dimensioni sono scelte in base alla granulometria in accordo con la normativa UNI EN 12697-39, in due cestelli in modo tale da garantire una maggiore superficie di ignizione ed assicurare la completa eliminazione delle componenti volatili dagli aggregati. Una volta che il cestello

è stato caricato col materiale, viene inserito all'interno della fornace la quale, raggiungendo una temperatura di 540°C, porta il legante ad ignizione. I fumi della combustione vengono aspirati via dalla fornace ed abbattuti nel postbruciatore della Carbolite, il quale raggiunge una temperatura di 900°C, così da tenere le emissioni di inquinanti al di sotto del livello imposto dalla Comunità Europea. Durante il test, la bilancia interna consente di monitorare il peso del campione e quando non si registrano più variazioni di peso, si conclude la prova. Attraverso il confronto tra il peso del RAP pre-ignizione e degli aggregati spogli post-ignizione, è possibile determinare il contenuto di bitume sia rispetto agli aggregati che alla miscela. Il forno è dotato, come già detto, di un software che sulla base della conoscenza del peso del campione prima dell'ignizione e al termine della prova, fornisce la percentuale di bitume ma, per un ulteriore check, il parametro viene calcolato anche manualmente, mediante una bilancia esterna alla Carbolite. È molto importante che le pesate del materiale pre e post ignizione vengano effettuate a temperatura ambiente per eliminare l'errore di rilevazione del peso legato alla differenza di temperatura tra il materiale in ingresso (25°C) e in uscita dal forno (540°C).

Le equazioni che permettono di calcolare il contenuto di bitume sono:

$$\%B_{mix} = \frac{(Net W_{ante} - Net W_{post})}{Net W_{ante}}$$

$$\%B_{agg} = \frac{(Net W_{ante} - Net W_{post})}{Net W_{post}}$$

Il contenuto medio di bitume della classe di riferimento risulta quindi essere pari a **4.4%** sugli aggregati e **4.2%** sul mix, sulla base dei valori ottenuti da 4 differenti estrazioni. I valori delle singole estrazioni vengono di seguito riportate nella tabella seguente:

	%B_{aggr}	%B_{mix}
estrazione 1	4,4	4,2
estrazione 2	4,3	4,1
estrazione 3	4,2	4,1
estrazione 4	4,7	4,5
media	4,4	4,2

tabella 4.4: Contenuto di legante del RAP

4.1.3 GRANULOMETRIA DEGLI AGGREGATI CLASSE 5/8

Gli aggregati utilizzati per la determinazione del contenuto di legante, sono stati

successivamente impiegati per la determinazione della curva granulometrica degli aggregati post bruciatura del bitume, in accordo con la normativa UNI EN 12697-2, 2003. Ancora una volta si utilizza il setacciatore elettromagnetico per un tempo fissato pari a 15 minuti. Poiché la classe scelta presentava diametro variabile da 5 mm a 8 mm, in seguito alla bruciatura del legante, si avrà la disgregazione dei clusters con conseguente incremento della frazione fine a discapito di quella più grossolana. Perciò l'apertura in mm dei setacci scelti per il test sugli aggregati spogli è: 8, 6.3, 6, 5, 4.75, 4, 2, 1, 0.5, 0.250, 0.125, 0.063 ed infine il fondello che raccoglie eventuali residui di dimensioni minori di 0.063 mm.



Figura 4.5: Aggregati spogli prima della setacciatura; Preparazione del test

Una volta conclusosi il test sul contenuto di bitume, sono stati recuperati gli aggregati prestando estrema attenzione ad evitare perdite di materiale e, dopo essere stati pesati, sono stati lavati con l'utilizzo di un setaccio con apertura dei fori pari a 0.063 mm per asportare il filler. Gli aggregati così lavati sono stati posti ad essiccare in forno a 105°C in accordo con la normativa UNI EN 1097, fino al raggiungimento del peso costante. Gli aggregati sono stati poi ripesati una volta raffreddati e la differenza rispetto alla pesata precedente al lavaggio, si intende pari al peso del filler che era inizialmente presente nel campione.

Una volta effettuati questi passaggi preliminari, il campione è pronto per essere setacciato e viene dunque posizionato in cima alla pila di setacci.

Al termine della prova, ogni setaccio viene pesato sia prima di essere vuotato dal

materiale che dopo, in modo tale da permettere di conoscere il peso del trattenuto per differenza di pesate. Da questi valori è possibile determinare il passante progressivo ad ogni setaccio e costruire così la curva granulometrica.

Le equazioni impiegate sono ancora una volta:

- Trattenuto parziale [%]

$$r_i = 100 \cdot \frac{m_i}{m_{tot}}$$

- Trattenuto progressivo [%]

$$R_i = \sum_{j=0}^i r_j$$

- Passante progressivo [%]

$$P_i = 100 - R_i$$

La curva granulometrica di riferimento per gli aggregati spogli del RAP classe 5/8 è stata determinata mediando i valori ottenuti da due differenti setacciate, le cui rispettive tabelle che riportano i passanti progressivi e le curve granulometriche sono presentate di seguito:

RAP	
apertura setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
8,0	100,0
6,3	76,1
5,6	58,1
5,0	39,8
4,75	35,8
4,0	27,8
2,0	19,9
1,0	15,3
0,500	12,1
0,250	9,4
0,125	7,3
0,063	5,5

tabella 4.5: Valori percentuali di passante progressivo degli aggregati spogli, test 1

RAP	
apertura setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]

8,0	100,0
6,3	76,4
5,6	57,0
5,0	38,2
4,75	33,4
4,0	27,6
2,0	19,7
1,0	15,3
0,500	12,0
0,250	9,4
0,125	7,2
0,063	5,4

tabella 4.6: Valori percentuali di passante progressivo degli aggregati spogli, test 2

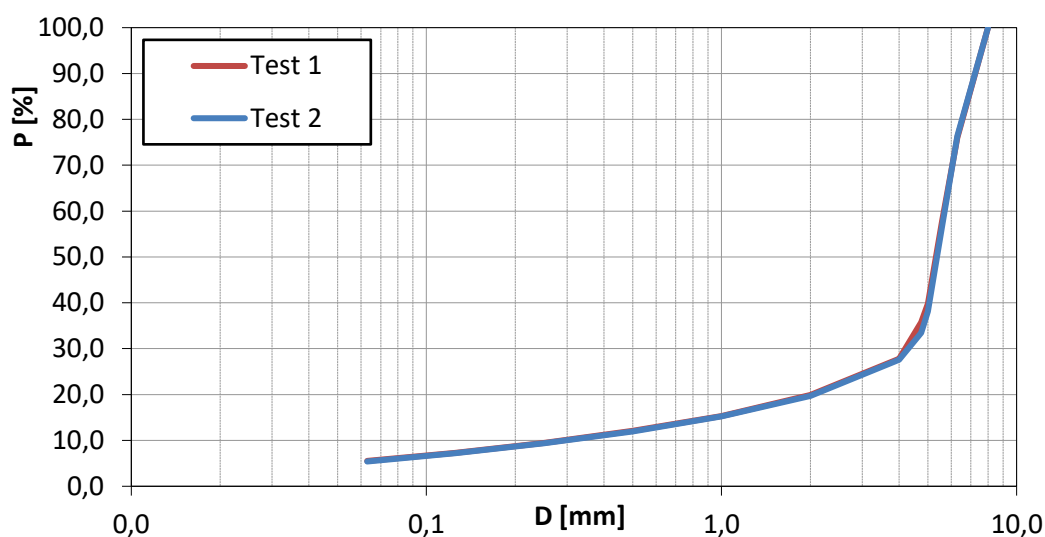


Grafico 4.3: Curve granulometriche degli aggregati

Di seguito viene riportata la tabella contenente i valori medi, su due determinazioni, di passante progressivo per gli aggregati spogli e la corrispondente curva granulometrica, messa a confronto con quella media del RAP:

RAP	
apertura setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
8,0	100,0
6,3	76,2
5,6	57,5
5,0	39,0
4,75	34,6

4,0	27,7
2,0	19,8
1,0	15,3
0,500	12,1
0,250	9,4
0,125	7,2
0,063	5,5

tabella 4.7: Valori percentuali medi di passante progressivo degli aggregati spogli

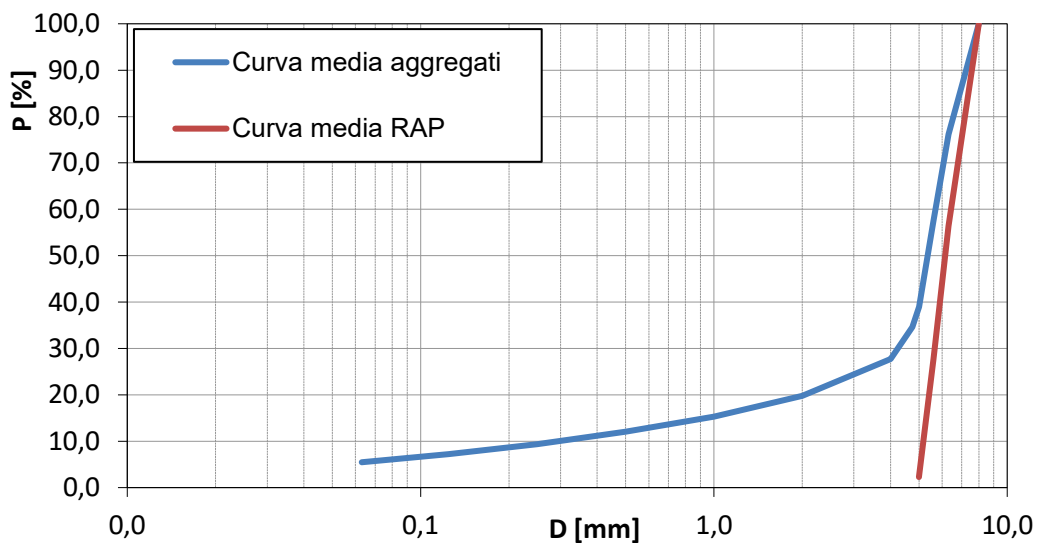


Grafico 4.4: Curve granulometriche medie del RAP e degli aggregati spogli

4.1.4 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA

La massima massa volumica teorica (MMVT) è definita come la densità della miscela, escludendo i vuoti e si determina su un campione di materiale sciolto, in accordo con la normativa UNI EN 12697-5, 2003. Tale test è stato eseguito sul RAP, RAP miscelato a rejuvenators (ECO ACF+; Polygen RF) e RAP miscelato a del bitume vergine al fine di poter definire la percentuale di vuoti dei campioni compattati successivamente con la pressa giratoria.

Il test sfrutta il vuoto creato da un macchinario per estrarre l'aria interna al picnometro, all'interno del quale è disposto il campione di materiale sciolto in immersione in acqua distillata. Il volume del campione viene calcolato mediante procedura volumetrica, misurando la quantità di acqua spostata dal campione all'interno del picnometro. Per determinare la densità, si richiede di conoscere inoltre la massa del picnometro completamente riempito di acqua distillata e deaerata, di cui si conosce anche la

temperatura, così da poter ricavare il volume interno del picnometro.



Figura 4.6: Impianto a vuoto; Picnometri corredati di tappi

Per il test, un campione di materiale sciolto, il cui peso è selezionato in accordo con la normativa UNI EN 12697-5, viene suddiviso in due picnometri, preventivamente pesati. Il test fornirà dunque due risultati che, mediati tra loro, consentono di ridurre la variabilità della misura.

Una volta posto il materiale dentro i picnometri, si registra il peso totale, si riempiono di acqua distillata e, applicando il vuoto, si rimuove l'aria dai pori del materiale. Occasionalmente i picnometri vengono scossi per facilitare l'estrazione dell'aria dai vuoti e, quando visivamente non si osservano più le bolle d'aria uscire dal materiale, si azzerava con cautela la depressione creata sui picnometri.



Figura 4.7: Picnometri contenenti il campione appena deaerato

I picnometri vengono poi chiusi con il loro tappo e colmati di acqua distillata e deaerata fino all'orlo, creando un menisco visibile all'apice del tappo.

L'equazione impiegata per la determinazione della massima massa volumica teorica è la seguente:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \cdot V_P - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

Dove:

- ρ_{mv} : massima massa volumica teorica [kg/m³];
- m_1 : massa del picnometro col tappo [g];
- m_2 : massa del picnometro con il tappo ed il campione [g];
- m_3 : massa del picnometro con il campione al suo interno ed il tappo, colmo di acqua distillata fino all'orlo [g];
- V_P : volume interno al picnometro con tappo [m³];
- ρ_w : densità dell'acqua alla temperatura del test [kg/m³].

Il risultato del test è riportato nella seguente tabella:

	MMVT		
	Picnometro 1	Picnometro 2	Media
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
RAP	2588	2595	2592
RAP + ECO ACF+ + BIT	2466	2491	2479
RAP + ECO ACF+	2602	2559	2581
RAP + 2.2%B	2512	-	2512

tabella 4.8: MMVT dei materiali oggetto di studio

4.1.5 LAVORABILITÀ

Per valutare la lavorabilità dei materiali oggetto di studio è importante analizzare le caratteristiche della compattazione mediante compattazione con la pressa a taglio giratorio in accordo alla Norma UNI EN 12697-31.

La particolarità di questo metodo consiste nel poter esercitare contemporaneamente una pressione verticale e un moto rotatorio al provino. Questa azione riorganizza internamente e continuamente i suoi costituenti, addensando le miscele in modo del tutto simile a quanto fatto in opera mediante rulli. Inoltre l'uso della pressa giratoria

permette di monitorare l'addensamento del campione durante la compattazione.

Il macchinario può funzionare fissando un target sul numero di rotazioni a cui sarà soggetto il campione o un target sull'altezza finale di quest'ultimo.

La pressa è composta da un corpo rigido, una testa di carico e un sistema in grado di misurare e registrare l'altezza del campione. La compattazione avviene, come già anticipato, per mezzo di una simultanea azione di pressione statica (fissata a 600 kPa) e un'azione di taglio risultante dalla rotazione dell'asse della fustella con un angolo inclinato rispetto alla forza di compressione pari a 1.25° in modo da generare una superficie di rivoluzione avente forma conica. Questa duplice azione genera dunque all'interno del campione un sistema di forze che consente di ottenere un addensamento ottimale con un continuo riarrangiamento delle particelle.

La pressa giratoria e lo schema di compattazione sono riportati di seguito:

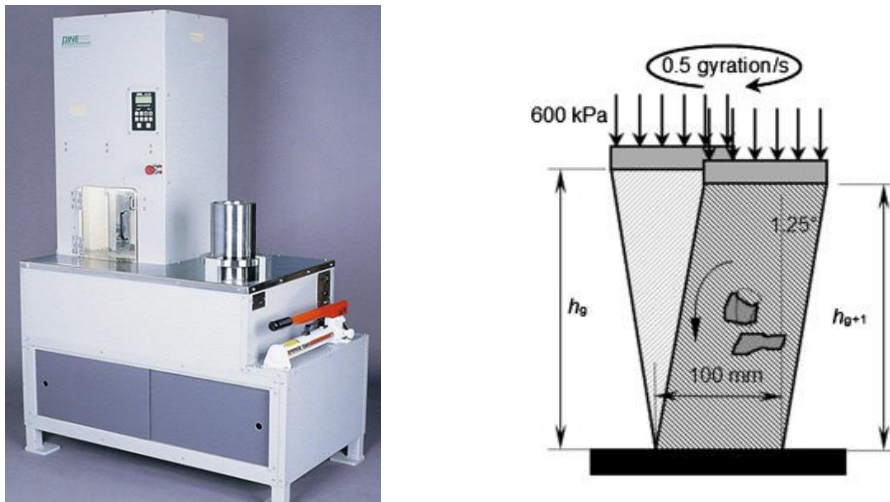


Figura 4.8: Pressa giratoria; Schema di compattazione

La normativa UNI EN 12697-31 fornisce le informazioni riguardanti la temperatura di prova e la massa da utilizzare e in particolare, per quanto riguarda la temperatura, si fissa un range di temperature target pari a 150°C ±10°C, avendo cura che sia le fustelle che il materiale abbiano raggiunto tale condizione, dopo un certo tempo in stufa. In accordo con la normativa sopra citata, è possibile determinare anche la massa di primo tentativo necessaria ad ottenere un provino cilindrico di altezza maggiore rispetto al valore target, mediante l'uso della seguente formulazione:

$$M = 10^{-9} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h_{min} \cdot \rho_M$$

Dove:

- M : massa del provino da introdurre nella fustella [kg];
- D : diametro interno della fustella [mm];
- h_{min} : minima altezza finale di un provino, corrispondente ad una percentuale nulla di vuoti [mm];
- ρ_M : massima massa volumica teorica del campione [kg/m^3].

La figura seguente mostra l'equipaggiamento necessario alla compattazione dei campioni: tappo inferiore, tappo superiore e fustella di diametro 100 mm:



Figura 4.9: Fustella per la pressa giratoria

Il materiale, una volta raggiunta la temperatura prestabilita, viene estratto dalla stufa, e posto all'interno di una coppa riscaldante per miscele manuali per poter essere lavorata con una paletta metallica (anch'essa appena estratta dal forno per evitare che al contatto col materiale caldo possa sottrargli calore) al fine di riattivare la pellicola superficiale del RAP prima della compattazione (nel caso di campioni composti da solo RAP) o per miscelare il RAP con gli additivi rigeneranti e/o del bitume vergine. In particolare gli additivi rigeneranti vengono spruzzati sul RAP caldo in quantità definite dal produttore (come percentuale sul peso totale di RAP), mentre il bitume viene colato caldo sul RAP in quantità tale da incrementare del 50% il contenuto di bitume rispetto all'aggregato spoglio.

L'immagine seguente mostra la fase di miscelazione e monitoraggio della temperatura all'interno della coppa:



Figura 4.10: Monitoraggio della temperatura; miscelazione del RAP con Rejuvenator

Una volta che il campione è pronto per la compattazione, lo si introduce nella fustella, la quale è a sua volta introdotta nell'alloggiamento apposito della pressa giratoria, pronta per eseguire la compattazione.

La figura seguente mostra l'alloggiamento per la fustella all'interno della pressa giratoria: si noti la presenza di tre coppie di cuscinetti a sfera necessari ad applicare il contrasto sulla flangia della fustella:



Figura 4.11: Alloggiamento della fustella nella pressa giratoria

Il settaggio di prova per la determinazione della curva di compattazione è il seguente:

- Pressione verticale 600 kPa;
- Velocità di rotazione 30 giri/min;
- Compattazione ad un numero di giri fissato a 180.



Figura 4.12: Interfaccia per il settaggio della modalità di compattazione

Come già detto, la macchina registra l'altezza del campione al compimento di ogni rotazione della fustella e, a partire da questo dato, calcolato il volume geometrico del campione e nota la MMVT, è possibile determinare la percentuale di compattazione e quella di vuoti. Si possono così costruire le curve di compattazione per ogni materiale.

Una volta che il campione è stato compattato, si può estrarre la fustella dalla pressa e, dopo aver fatto raffreddare il provino, lo si estrude mediante un torchio idraulico.

Al momento dell'estrusione, il campione si presenta come nell'immagine seguente:



Figura 4.13: Campione di RAP compattato con la pressa giratorio; Estrusione del campione

Le curve di compattazione rappresentano la percentuale di compattazione dei campioni al variare del numero di rotazioni della pressa giratoria, espresso in scala logaritmica.

I parametri identificativi di ogni curva sono:

- L'autoaddensamento C_1 : rappresentato dal valore di addensamento raggiunto al primo giro della pressa, ovvero l'intercetta all'origine nel grafico;
- La lavorabilità K : rappresentata dalla pendenza della curva.

Tali parametri consentono di ottenere la retta che descrive il comportamento del materiale durante la compattazione:

$$C_{(n_G)} = C_1 + k \cdot \log(n_G)$$

Di seguito si riporta il grafico che mostra la curva di compattazione del solo RAP e la rispettiva equazione della curva:

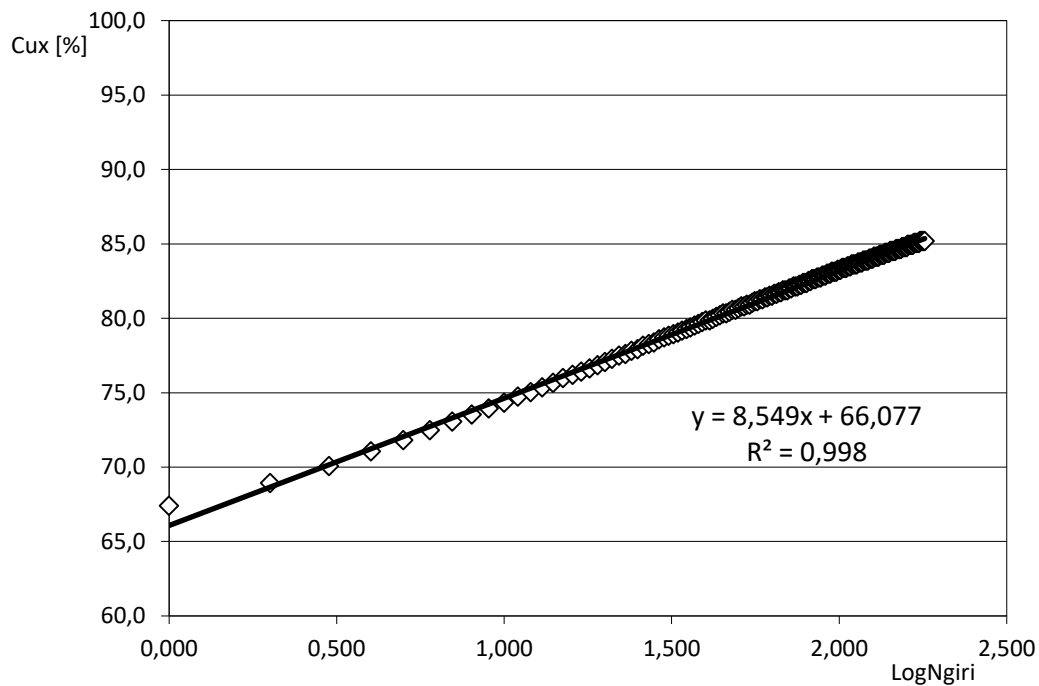


Grafico 4.5: Curva di compattazione RAP a 180 giri

La tabella seguente riporta la percentuale dei vuoti presenti nel campione ad alcuni valori di giri caratteristici ed i valori di K e C_1 .

V₁₀	V₁₀₀	V₁₈₀
[%]	[%]	[%]
25,7	16,8	14,8

tabella 4.9: Percentuale di vuoti del RAP a 10, 100 e 180 giri

k	C₁
8,55	66,1

tabella 4.10: Valori di K e C_1

N.B. La determinazione della curva di compattazione è stata eseguita inizialmente solo sul RAP per metterne in evidenza il comportamento e quindi fissare i parametri per l'elaborazione del sistema modello. Una volta definita la composizione target del sistema modello, sono stati compattati, seguendo tale criterio, i campioni di RAP, RAP miscelato con rejuvenators (ECO ACF+; Polygen RF) e RAP miscelato con bitume vergine. Successivamente sono state ricavate le curve di compattazione al fine di

- effettuare un confronto tra le relative caratteristiche di lavorabilità dei diversi materiali;
- valutare la conformità dei parametri volumetrici dei campioni con quelli target del sistema modello.

Si riportano nel Paragrafo 6.1 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) le curve di compattazione di tutti i materiali, ottenute facendo riferimento i parametri target del sistema modello.

4.2 ACF

Nella sperimentazione sono stati impiegati due diversi tipi di additivo rigenerante, i quali si presentano come un fluido oleoso, stoccato all'interno di contenitori in plastica, come riportato nella figura seguente:



Figura 4.14: Additivo ECO ACF+; Additivo Polygen RF

Durante la sperimentazione, gli additivi sono stati spruzzati sul fresato caldo e miscelati

manualmente ad esso per circa 15 minuti, così da favorire il processo di diffusione all'interno del bitume invecchiato. Per favorire il corretto dosaggio degli ACF e un'uniforme ricoprimento dei granuli di RAP, sono stati impiegati degli spruzzini.



Figura 4.15: Spruzzini contenenti i rejuvenators

4.2.1 ECO ACF+

Questo additivo rigenerante proviene dall'azienda FHL Group di Bergamo, è un prodotto contenente oli di origine organica e si presenta con una colorazione giallo tenue. Il produttore consiglia di dosare il prodotto con una percentuale sul peso del fresato pari allo 0.15% per miscele contenenti fino al 50% di RAP ed assicura una perfetta compatibilità con qualsiasi tipo di bitume e l'ecologicità del prodotto.

Per quanto concerne la modalità di utilizzo, può essere spruzzato sul RAP freddo o caldo, grazie alla scarsa volatilità, direttamente nel miscelatore degli impianti di produzione.

4.2.2 POLYGEN RF

Questo additivo rigenerante proviene dall'azienda Polycykle di Ferrara, è un prodotto contenente oli idrocarburi paraffinici con una base vegetale e si presenta con una colorazione nerastra a causa della presenza di una piccola percentuale di bitume. Il produttore consiglia di dosare in prodotto con una percentuale sul peso del fresato pari allo 0.2% per miscele contenenti 100% RAP. Ed assicura una perfetta compatibilità con qualsiasi tipo di bitume e l'ecologicità del prodotto.

Per quanto concerne la modalità di utilizzo, può essere spruzzato sul RAP freddo o caldo, grazie alla scarsa volatilità, direttamente nel miscelatore degli impianti di produzione oppure aggiunto al bitume vergine nelle cisterne di stoccaggio.

La formulazione è stata studiata per ottenere un triplice effetto: rigenerante del bitume

ossidato, attivante di adesione e riduttore di viscosità del bitume indurito.

4.3 BITUME VERGINE

Durante la sperimentazione è stato impiegato anche un bitume vergine proveniente dall'impianto di produzione del conglomerato bituminoso di Salbertrand e prodotto dall'azienda Iplom. Il materiale, stoccato all'interno di secchi sigillati in alluminio, è stato poi suddiviso, una volta giunto in laboratorio, in vaschette di alluminio contenenti circa 50 g di bitume, così da facilitarne l'utilizzo durante le miscele. Si tratta di un bitume tradizionale con classe di penetrazione 50/70 di cui si riporta un'immagine di seguito:



Figura 4.16: Stoccaggio del bitume vergine

5 METODOLOGIE DI PROVA

Come anticipato nel capitolo 3 (SPERIMENTAZIONE), la campagna sperimentale sviluppata durante il lavoro di Tesi è finalizzata all'analisi dei risultati ottenuti per differenti materiali, con i seguenti tipi di prova:

- Prova di Modulo di Rigidezza (ITSM)
- Prova di Resistenza a Trazione Indiretta (ITS)
- Prova di Modulo Resiliente (Mr)
- Prova di Compressione Semplice
- Prova Leutner

I campioni oggetto di studio sono composti da:

- **RAP**: campione di solo RAP
- **RAP + ECO ACF+ (0.35%)**: il produttore consiglia di impiegare fino allo 0.15% di rejuvenator per conglomerati bituminosi contenenti fino al 50% RAP. Si è optato per raddoppiare il contenuto di additivo poiché si tratta di un conglomerato composto da 100% RAP e si è aggiunto un ulteriore 0.05% per tenere in conto eventuali perdite di rejuvenator durante la miscelazione col RAP.
- **RAP + ECO ACF+ (0.35%) + bitume vergine (2.2%)**: per quanto concerne il contenuto di additivo, si fanno le medesime considerazioni del materiale RAP + ECO ACF+ (0.35). La percentuale di bitume di aggiunta è scelta andando ad incrementare del 50% l'originale contenuto di legante, passando da 4.4% a 6.6% globale.
- **RAP + Polygen RF (0.35%)**
- **RAP + bitume vergine (2.2%)**: la percentuale di bitume di aggiunta è scelta andando ad incrementare del 50% l'originale contenuto di legante, passando da 4.4% a 6.6% globale.
- **Bianco + bitume vergine (4.4%)**: si tratta di un materiale ricostituito ovvero composto da una matrice litica che è quella del RAP (una volta eliminato il legante con il forno ad ignizione) a cui viene aggiunto del bitume vergine in percentuale pari al 4.4, così da replicare la volumetria dei campioni di solo RAP.
- **Bianco + bitume vergine (6.6%)**: si tratta di un materiale ricostituito ovvero

composto da una matrice litica che è quella del RAP (una volta eliminato il legante con il forno ad ignizione) a cui viene aggiunto del bitume vergine in percentuale pari al 6.6, così da replicare la volumetria dei campioni di RAP + bitume vergine (2.2%)

Di seguito è riportata la descrizione della campagna sperimentale condotta durante il lavoro di tesi:

5.1 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEL SISTEMA MODELLO

Come anticipato nel capitolo 3, è necessario definire i parametri del sistema modello. Poiché la granulometria e la composizione dei campioni è già stata discussa, si riporta di seguito il processo impiegato per definire la VMA.

Per l'elaborazione del parametro VMA target (intesa come geometrica, in quanto la massa volumica considerata per il calcolo è quella geometrica), si è partiti dalla curva di compattazione del solo RAP fino a 180 rotazioni della pressa giratoria. Le 180 rotazioni sono state necessarie per studiare la lavorabilità del materiale e per valutare in termini pratici se il campione compattato avrebbe mantenuto la forma propria una volta estruso. L'incertezza scaturisce dal fatto che, lavorando con del bitume invecchiato, non si ha la certezza dell'adesione mutua tra i grani di RAP, neanche combinando l'elevata temperatura ed energia di compattazione. Poiché il campione compattato a 180 giri della pressa giratoria ha manifestato una grande capacità coesiva, si è scelto di partire, per le successive compattazioni, da un numero di giri molto basso (30 rotazioni) e di incrementarlo con step di 10/20 rotazioni della pressa fino al raggiungimento di una condizione in cui il campione avrebbe avuto sufficiente coesione da essere testato.

Si è proceduto quindi alla compattazione di un campione di solo RAP a 30 rotazioni, che si sono rivelate sufficienti a garantire coesione al campione estruso.

La scelta del numero di giri di riferimento (30) è stata fatta al fine di poter ottimizzare la volumetria del sistema modello per ottenere un basso livello di ingranamento degli inerti e quindi minimizzare i punti di contatto tra i grani.

Le proprietà volumetriche del campione a 30 rotazioni della pressa giratoria sono le seguenti:

N_{giri}	M_{effettiva}	h(N_g)	v_{30 giri}
[/]	[g]	[mm]	[%]
30	1116,6	69,7	21,3

tabella 5.1: Proprietà volumetriche a 30 rotazioni della pressa giratoria

Una volta note tutte le grandezze necessarie, si è proceduto al calcolo della VMA del campione di RAP in corrispondenza delle 30 rotazioni della pressa.

La formula che consente di determinare la VMA è la seguente:

$$VMA = 100 \times \left[1 - \frac{MV \times (1 - \%B)}{MV_{gb}} \right]$$

Dove:

- MV è la massa volumica del campione a 30 giri
- %B è la percentuale di bitume sugli aggregati posta pari al 4.4%
- MV_{gb} è la bulk specific gravity

Poiché non si è a conoscenza del valore di MV_{gb} , lo si approssima con MV_{ge} del campione di solo RAP, che si ricava mediante la seguente formulazione riportata in seguito.

La massa volumica effettiva degli aggregati (MV_{ge}) rappresenta il rapporto tra la massa degli aggregati spogli e la somma tra il volume effettivo degli aggregati e il volume dei pori non permeabili al bitume. Questo parametro è una proprietà intrinseca dell'aggregato e viene calcolata con la seguente formula:

$$MV_{ge} = \frac{1 - \%B}{\frac{1}{MMVT} - \frac{\%B}{\rho_B}}$$

Dove:

- %B è la percentuale di bitume sugli aggregati posta pari al 4.4%
- MMVT è la massima massa volumica teorica (calcolata coi picnometri per ogni materiale, è riportata nel capitolo PROPRIETA' DEI MATERIALI E COMPOSIZIONE)
- P_B è la densità del bitume posta pari a 1.015 [g/cm³]

Essendo note tutte le grandezze necessarie a determinare la VMA del campione di RAP a 30 rotazioni della pressa, si procede al calcolo:

MMVT	2,592	[g/cm ³]
MV_{30 giri}	2,040	[g/cm ³]
MV_{ge}	2,791	[g/cm ³]
VMA_{30 giri}	30,1	[%]

tabella 5.2: VMA target del sistema modello

In questo modo si è determinato il parametro VMA target del sistema modello al quale dovranno far riferimento tutti i campioni compattati, indipendentemente dalla presenza di rejuvenator o di bitume di aggiunta. Per i campioni compattati in seguito si sceglie di

imporre una tolleranza di $\pm 1\%$ sulla VMA target.

5.2 CONFEZIONAMENTO DEI CAMPIONI

Al fine di poter effettuare i test meccanici, si richiede di confezionare dei campioni con la pressa giratoria. È dunque necessario determinare la massa di RAP comune a tutti i campioni di altezza uguale, indipendentemente dalla quantità e tipo di additivo/bitume di aggiunta.

La massa viene quindi determinata con proporzione lineare, a partire dalla conoscenza della:

- Massa del campione di prova di RAP (1116.6 g)
- Altezza del campione in corrispondenza delle 30 rotazioni della pressa giratoria (69.7 mm)
- Altezza finale target del campione che si vuole produrre (65 mm)

La massa necessaria risulterà dunque essere pari a **1041.3 g**.

N.B. i campioni da 200 mm vengono realizzati per strati e la loro composizione verrà mostrata nel paragrafo “Campioni da 200 mm”.

N.B. La miscelazione del RAP con gli additivi e/o il bitume vergine e la miscelazione dei campioni di aggregati ricostituiti e bitume vergine segue le modalità descritte nel paragrafo 4.1.5 e la normativa di riferimento per la compattazione con pressa giratoria è la UNI EN 12697-31.

5.2.1 CAMPIONI DA 65 MM E CURVE DI COMPATTAZIONE

I campioni alti 65 mm vengono realizzati per le prove di modulo di rigidezza e di resistenza a trazione indiretta mediante l'uso della pressa giratoria, scegliendo la modalità di compattazione “ad altezza” dall'interfaccia utente.



Figura 5.1: Scelta della modalità di compattazione

Questa scelta consente di eliminare la variabilità legata alla diversa lavorabilità dei

materiali ad opera dell'aggiunta di additivi e/o bitume, rispetto ai campioni di solo RAP. Si presume infatti che l'aggiunta di tali additivi, apporti delle modifiche alla reologia del bitume del RAP, che si ripercuotono sulla lavorabilità della miscela.

In questo modo si otterranno dei campioni che, indipendentemente dal tipo di materiale, presenteranno il medesimo scheletro litico.

Una volta realizzati per ogni materiale i campioni di altezza 65 mm, si costruiscono le curve di compattazione.



Figura 5.2: Campioni da 65 mm contrassegnati in bianco per indicare il tipo di materiale

5.2.2 CAMPIONI DA 200 MM

I campioni da 200 mm vengono realizzati per strati, secondo il seguente schema:

STRATO 1			STRATO 2			STRATO 3		
h_1	70	[mm]	h_2	65	[mm]	h_3	65	[mm]
m_1	1121,4	[g]	m_2	1041,3	[g]	m_3	1041,3	[g]

tabella 5.3: Composizione dei campioni snelli

Lo strato 1 è quello che viene compattato per primo, dunque è quello che si trova sul fondo della fustella durante il confezionamento dei campioni. Di conseguenza lo strato 2 sarà quello intermedio e lo strato 3 sarà quello sommitale.

La scelta di compattare i campioni per strati è stata presa per garantire una compattazione uniforme su tutta l'altezza del provino in quanto la profondità alla quale la pressa riesce ad esplicare la sua azione non consentirebbe il corretto ingranamento degli inerti lungo

tutta l'altezza.

m_{tot}	3204,0	[g]
h_{tot}	200	[mm]

tabella 5.4: Massa totale ed altezza dei campioni snelli

Le masse sono state calcolate anche stavolta con proporzione lineare ed ogni strato è compattato con modalità di compattazione "ad altezza".

Di seguito si riporta a titolo di esempio, uno dei campioni di altezza 200 mm, composto da solo RAP. Si noti la presenza di alcuni aggregati non ricoperti da bitume:

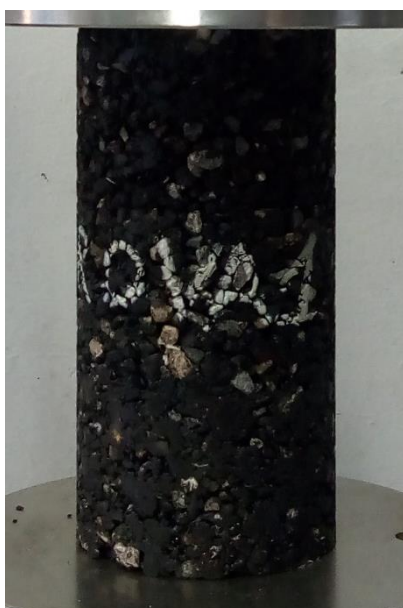


Figura 5.3: Campione di solo RAP, h=200 mm

5.3 MODULO DI RIGIDEZZA (ITSM)

Le prove di modulo di rigidezza vengono effettuate, in configurazione di trazione indiretta, col macchinario NAT (Nottingham Asphalt Tester).

Il NAT è composto dai seguenti elementi:

- Cella climatica: per il monitoraggio della temperatura durante lo svolgimento dei test;
- Struttura di carico: è composta da due vitoni verticali, che consentono di regolare l'altezza dell'attuatore, fissati ad una piastra di base su cui si alloggia il castelletto di prova, avendo cura di centrarlo sotto la testa di carico. All'attuatore è poi

collegata una cella di carico che invia all'unità di controllo i valori di forza registrati;

- Unità pneumatica: la forza che viene trasmessa al campione durante la prova, deriva dalla pressione idraulica prodotta da un compressore, il quale è collegato all'unità pneumatica del NAT. Durante le prove, tale pressione è mantenuta da questa unità tra i 6 e i 7 bar;
- Castelletto di prova: è il telaio di supporto e fissaggio del campione e dei trasduttori LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) aventi una precisione di 250 μm , necessari per misurare le deformazioni;
- Sistema computerizzato di acquisizione e controllo dei dati: è composta da sei moduli i quali forniscono energia elettrica agli organi di controllo e di misurazione. Questo sistema è in comunicazione diretta con il sistema di applicazione dei carichi ed i trasduttori.

Di seguito sono riportate alcune immagini che raffigurano gli elementi di cui è composto il NAT:



Figura 5.4: Struttura di carico del NAT; Unità pneumatica; Unità di acquisizione dati e controllo

La prova di modulo di rigidezza è una tipologia di test non distruttivo che si esegue su campioni cilindrici e, come anticipato all’inizio del paragrafo, viene eseguita in configurazione di trazione indiretta. Il test è eseguito in accordo con la normativa UNI EN 12697-26 annesso C e sfrutta la teoria dell’elasticità per ottenere i valori di modulo di rigidezza in output, perciò il materiale viene assunto come omogeneo ed isotropo. La dimensione del campione deve essere scelta in accordo con quanto prescritto dalla normativa, per cui si è selezionata un’altezza di 65 mm.

Il provino cilindrico viene sottoposto ad una compressione verticale lungo due generatrici diametralmente opposte ed il tipo di carico che si adopera è pulsante, con un determinato periodo di riposo tra le ripetizioni.

L'immagine seguente mostra lo schema dell'impulso di carico:

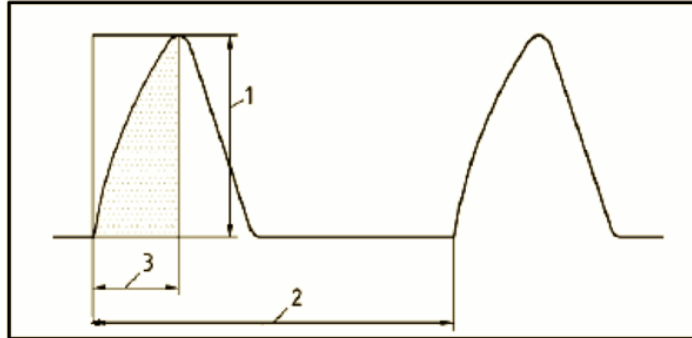


Figura 5.5: Schematizzazione dell'impulso di carico

Dove:

- 1: è il carico di picco;
- 2: è la durata dell'impulso;
- 3: è il rise-time, ovvero il tempo necessario ad arrivare al picco del carico, dal momento di applicazione dello stesso.

Le deformazioni vengono lette sul diametro orizzontale che per effetto del carico tende ad allungarsi. Quindi nonostante venga applicata una compressione, la distribuzione delle tensioni nel piano verticale è di trazione.

La figura seguente mostra le caratteristiche tensodeformative del campione durante l'esecuzione della prova:

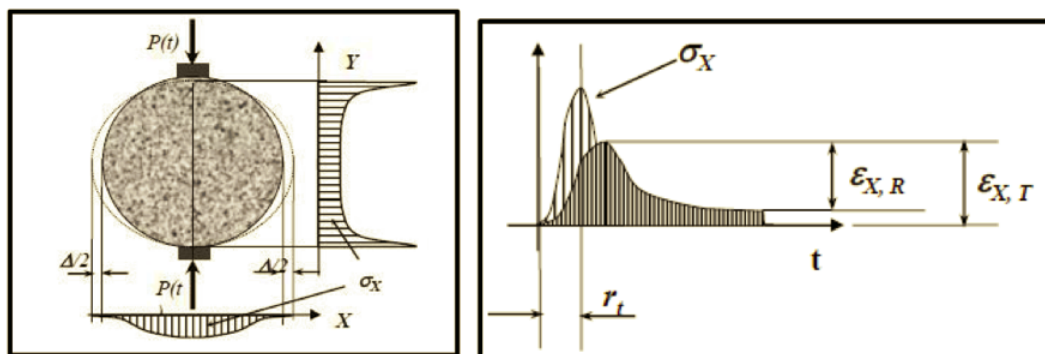


Figura 5.6: Caratteristiche tensodeformative del campione durante la prova di modulo di rigidezza

Come si può notare dall'immagine di destra, tra il valore di picco del carico e della risposta

deformativa si ha un ritardo, il quale è legato alle proprietà viscosi del bitume.

Il modulo di rigidezza è una grandezza meccanica definita quasi-elastica poiché il test, pur discendendo dalla misura di deformazioni non totalmente reversibili, è eseguito secondo delle condizioni che minimizzano l'influenza delle componenti viscosi (Tesi di Laurea: Caratterizzazione prestazionale di conglomerati bituminosi riciclati a freddo per pavimentazioni autostradali, 2012).

La temperatura di prova scelta è 20°C (pari a quella di condizionamento per la maturazione dei campioni dopo la compattazione).

L'espressione che consente di determinare il modulo di rigidezza è la seguente:

$$E = \left(\frac{P}{\Delta \times h} \right) \times (0.273 + \nu)$$

Dove:

- E: è il modulo di rigidezza;
- P: è il carico di picco del ciclo;
- N: è il modulo di Poisson;
- Δ : è l'ampiezza della deformazione.

In accordo con la normativa UNI EN 12697-26, il valore di modulo di rigidezza così calcolato dovrebbe essere poi corretto con un fattore di carico pari a 0.6 con la seguente formula:

$$E' = E \times (1 - 0.322 \times (\log E - 1.82) \times (0.6 - k))$$

Dove:

- E': è il modulo corretto;
- k: è il load area factor misurato

L'apparato di prova è un castelletto metallico su cui si fissano il campione e due trasduttori lineari che misurano gli allungamenti del campione sul piano diametrale orizzontale.

Le figure seguenti mostrano l'apparato per il test e lo schema di prova:

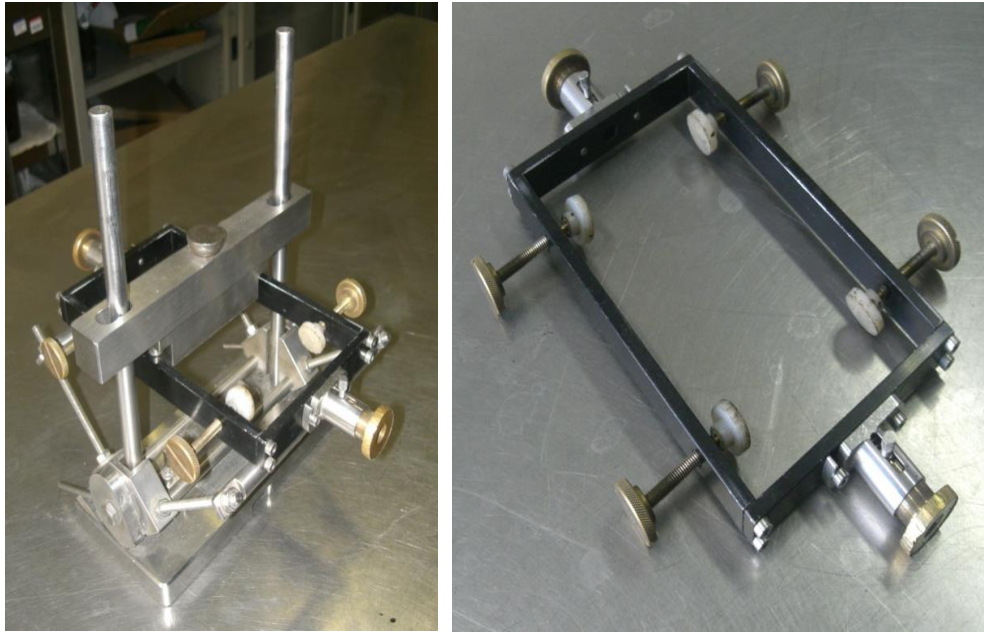


Figura 5.7: Castelletto per prova ITSM; Cornice di fissaggio dei trasduttori



Figura 5.8: Trasduttore LVDT

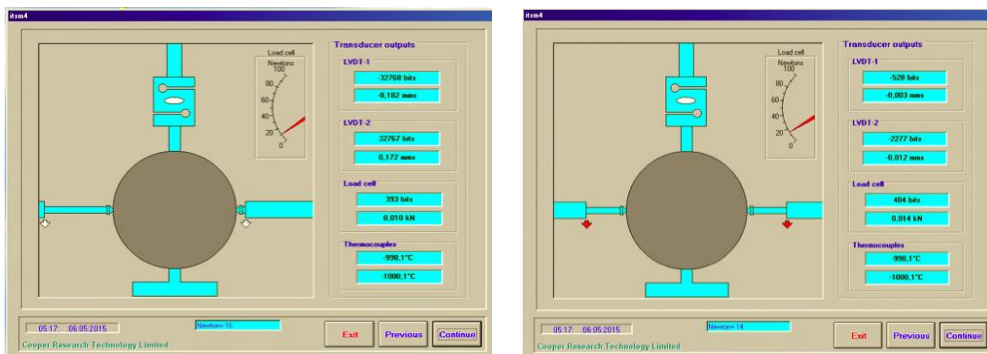
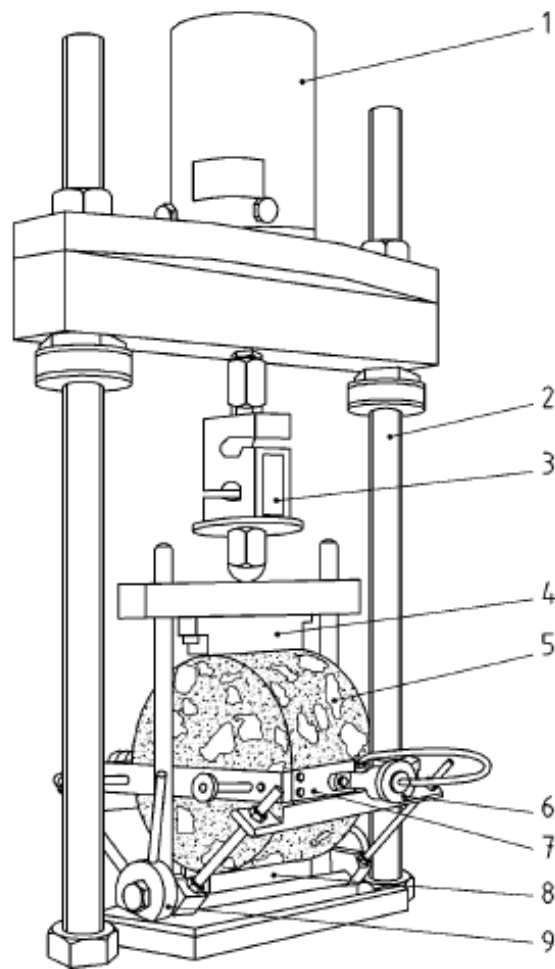


Figura 5.9: Messa in carico dei trasduttori LVDT fino all'intervallo di lavoro



Key

- 1 Pneumatic load actuator
- 2 Steel load frame
- 3 Load cell
- 4 Upper loading platen
- 5 Test specimen

- 6 LVDT adjuster
- 7 LVDT mounting frame
- 8 Lower loading platen
- 9 LVDT alignment jig

Figura 5.10: Schema di prova ITSM estratta da UNI EN 12697-26

La prova viene effettuata rilevando il valore del modulo per ciascun diametro (nel caso in cui i moduli corrispondenti ai due diametri differiscano tra loro di una quantità maggiore del 20%, si rivela necessario effettuare una terza prova su un'ulteriore direzione diametrale, individuata nella bisettrice dei due precedenti diametri). I risultati ottenuti vengono successivamente mediati, ottenendo così un unico valore.

La misurazione del modulo viene effettuata dal NAT tramite la mediazione di 5 valori, ognuno dei quali è corrispondente ad un impulso di carico. Questi 5 colpi per la misurazione del modulo sono preceduti da una serie di impulsi necessari per la calibrazione del dispositivo rispetto al campione in esame. Il concetto alla base del test è

infatti quello di applicare al campione una forza impulsiva tale per cui si abbia un'elongazione diametrale, misurata coi trasduttori, pari a 5 micron. Sono dunque necessarie delle iterazioni per calibrare questo valore di forza, dopo di che si esegue il test vero e proprio. Il numero di impulsi di condizionamento è posto pari a 25 per il primo diametro e 5 per il secondo.

Ricapitolando dunque, le impostazioni di prova utilizzate per la determinazione dei moduli di rigidità dei campioni sono le seguenti:

- Diametro del campione: 100 mm
- Altezza campione: 65 mm
- Modulo di Poisson: 0.35
- Rise-time: 124 μ s
- Deformazione orizzontale target: 5 μ m
- Colpi di preconditionamento: 25 per il primo diametro e 5 per il secondo diametro.

5.4 RESISTENZA A ROTTURA PER TRAZIONE INDIRECTA (ITS)

Le prove resistenza a rottura per trazione indiretta vengono effettuate con la pressa statica.

La macchina è composta da una struttura di base da cui si innalzano due colonne filettate a cui è fissato un traverso di contrasto mediante dei dadi. Al traverso di contrasto è poi collegata una cella di carico con la funzione di rilevare la forza applicata dal macchinario sui campioni. È inoltre presente un trasduttore lineare di spostamento che rileva in continuo il gap tra i due piatti di carico della pressa.

La forza viene applicata al campione mediante un piatto di base che è collegato, attraverso un pistone, al motoriduttore che consente di applicare il carico secondo le direttive dell'operatore (nel caso in questione, la velocità di salita del piatto).

Il macchinario è poi collegato al computer che, attraverso il programma specifico della pressa, consente di scrivere su un file .txt i valori di tempo, forza e spostamento registrati durante la prova.



Figura 5.11: Pressa statica

I campioni alti 65 mm in precedenza testati per determinare il modulo di rigidezza, vengono poi sottoposti al test di trazione indiretta. La prova di resistenza a trazione indiretta (ITS), la cui normativa di riferimento è la UNI EN 12697-23, è un test di tipo distruttivo che permette di ricavare un parametro di resistenza a rottura dei provini cilindrici.

La dimensione dei campioni (65 mm) sottoposti al test rientra nel range imposto da normativa ovvero compreso tra 35 e 75 mm.

Il campione viene portato alla temperatura di test (20°C), posizionato tra le bande di carico del castelletto di prova e viene caricato diametralmente lungo la direzione assiale del provino con velocità di spostamento costante (pari a 50 ± 2 mm/min) fino al raggiungimento della rottura. La resistenza a trazione indiretta è definita come il valore di tensione di trazione di picco calcolata in relazione alla sezione longitudinale del campione. L'apparato di prova è costituito da un castelletto dotato di due bande di carico metalliche dotate di una superficie concava con raggio di curvatura pari a quello del campione. Questo incavo consente di posizionare il campione stabilmente nel castelletto e distribuire uniformemente la pressione lungo la superficie di contatto con le bande di

carico.

Il castelletto, corredato di campione, viene poi inserito sulla piastra di base della pressa statica, pronto per iniziare il test.

Il provino viene dunque caricato con forze verticali, che determinano per effetto Poisson una trazione (inclinata di 90° rispetto alla direzione della forza) sul piano diametrale verticale portando a rottura il campione per superamento della resistenza a trazione.

La figura seguente mostra lo schema della configurazione di prova:

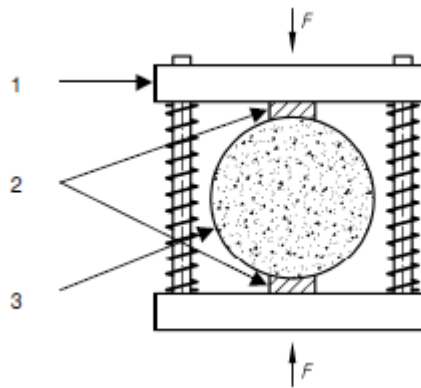


Figura 5.12: schema della configurazione di prova ITS

Dove:

- 1: testa di carico
- 2: bande di carico
- 3: campione

Come si può vedere dalla figura, delle molle di contrasto tengono separate le due ganasce (la ganascia superiore scorre in direzione verticale guidata da una coppia di aste poste ai lati del campione) per consentire l'alloggiamento del provino prima dell'inizio del test.

Una volta fatta partire la prova, il macchinario registra automaticamente e in continuo ogni step di carico, ovvero le coppie di punti (forza applicata alla testa di carico; schiacciamento verticale subito del campione). È così possibile costruire delle curve di resistenza a trazione indiretta, di cui si mostra un andamento a titolo di esempio:

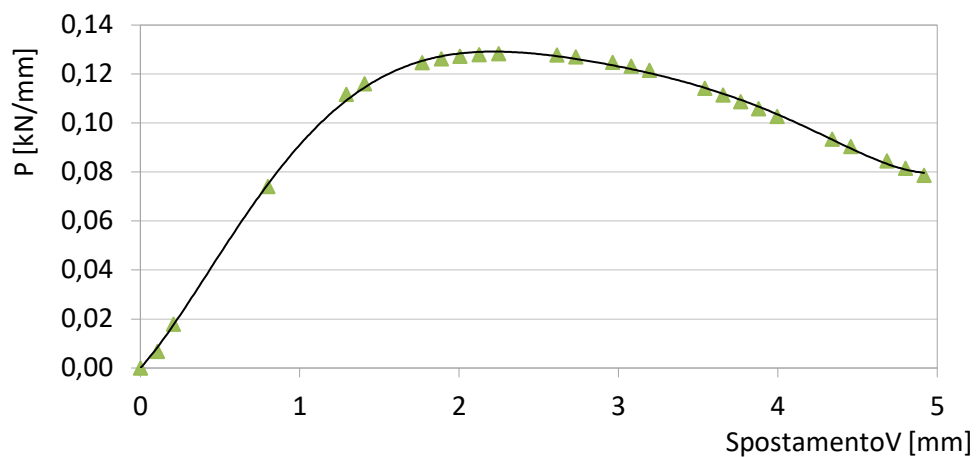


Grafico 5.1: Curva RTI carico normalizzato vs spostamento

Il parametro RTI è definito da normativa secondo la seguente formula:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \times D \times H}$$

Dove:

- ITS è la resistenza a trazione indiretta, espressa in GPa;
- P è il carico di picco, espresso in kN;
- D è il diametro del campione, espresso in mm;
- H è l'altezza del campione, espressa in mm.

Le figure seguenti mostrano la pressa corredata di castelletto e dei provini rotti durante la prova di trazione indiretta:



Figura 5.13: Pressa statica; Campioni sottoposti alla prova di trazione indiretta

Nell'immagine di destra sono visibili le tracce della superficie di rottura dei campioni.

Rottura, la quale può avvenire secondo le seguenti modalità:

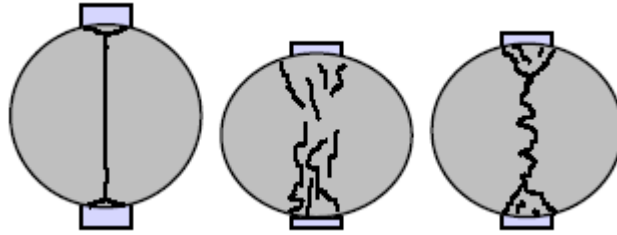


Figura 5.14: Tipologie di rottura a trazione indiretta

5.5 MODULO RESILIENTE

Il modulo resiliente è un parametro generalmente valutato su materiali granulari come le terre, sottofondi, fondazioni, misti cementati etc. Il test, di natura non distruttiva se effettuato su materiali dotati di elevata coesione come quelli oggetto di studio, si esegue con il NAT, già introdotto nel paragrafo “Modulo di rigidezza (ITSM)”, adoperando una particolare strumentazione in grado di imprimere al campione una pressione di confinamento e in contemporanea dei carichi impulsivi in testa al provino.

La dimensione dei campioni cilindrici impiegati per l’esecuzione di questo test è la seguente:

- Altezza 200 mm;
- Diametro 100 mm.

Il modulo resiliente è un parametro che riflette il comportamento meccanico dei materiali: la risposta deformativa dei sistemi granulari sottoposti ad un carico può essere suddivisa in due componenti, una elastica (resiliente) e una residua (permanente).

Successivamente alla determinazione del modulo resiliente dei campioni, si può simulare il comportamento dei materiali attraverso dei modelli (Uzan e MEPDG), adeguatamente fittati sui dati sperimentali.

Al termine della prova di modulo resiliente è anche possibile eseguire il Quick Shear Test, il quale permette di determinare gli involuppi di rottura di un materiale, al variare della pressione di confinamento. È un test di natura distruttiva che porta il campione a rottura per taglio, caricandolo assialmente. A causa dell’elevata resistenza dei materiali oggetto di studio, tale test non presenta alcun risultato, neanche nelle condizioni più severe di tensione di confinamento nulla.

La prova si esegue ancora una volta all’interno della cella climatica per monitorare la

temperatura di prova (20°C).

La deformazione assiale del campione viene misurata attraverso le letture eseguite da due trasduttori LVDT dotati della precisione di 250 µm.

L'unità di controllo del NAT, è quindi in grado di controllare i parametri di prova come:

- Il periodo degli impulsi di carico;
- Il valore di carico assiale;
- La pressione di confinamento.

Per lo studio in questione è stato scelto, tra i 2 possibili protocolli di prova di default, quello per base/sub-base.

Il protocollo consiste nell'applicazione di 500 cicli di preconditionamento al campione, seguiti da 15 sequenze di carico da 100 cicli, facendo variare le condizioni al contorno. In particolare vengono combinate tre differenti pressioni di confinamento con cinque differenti valori di sforzo deviatorico per un totale di 15 sequenze di carico.

Ogni ciclo di carico è composto da un impulso di durata 0.1 s e 0.9 s di recupero di deformazione.

Di seguito vengono riportate due immagini che rappresentano l'equipaggiamento per l'esecuzione del test ed il test in esecuzione:



Figura 5.15: Equipaggiamento per l'esecuzione della prova di modulo resiliente

Come si può notare dalla seconda immagine, la membrana di gomma contenente il

campione, presenta delle rugosità le quali indicano che si è realizzata la pressione di confinamento sul provino. Queste sono infatti dovute al contatto tra la membrana e gli aggregati superficiali: la tensione di confinamento è ottenuta creando all'esterno della guaina di gomma contenente il campione una pressione pari a quella di confinamento target. Affinché si possa creare questa pressione, si utilizzano degli O-rings che sigillano il campione al supporto di base e al piatto superiore di carico, i quali presentano delle scanalature per alloggiare questi O-rings.

5.6 RESISTENZA A ROTTURA PER COMPRESSIONE SEMPLICE (UCS)

I campioni impiegati per il calcolo del modulo resiliente vengono successivamente testati con la pressa statica a compressione semplice. Questo tipo di test è di natura distruttiva in quanto porta il campione a rottura in controllo di deformazione.

La velocità di deformazione (strain rate) è dell'1% al minuto e trattandosi di campioni alti 200 mm, si parla di una velocità di avvicinamento tra le due piastre di carico tra cui è posizionato il campione pari a 2 mm/min.

L'apparato di prova è molto semplice in quanto è composto da due piastre piane circolari di elevata rigidità (tra le quali è posto il campione) fissate alla pressa statica la quale, registra automaticamente e in continuo ogni step di carico, ovvero le coppie di punti (forza applicata al campione; schiacciamento subito del campione).

Le informazioni relative allo schiacciamento del campione sono fornite da un trasduttore che punta sul traverso semovente della pressa. La prova viene stoppata manualmente una volta che si è ottenuto un decadimento importante della resistenza, rispetto al carico di picco.

Dai punti così registrati, è possibile ricavare per ogni campione una curva F-s o σ - ϵ di questo tipo:

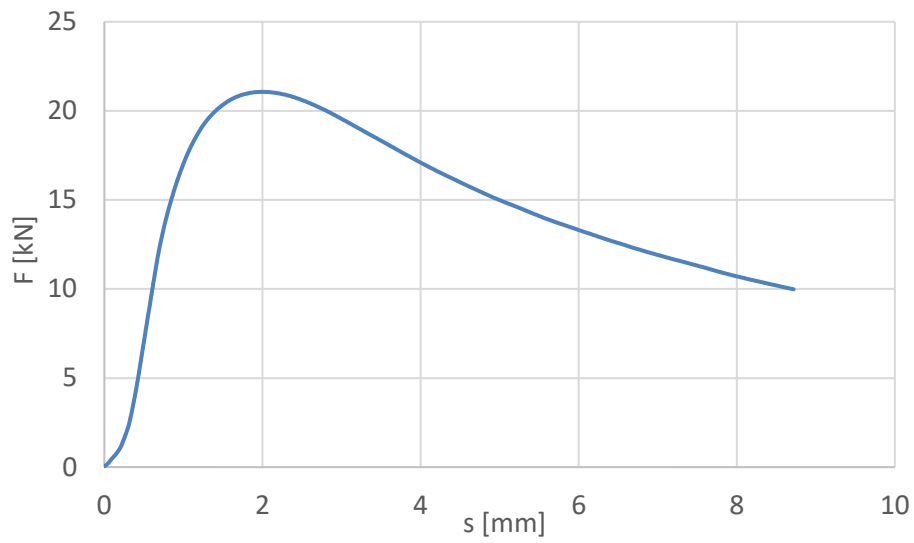


Grafico 5.2: Curva di compressione semplice F-s

Di seguito vengono riportate delle immagini della prova in esecuzione e dei campioni dopo la rottura:



Figura 5.16: Esecuzione prova di compressione semplice; Campione portato a rottura

Dalla seconda immagine si può notare come si manifesti la rottura del campione, con un pronunciato rigonfiamento lungo il fusto, seguendo il fenomeno del barreling. Questo meccanismo di rottura si manifesta in tutti i campioni testati a compressione semplice.

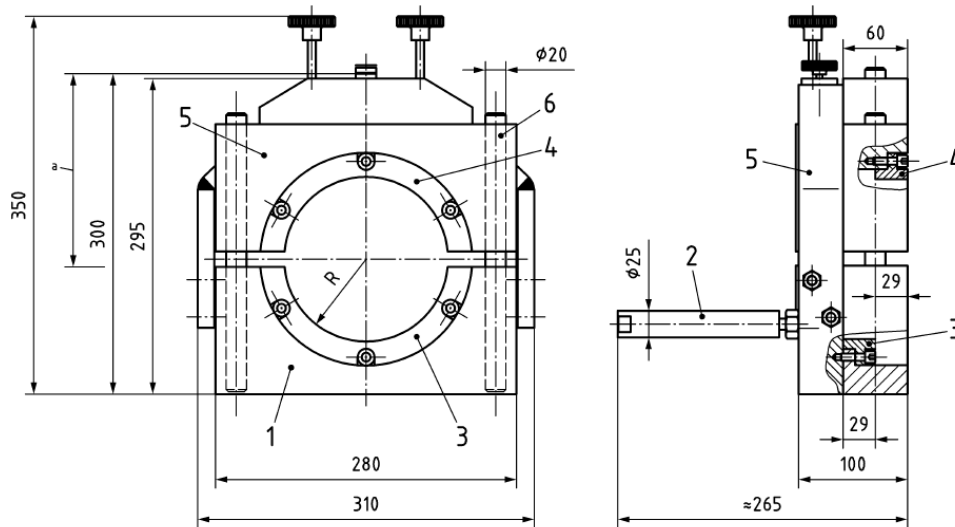
5.7 RESISTENZA A ROTTURA A TAGLIO (LPDS)

La prova viene normalmente svolta per quantificare il grado di adesione tra gli strati di una pavimentazione. Per lo studio in questione si è scelto di usare questo tipo di test per quantificare l'efficacia dell'ingranamento degli inerti e la coesione dei diversi materiali testati sotto un'azione di taglio. I campioni usati sono gli stessi precedentemente sottoposti alla prova di compressione semplice. Poiché la prova UCS ha indotto nei campioni solo una rottura localizzata, è stato possibile eseguire il test di taglio sullo strato dei campioni che non ha manifestato deformazioni permanenti.

Il campione viene posizionato nell'apparato di prova, che successivamente viene collocato sulla pressa statica (già descritta nei precedenti paragrafi).



L'apparato è composto da un corpo di base, che viene poggiato sul piatto di base della pressa. Al corpo di base sono fissati il supporto del campione e l'anello inferiore di taglio. L'anello superiore di taglio è invece fissato al corpo superiore e può subire spostamenti verticali muovendosi lungo due barre di guida.

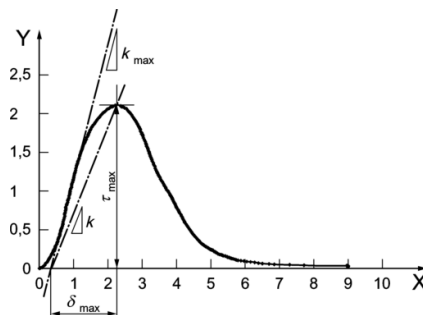


Nella figura sopra riportata si può identificare:

1. Corpo di base
2. Supporto per il campione
3. Anello di taglio inferiore
4. Anello di taglio superiore
5. Corpo superiore
6. Guida

Durante la prova viene applicato uno sforzo di taglio diretto applicando una velocità di spostamento costante pari a 50 ± 2 mm al minuto. Durante la prova si registrano spostamento verticale e forza applicata per ogni step di carico. Raggiunto il massimo valore di forza, si prosegue alla registrazione dei dati di prova fino all'ottenimento di un abbattimento del 50% della forza di picco.

Da queste coppie di punti si può determinare la curva τ - s per ogni campione, da cui è possibile derivare i valori di modulo di rigidezza a taglio massimo e di modulo di rigidezza a taglio come proposto da normativa:



6 ANALISI DEI RISULTATI

Il presente capitolo riporta l'analisi e il commento dei risultati ottenuti per tutte le prove. È strutturato in modo tale da avere per ogni tipo di prova i risultati ottenuti sui diversi materiali testati, ed i relativi commenti.

6.1 CARATTERISTICHE DI ADDENSAMENTO

Il primo step sull'analisi delle caratteristiche di addensamento è relativo al controllo del raggiungimento della VMA target per i campioni compattati.

Come già mostrato in precedenza, la VMA si determina con la seguente formulazioni:

$$VMA = 100 \times \left[1 - \frac{MV \times (1 - \%B)}{MV_{gb}} \right]$$

Dove:

- MV è la massa volumica del campione a 30 giri
- %B è la percentuale di bitume sugli aggregati posta pari al 4.4%
- MV_{gb} è la bulk specific gravity

Poiché non si è a conoscenza del valore di MV_{gb} , lo si approssima con MV_{ge} del campione di solo RAP, che si ricava mediante la seguente formulazione:

$$MV_{ge} = \frac{1 - \%B}{\frac{1}{MMVT} - \frac{\%B}{\rho_B}}$$

Dove:

- %B è la percentuale di bitume sugli aggregati posta pari al 4.4%
- MMVT è la massima massa volumica
- ρ_B è la densità del bitume posta pari a 1.015 [g/cm³]

Di seguito si riportano le tabelle con i risultati:

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVg	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
RAP	1	2,592	4,4	2.777	2,040	29,8
RAP	2	2,592	4,4	2.777	2,043	29,6
RAP	3	2,592	4,4	2.777	2,040	29,8
RAP	4	2,592	4,4	2.777	2,043	29,6
MEDIA	-					29,7

tabella 6.1: VMA campioni di RAP

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVge	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
RAP + ACF_1	1	2,581	4,4	2.777	2,053	29,3
RAP + ACF_1	2	2,581	4,4	2.777	2,047	29,5
RAP + ACF_1	3	2,581	4,4	2.777	2,047	29,5
MEDIA	-					29,4

tabella 6.2: VMA campioni di RAP + ACF_1

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVge	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
RAP + BIT	1	2,512	6,6	2.777	2,075	30,2
RAP + BIT	2	2,512	6,6	2.777	2,089	29,7
RAP + BIT	3	2,512	6,6	2.777	2,076	30,2
MEDIA	-					29,9

tabella 6.3: VMA campioni di RAP + bitume 2.2%

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVge	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
RAP + ACF_1 + BIT 2,2%	1	2,479	6,6	2.777	2,086	29,8
RAP + ACF_1 + BIT 2,2%	2	2,479	6,6	2.777	2,099	29,4
RAP + ACF_1 + BIT 2,2%	3	2,479	6,6	2.777	2,109	29,0
MEDIA	-					29,2

tabella 6.4: VMA campioni di RAP + ACF_1 + bitume 2.2%

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVge	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
BIANCO + bit 4.4%	1	2,592	4,4	2.777	2,048	29,5
BIANCO + bit 6.6%	1	2,586	6,6	2.777	2,082	30,0

tabella 6.5: VMA campioni di bianco

ID	CAMPIONE	MMVT	%B	MVge	MV	VMA
[-]	[-]	[g/cm3]	[%]	[g/cm3]	[g/cm3]	[%]
RAP + ACF_2	1	2,592	4,4	2.777	2,032	30,0
RAP + ACF_2	2	2,592	4,4	2.777	2,045	29,5
MEDIA	-					29,8

tabella 6.6: VMA campioni di RAP + ACF_2

Come si può notare, i valori di VMA dei campioni da 65 mm compattati seguendo il criterio descritto fin ora, risultano ricadere quasi tutti all'interno del target posto pari a $30\% \pm 1\%$.

Le caratteristiche di addensamento di tutti i materiali testati sono state studiate, mediante le curve di compattazione, andando a confrontare:

- il numero di rotazioni della pressa giratoria che sono stati necessari per compattare il campione fino ad altezza target, il quale è un indicatore dell'energia di compattazione trasmessa al campione;
- i coefficienti della retta di lavorabilità.

Come già riportato in precedenza, l'equazione della retta di lavorabilità è la seguente:

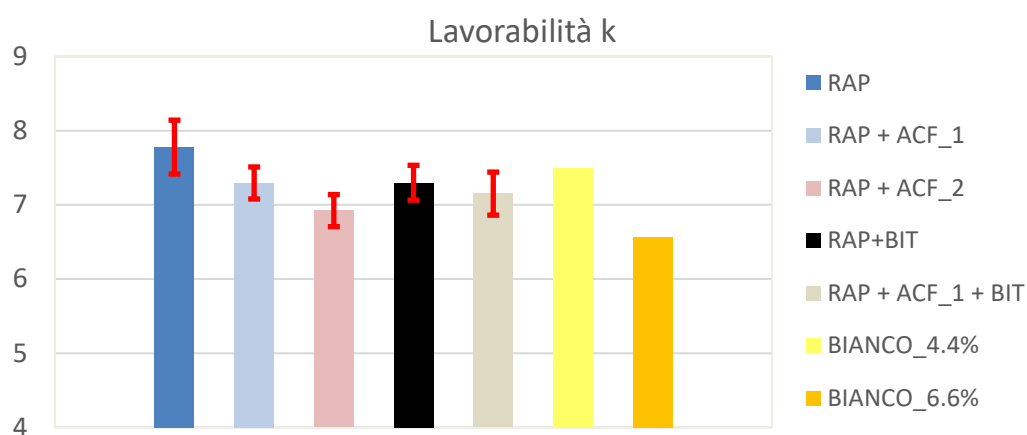
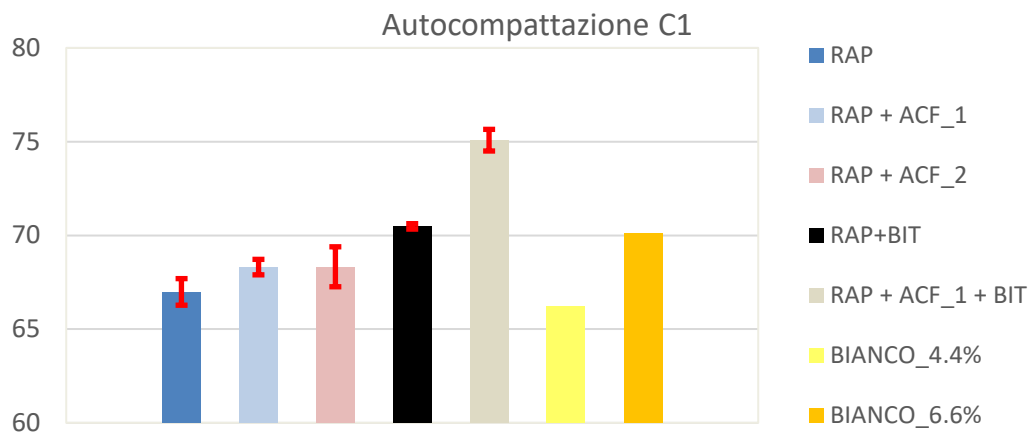
$$C_{(n_G)} = C_1 + k \cdot \log(n_G)$$

Dove:

- L'autoaddensamento C_1 : rappresentato dal valore di addensamento raggiunto al primo giro della pressa, ovvero l'intercetta all'origine nel grafico;
- La lavorabilità K : rappresentata dalla pendenza della curva, viene anche chiamato gradiente di addensamento e rappresenta l'attitudine della miscela ad essere compattata.

Di seguito vengono riportati i valori medi di k e C_1 ottenuti durante la compattazione dei campioni di altezza 65 mm con VMA target ed il numero di giri necessario per raggiungere quell'altezza:

	n° rotazioni	C1	k
RAP	31	66,99	7,78
RAP + ACF_1	28	68,31	7,30
RAP+BIT	27	70,48	7,30
RAP + ACF_1 + BIT	22	75,08	7,15
BIANCO_4.4%	46	66,23	7,49
BIANCO_6.6%	21	70,12	6,57
RAP + ACF_2	26	68,33	6,92



L'auto-addensamento è strettamente connesso alla granulometria della miscela in quanto risulta essere molto sensibile all'angolo di attrito interno della stessa. Questo parametro, a sua volta è funzione della forma degli aggregati.

La lavorabilità, invece, dipende dal contenuto di bitume della miscela ed è associata alla viscosità del legante.

Come è possibile vedere dal grafico dei valori di autocompattazione, l'aggiunta di rejuvenators e/o bitume vergine incrementa il parametro C_1 in quanto riduce l'angolo di attrito interno della miscela.

Per quanto concerne i valori di lavorabilità, si può notare che i campioni di solo RAP presentano un gradiente di addensamento elevato per compensare il basso livello di autocompattazione.

Ragionando in termini di energia di compattazione dei campioni (che risulta essere proporzionale al numero di rotazioni della pressa a taglio giratorio) si può affermare che l'aggiunta di rejuvenators e/o bitume vergine al RAP migliorano la lavorabilità generale della miscela in quanto portano ad una riduzione del numero di rotazioni della pressa

(rispetto al target di 30 giri fissato per il RAP in fase di elaborazione del concetto di sistema modello). Questo risultato rispecchia quanto atteso poiché gli additivi ed il bitume vergine hanno ridotto la viscosità del legante invecchiato contenuto nel RAP. Questo fatto ha dunque avuto ripercussioni positive sull'energia di compattazione.

6.2 MODULO DI RIGIDEZZA (ITSM)

Il test sul modulo di rigidezza è stato eseguito sui campioni di altezza 65 mm, monitorando nel tempo il suo andamento per valutare l'eventuale manifestarsi di effetti tempo-dipendenti. In particolare, la prova è stata ripetuta a 3, 7, 10, 15 e 28 giorni dal termine della compattazione. La temperatura di condizionamento e di prova è stata scelta pari a 20°C.

L'espressione che consente di determinare il modulo di rigidezza è la seguente:

$$E = \left(\frac{P}{\Delta \times h} \right) \times (0.273 + \nu)$$

Dove:

- E: è il modulo di rigidezza;
- P: è il carico di picco del ciclo;
- N: è il modulo di Poisson;
- Δ : è l'ampiezza della deformazione.
- ν : è il modulo di Poisson, posto pari a 0.35

In accordo con la normativa UNI EN 12697-26, il valore di modulo di rigidezza così calcolato deve essere poi corretto con un fattore di carico pari a 0.6 con la seguente formula:

$$E' = E \times (1 - 0.322 \times (\log E - 1.82) \times (0.6 - k))$$

Dove:

- E' : è il modulo corretto;
- k: è il pulse shape factor misurato.

Di seguito si riporta, a titolo di esempio, la determinazione del modulo di rigidezza per uno dei campioni testati. Il calcolo è stato eseguito per ognuno dei campioni come media del valore di modulo di rigidezza sui due diametri.

Campione	Diametro	P	Rise time	Δ	Pulse shape factor	Stiffness Modulus	
						E	E'
[-]	[-]	[kN]	[ms]	[microns]	[%]	[MPa]	[MPa]
1	1°	0,95	124	5	0,683	1812	1882

	2°	0,89	125	4,9	0,685	1732	1800
						1772	1841

tabella 6.7: Modulo di rigidezza RAP + ACF_1, campione 1 dopo 7 giorni di maturazione

Una volta calcolato il modulo di rigidezza medio per ogni campione a 3, 7, 10, 15 e 28 giorni, sono stati determinati i valori medi di modulo di rigidezza corretto (E^l).

Vengono ora mostrati i valori di modulo di rigidezza medi al variare del tempo, per ognuno dei diversi materiali sottoposti ad indagine:

Modulo di rigidezza medio [Mpa]	n° giorni di maturazione				
	3	7	10	15	28
RAP	3944	3661	4047	4085	3663
RAP + ACF_1	1946	1877	1949	1922	1959
RAP + ACF_1 + bit	1671	1511	1785	1745	1691
RAP + ACF_2	1975	2014	1720	1829	2113
RAP + bitume 2,2%	3843	3006	3200	3949	3725
Bianco 4,4%	2462	2943			3250
Bianco 6,6%	1655	1939			2490

tabella 6.8: Moduli di rigidezza corretti al variare del tempo - valori medi

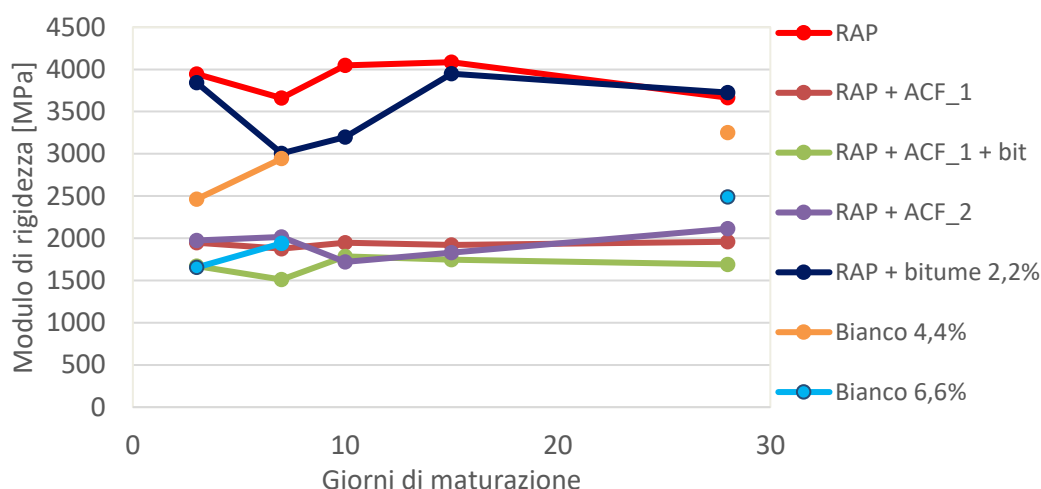


Grafico 6.1: Moduli di rigidezza corretti al variare del tempo - valori medi

I campioni di aggregati ricostituiti non sono stati testati a 10 e 15 giorni per motivi logistici. Poiché non si evidenzia un trend nei valori di modulo di rigidezza, si può affermare che non vi sia un effetto tempo dipendente su questo parametro o, in alternativa, che il test sul modulo di rigidezza non abbia la sensibilità per mostrare eventuali effetti del tempo di maturazione.

Per questo motivo si è optato per mediare i valori di modulo ottenuti nelle prove, al variare del tempo.

Si riporta di seguito un grafico che presenta i valori, mediati sul tempo, di modulo di rigidezza corretto per ogni materiale:

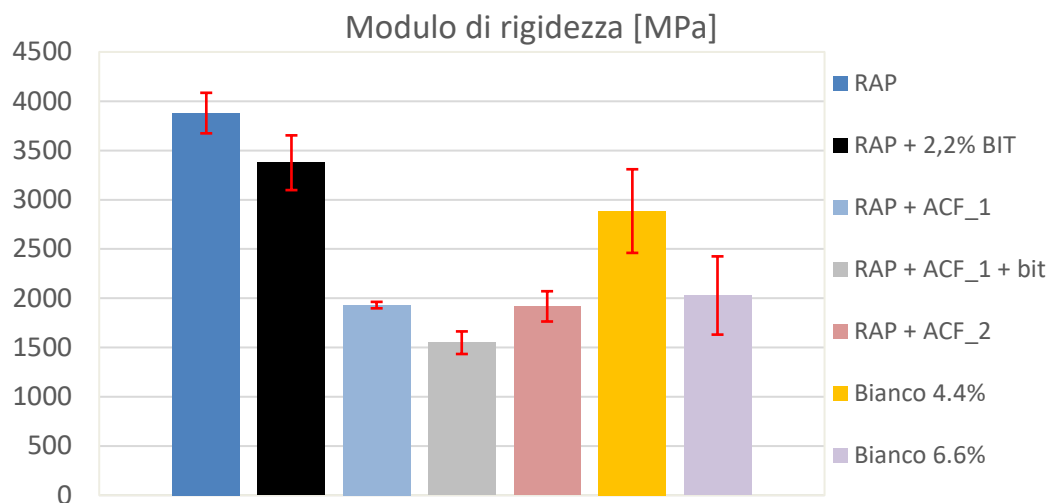


Grafico 6.2: Modulo di rigidezza mediato nel tempo

Osservando il grafico sopra riportato, si può notare che i campioni di solo RAP presentano un'elevata rigidezza, che può essere giustificata dall'elevato grado di invecchiamento del bitume in essi contenuto.

I campioni additivati con i rejuvenators presentano un comportamento molto simile tra loro. Inoltre, si evidenzia una rigidezza ridotta di circa il 50% rispetto ai campioni di solo RAP. Questo fatto mette in luce l'effetto esplicato dagli additivi rigeneranti.

Sui campioni composti da RAP e bitume vergine si manifesta una riduzione di circa il 10/15% rispetto ai campioni di solo RAP legata all'effetto benefico del bitume vergine secondo il meccanismo del "partial blending".

I campioni di aggregati ricostituiti e miscelati con una percentuale di bitume del 4.4% e del 6.6% presentano una rigidezza ridotta rispettivamente di circa il 25% e circa il 50% rispetto ai campioni di solo RAP. Questo fatto rispecchia quanto atteso infatti, il bitume vergine rende questi campioni molto meno rigidi rispetto a quelli di solo RAP.

I campioni composti da RAP additivato col rejuvenator 1 e miscelati anche con bitume vergine in percentuale del 2.2% mostrano la rigidezza minore tra tutti i materiali in quanto la combinazione dell'effetto dell'ACF e del bitume vergine porta ad una riduzione percentuale di rigidezza rispetto al solo RAP di circa il 60%.

6.3 RESISTENZA A ROTTURA PER TRAZIONE INDIRETTA (ITS)

La prova di resistenza a rottura a trazione indiretta consente di determinare il parametro

$$ITS = \frac{2P}{\pi \times D \times H}$$

Dove:

- ITS è la resistenza a trazione indiretta;
- P è il carico di picco;
- D è il diametro del campione;
- H è l'altezza del campione.

Durante la prova vengono registrati i valori di carico e spostamento così da poter tracciare delle curve nel piano F-s.

Col seguente test sono state indagate le proprietà meccaniche dei campioni per poter osservare il comportamento dei diversi materiali oggetto di studio.

Inoltre, per poter mettere in luce eventuali comportamenti tempo dipendenti, sono stati selezionati alcuni campioni per effettuare il test a 3 giorni e la restante parte è stata testata a 28 giorni.

Di seguito vengono riportati i valori di carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni per ogni materiale:

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP	1	10,053	1,669	0,99

tabella 6.9: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + ACF_1	1	5,230	1,809	0,51
RAP + ACF_1	2	5,315	1,696	0,52
MEDIA	-	5,273	1,753	0,52

tabella 6.10: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP + ACF_1

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + ACF_2	1	5,804	1,214	0,57
RAP + ACF_2	2	6,132	1,815	0,60

RAP + ACF_2	3	6,417	1,525	0,63
MEDIA	-	6,118	1,518	0,60

tabella 6.11: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 3 giorni – RAP + ACF_2

Di seguito vengono riportati i valori di carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni per ogni materiale:

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP	1	8,471	1,202	0,83
RAP	2	8,356	1,22	0,82
MEDIA	-	8,41	1,21	0,82

tabella 6.12: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni - RAP

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + ACF_1	1	6,315	1,746	0,62
RAP + ACF_1	2	6,094	1,345	0,60
RAP + ACF_1	3	6,035	1,415	0,59
MEDIA	-	6,15	1,50	0,60

tabella 6.13: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_1

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + bitume 2,2%	1	11,575	2,47	1,14
RAP + bitume 2,2%	2	12,203	2,594	1,20
RAP + bitume 2,2%	3	10,295	2,617	1,01
MEDIA	-	11,36	2,56	1,11

tabella 6.14: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + bitume 2.2%

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + ACF_1 + bit	1	7,46	2,919	0,73
RAP + ACF_1 + bit	3	7,35	2,66	0,72
MEDIA	-	7,40	2,79	0,73

tabella 6.15: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_1 + bitume 2.2%

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]

BIANCO 4.4%	1	8,841	1,73	0,87
BIANCO 6.6%	1	8,455	2,249	0,83

tabella 6.16: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – Campioni ricostituiti

ID	Campione	Max P	s	ITS
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[MPa]
RAP + ACF_2	1	7,511	1,782	0,74

tabella 6.17: Carico massimo, spostamento a rottura ed ITS a 28 giorni – RAP + ACF_2

Poiché i valori di carico massimo, spostamento a rottura e resistenza a trazione indiretta registrati per ogni campione del medesimo materiale sono molto simili, si procede a mediarli per poter confrontare in modo più diretto i diversi materiali al variare del tempo di maturazione.

Di seguito viene riportata la tabella che presenta solo i valori medi di carico massimo, spostamento a rottura ed ITS con i relativi valori di deviazione standard, dopo 3 giorni di maturazione.

ID	Max P	s	ITS	Deviazione standard		
				σ Max P	σ s	σ ITS
[-]	[kN]	[mm]	[MPa]			
RAP	10,053	1,669	0,992			
RAP + ACF_1	5,273	1,753	0,516	0,060	0,080	0,006
RAP + ACF_2	6,118	1,518	0,600	0,307	0,301	0,031

tabella 6.18: Carico massimo, spostamento a rottura e ITS a 3 giorni - Valori medi

Per una più semplice valutazione dei risultati, si riportano i dati appena mostrati sotto forma di istogramma:

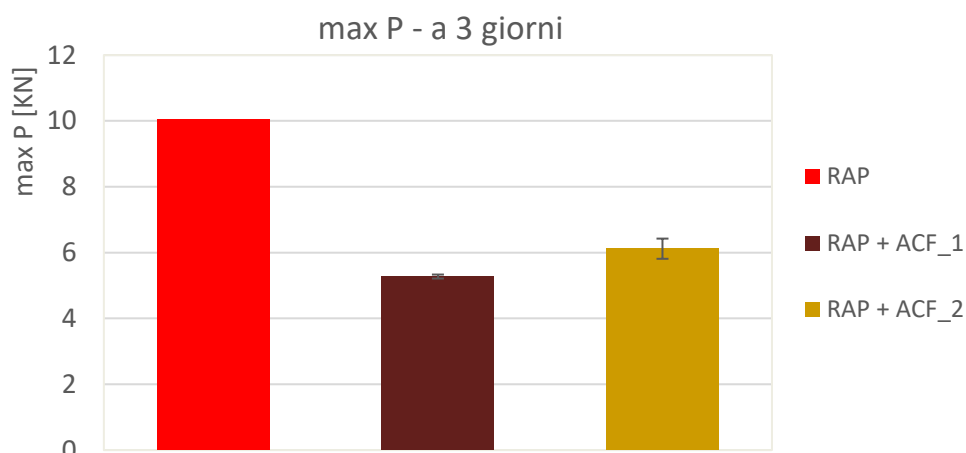


Grafico 6.3: max P - a 3 giorni

Come evidenziato dal grafico, i campioni di solo RAP presentano una maggiore resistenza rispetto ai campioni additivati coi rejuvenators. In particolare, si può affermare che gli ACF si comportino pressoché allo stesso modo, garantendo una riduzione di resistenza circa del 50%.

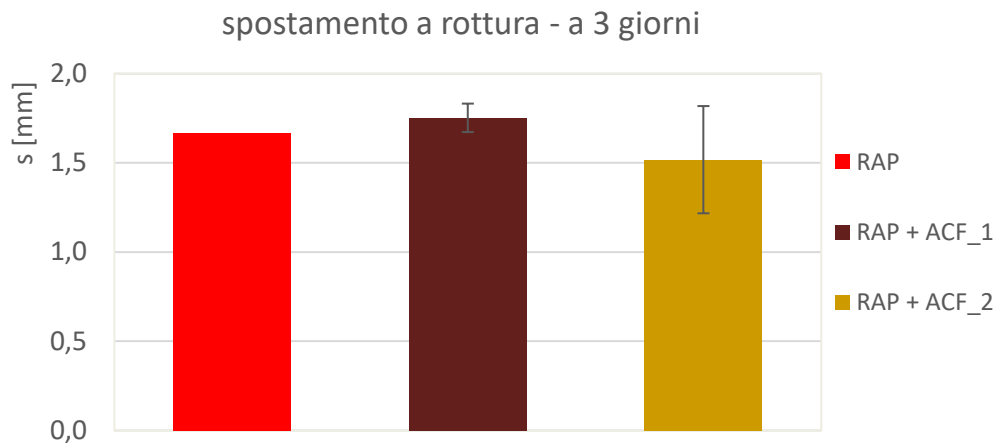


Grafico 6.4: Spostamento a rottura - a 3 giorni

Per quanto concerne i valori di spostamento a rottura, non è possibile apprezzare differenti comportamenti tra i materiali oggetto di prova.

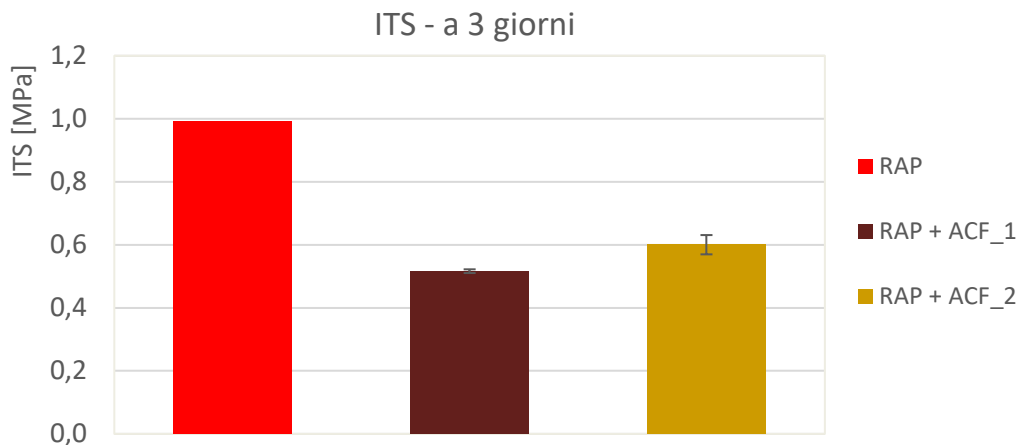


Grafico 6.5: ITS - a 3 giorni

Come evidenziato dal grafico, i campioni di solo RAP presentano una maggiore resistenza rispetto ai campioni additivati coi rejuvenators. In particolare, si può affermare che gli ACF si comportino pressoché allo stesso modo, garantendo una riduzione di resistenza circa del 50%.

Di seguito viene riportata la tabella che presenta solo i valori medi di carico massimo, spostamento a rottura ed ITS con i relativi valori di deviazione standard, dopo 28 giorni di maturazione.

ID	Max P	s	ITS	Deviazione standard		
				σ Max P	σ s	σ ITS
[-]	[kN]	[mm]	[MPa]			
RAP	8,414	1,211	0,825	0,081	0,013	0,009
RAP + ACF_1	6,148	1,502	0,603	0,148	0,214	0,014
RAP + ACF_2	7,511	1,782	0,736			
RAP + bitume 2,2%	11,358	2,560	1,115	0,972	0,079	0,096
RAP + ACF_1 + bit	7,403	2,790	0,727	0,081	0,183	0,007
BIANCO 4.4%	8,841	1,730	0,869			
BIANCO 6.6%	8,455	2,249	0,829			

tabella 6.19: Carico massimo, spostamento a rottura e ITS a 28 giorni - Valori medi

Per una più semplice valutazione dei risultati, si riportano i dati appena mostrati sotto forma di istogramma:

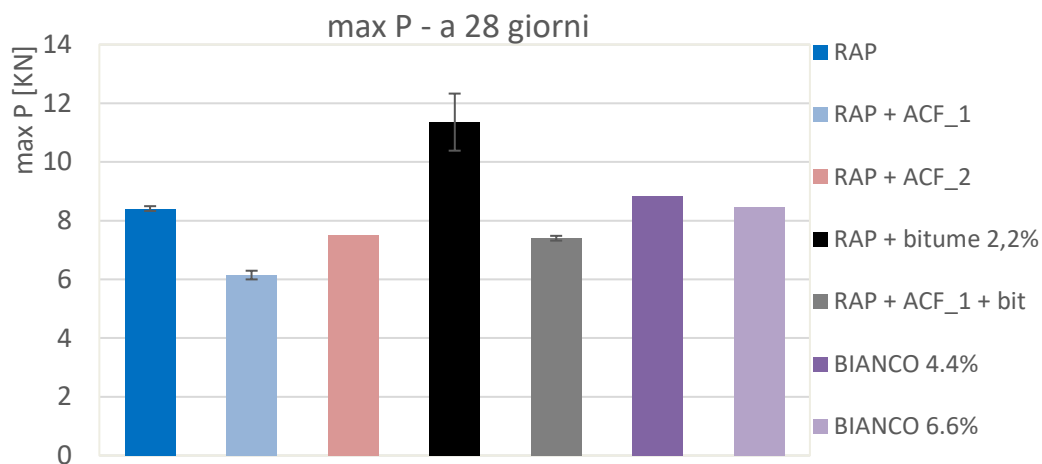


Grafico 6.6: max P - a 28 giorni

Il grafico mette in evidenza una riduzione di resistenza di circa il 30% e circa il 10% rispettivamente per il rejuvenator 1 e 2 rispetto ai campioni di solo RAP.

Confrontando i campioni di aggregati ricostituiti miscelati al bitume vergine (in percentuale del 4.4% e del 6.6%) con i campioni di solo RAP non si evidenzia una variazione significativa di resistenza.

I campioni costituiti da RAP miscelato al 2.2% di bitume vergine rispetto ai campioni di

solo RAP mostra invece un significativo incremento di resistenza pari a circa il 35%. Questo è attribuibile al miglioramento delle prestazioni che si ottiene miscelando del bitume vergine al bitume invecchiato contenuto nel RAP.

I campioni costituiti da RAP additivato con il rejuvenator 1 e il 2.2% di bitume vergine presentano prestazioni leggermente superiori rispetto ai campioni di RAP additivato col rejuvenator 1, ma comunque ridotte rispetto a quelle dei campioni di solo RAP. L'aggiunta di bitume risulta quindi essere benefica nei confronti della resistenza.

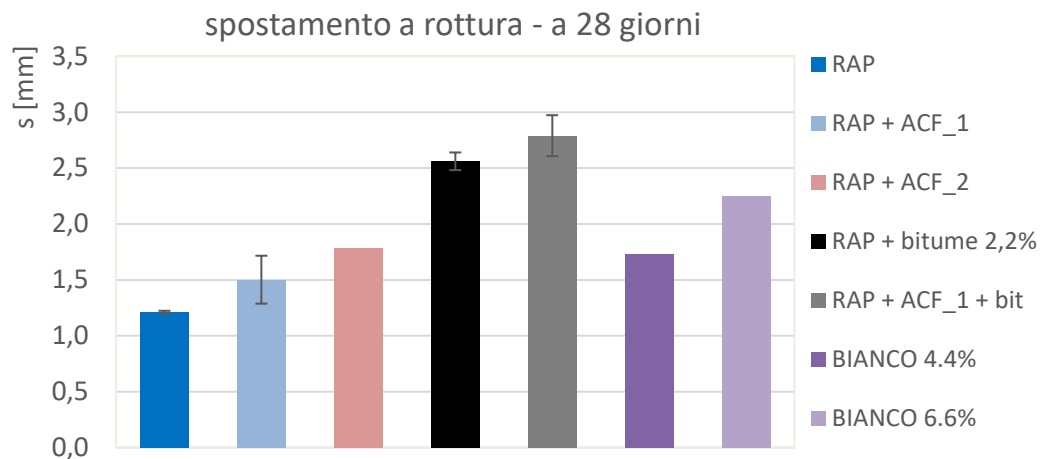


Grafico 6.7: Spostamento a rottura - a 28 giorni

Dal grafico si evince che l'aggiunta di rejuvenators e/o bitume comporta in generale un incremento dello spostamento a rottura e dunque un miglioramento delle prestazioni dei materiali.

In particolare si può affermare che:

- I campioni di RAP e bitume vergine presentano spostamento a rottura doppio rispetto a quelli di solo RAP;
- I campioni di RAP additivato coi rejuvenators 1 e 2 presentano spostamento a rottura incrementati rispettivamente del 25% e del 50%. Questo effetto è legato alla riduzione di viscosità operata dagli ACF;
- I campioni di RAP additivato col rejuvenator 1 e miscelato al bitume vergine presentano spostamento a rottura incrementato di circa il 130% rispetto ai campioni di solo RAP. Questo risultato è molto significativo in quanto mostra come la combinazione di ACF e bitume vergine migliorino notevolmente il comportamento deformativo del materiale.

Per quanto concerne i campioni di aggregati ricostituiti e miscelati con bitume in percentuale del 4.4% e 6.6% si può affermare che si ha un miglioramento delle prestazioni rispetto a quanto avviene con i campioni di solo RAP. Questo risultato rispecchia quanto atteso poiché il bitume vergine risulta essere meno rigido e più elastico rispetto a quello invecchiato del RAP e quindi garantisce uno spostamento a rottura più elevato. L'incremento di spostamento a rottura per i campioni di aggregati ricostituiti e bitume vergine risulta essere proporzionale alla percentuale di bitume in essi contenuta.

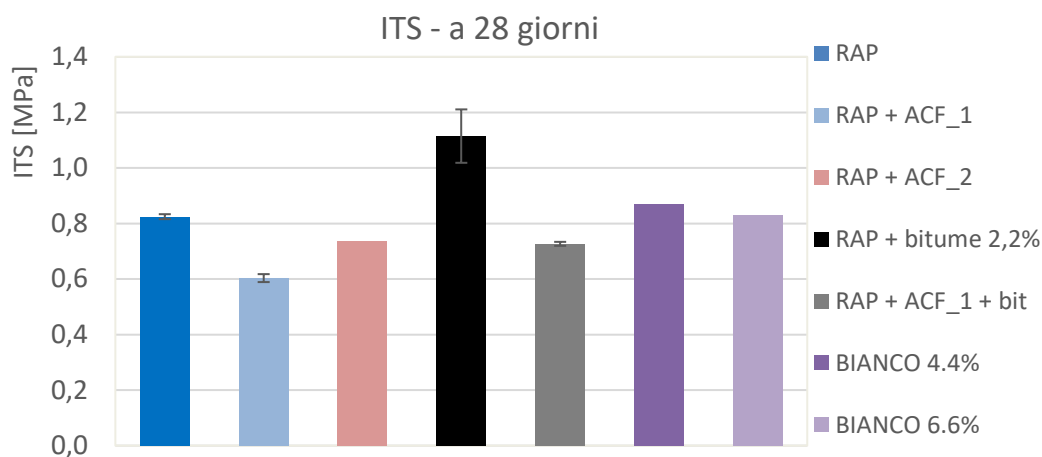


Grafico 6.8: ITS - a 28 giorni

Il grafico mette in evidenza una riduzione di resistenza di circa il 30% e circa il 10% rispettivamente per il rejuvenator 1 e 2 rispetto ai campioni di solo RAP.

Confrontando i campioni di aggregati ricostituiti miscelati al bitume vergine (in percentuale del 4.4% e del 6.6%) con i campioni di solo RAP non si evidenzia una variazione significativa di resistenza.

I campioni costituiti da RAP miscelato al 2.2% di bitume vergine rispetto ai campioni di solo RAP mostra invece un significativo incremento di resistenza pari a circa il 35%. Questo è attribuibile al miglioramento delle prestazioni che si ottiene miscelando del bitume vergine al bitume invecchiato contenuto nel RAP.

I campioni costituiti da RAP additivato con il rejuvenator 1 e il 2.2% di bitume vergine presentano prestazioni leggermente superiori rispetto ai campioni di RAP additivato col rejuvenator 1, ma comunque ridotte rispetto a quelle dei campioni di solo RAP. L'aggiunta di bitume risulta quindi essere benefica nei confronti della resistenza.

Si riportano ora solo i valori dei campioni dei quali è stato effettuato il test sia a 3 che a 28 giorni per mettere in luce eventuali comportamenti tempo dipendenti.

Le tre colonne di sinistra si riferiscono ai test eseguiti a 3 giorni mentre quelle di destra fanno riferimento ai test eseguiti a 28 giorni.

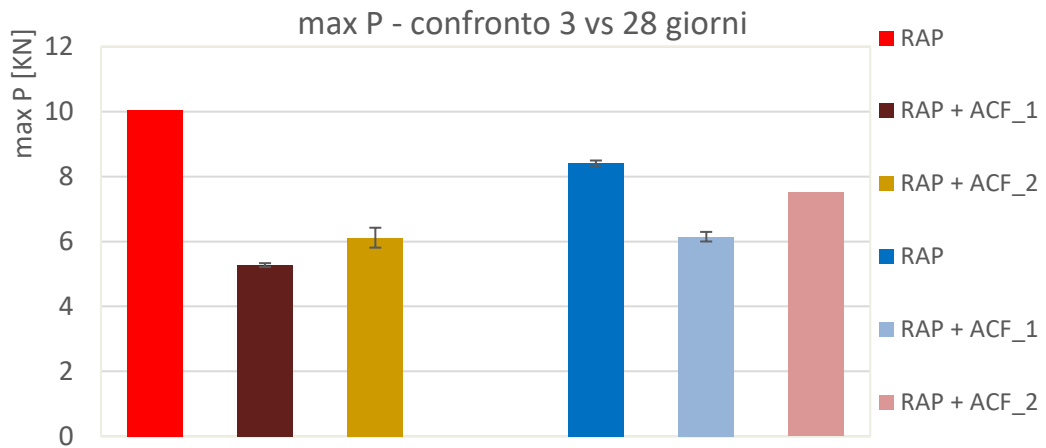


Grafico 6.9: max P - confronto 3 vs 28 giorni

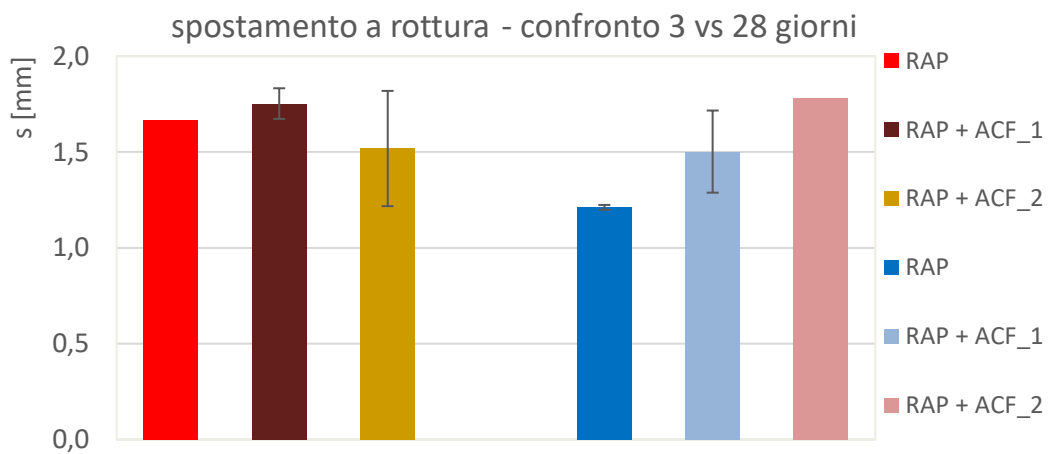


Grafico 6.10: Spostamento a rottura - confronto 3 vs 28 giorni

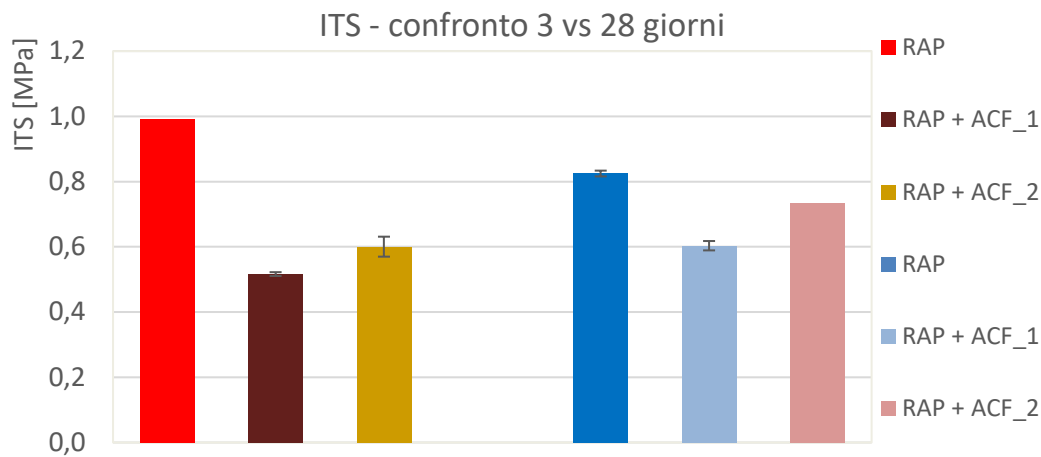
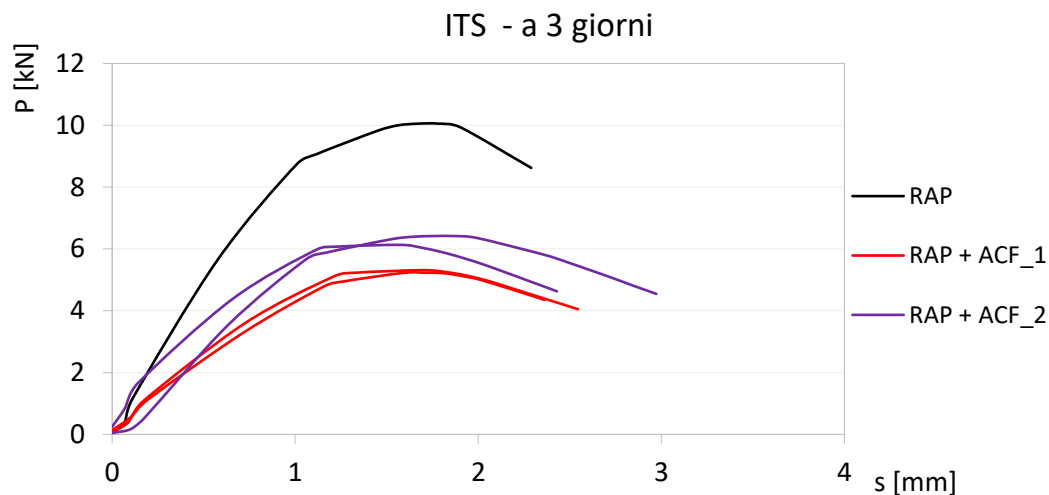


Grafico 6.11: ITS - confronto 3 vs 28 giorni

Successivamente all'analisi dei valori di carico massimo, spostamento a rottura ed ITS, è stata eseguita un'analisi sulle curve F-s di rottura per trazione indiretta.

Di seguito viene riportato il grafico che mostra le curve per i campioni testati dopo 3 giorni di maturazione:



Osservando il grafico è possibile fare dei commenti relativi alla pendenza del tratto di carico delle curve per ogni materiale.

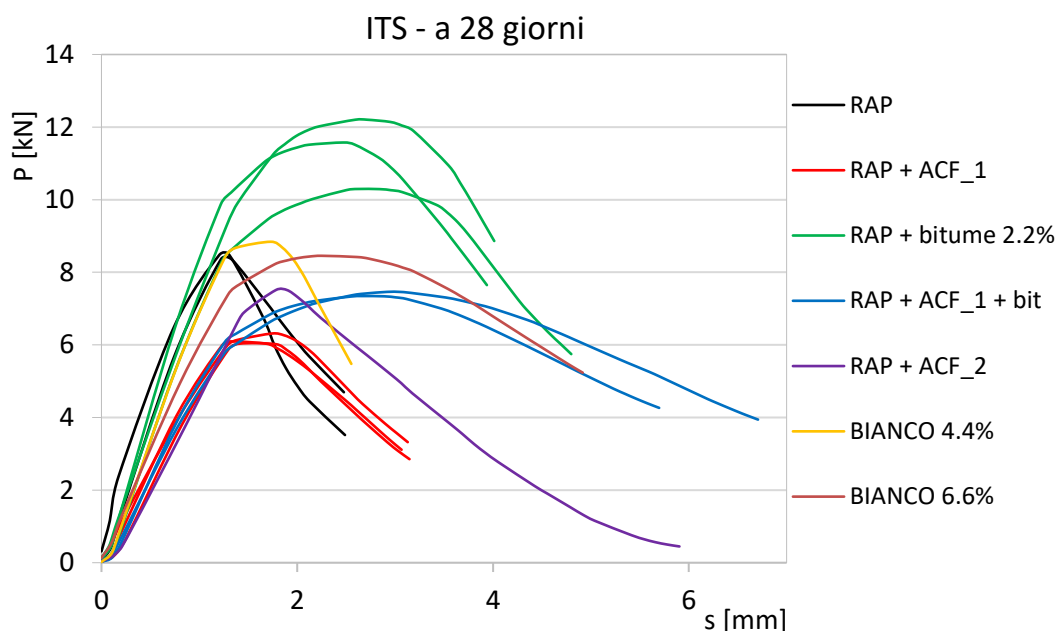
Per quanto riguarda i campioni additivati con gli ACF si può affermare che le due differenti ripetizioni per ognuno dei materiali presentano andamento coerente tra loro. Confrontando i diversi materiali si mette in luce un differente comportamento tra il campione di solo RAP rispetto a quelli contenenti gli additivi:

- La curva relativa al campione di solo RAP presenta una pendenza del tratto iniziale superiore rispetto a quelle dei campioni additivati. Questo si traduce in una

maggior rigidità del campione di solo RAP, coerentemente con quanto detto fin ora;

- Il tratto discendente della curva di solo RAP manifesta una maggior fragilità di comportamento rispetto ai campioni miscelati con gli ACF;
- Come già esposto in precedenza, il campione di solo RAP presenta un valore di carico a rottura superiore a quello dei campioni additivati.

Di seguito viene riportato il grafico che mostra le curve per i campioni testati dopo 28 giorni di maturazione:



Anche in questo caso è possibile individuare una minore pendenza delle curve relative ai campioni di RAP additivato con gli ACF rispetto a quelli di solo RAP. Questo mette ancora una volta in luce la maggior rigidità e fragilità dei campioni di solo RAP.

Inoltre, si può osservare una riduzione di resistenza dei campioni di RAP additivato con i rejuvenators rispetto a quelli di solo RAP, coerentemente con quanto affermato in precedenza.

È interessante osservare come i campioni di RAP miscelato col 2.2% di bitume vergine presentino quasi la stessa pendenza dei campioni di solo RAP ma manifestino un valore di carico a rottura ed una duttilità nettamente incrementata.

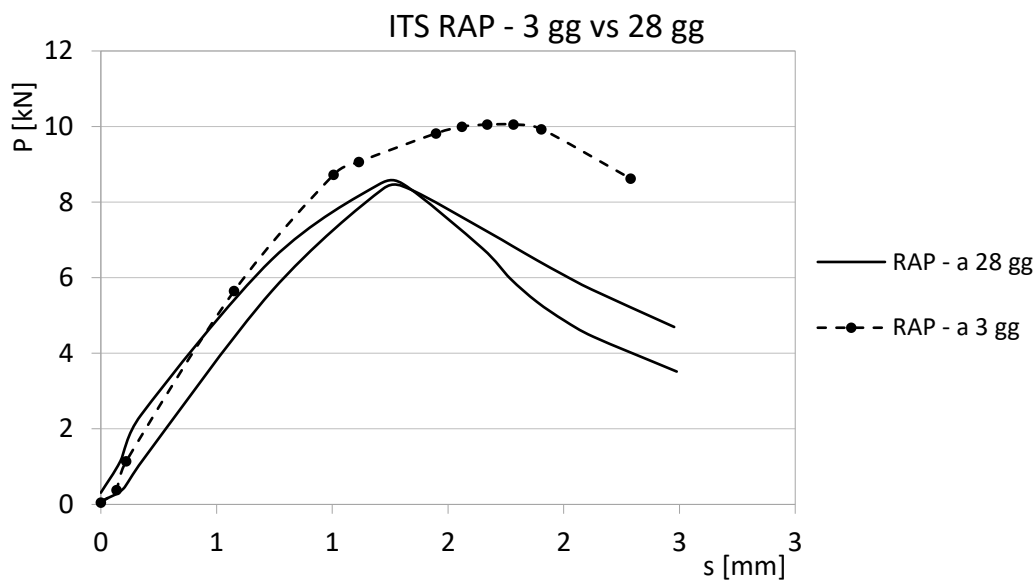
L'aggiunta dell'ACF 1 e di bitume vergine, come si evince dal grafico, apporta un notevole incremento di duttilità, mantenendo una pendenza del tratto iniziale molto simile a quella dei campioni di RAP miscelato ai rejuvenators.

Per quanto riguarda il campione di aggregati ricostituiti e miscelati con bitume al 4.4% si osserva che la pendenza del tratto iniziale è del tutto simile a quella dei campioni di solo RAP, ma presenta un valore di carico di picco di poco più alto e duttilità leggermente migliorata.

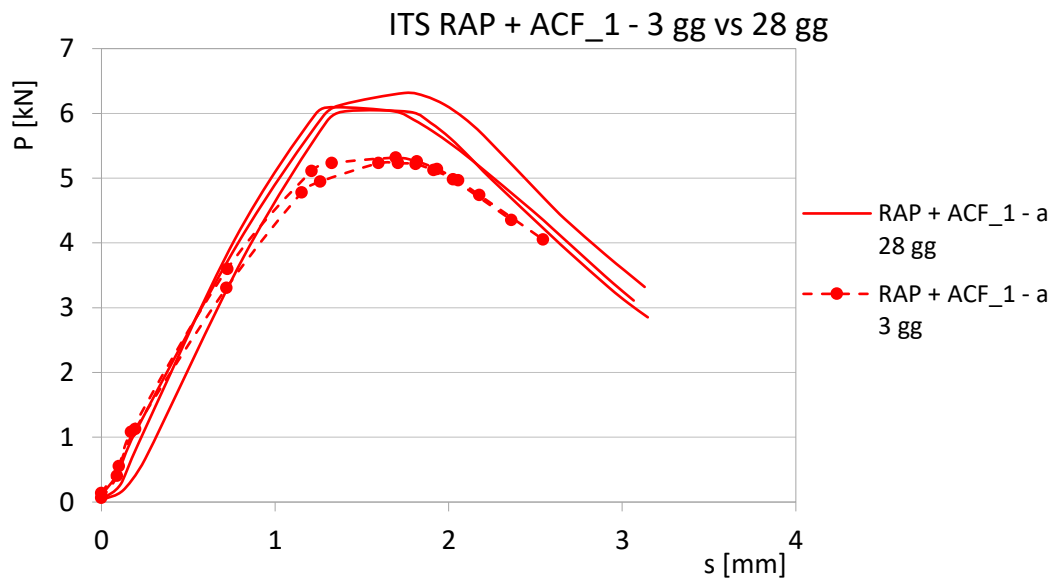
Il campione di aggregati ricostituiti e miscelati al 6.6% di bitume presenta un'elevata duttilità ed un comportamento, nel primo tratto della curva di carico, intermedio tra i campioni di

- RAP e RAP miscelato al 2.2% di bitume;
- RAP additivato con gli ACF e RAP additivato con ACF 1 e bitume vergine.

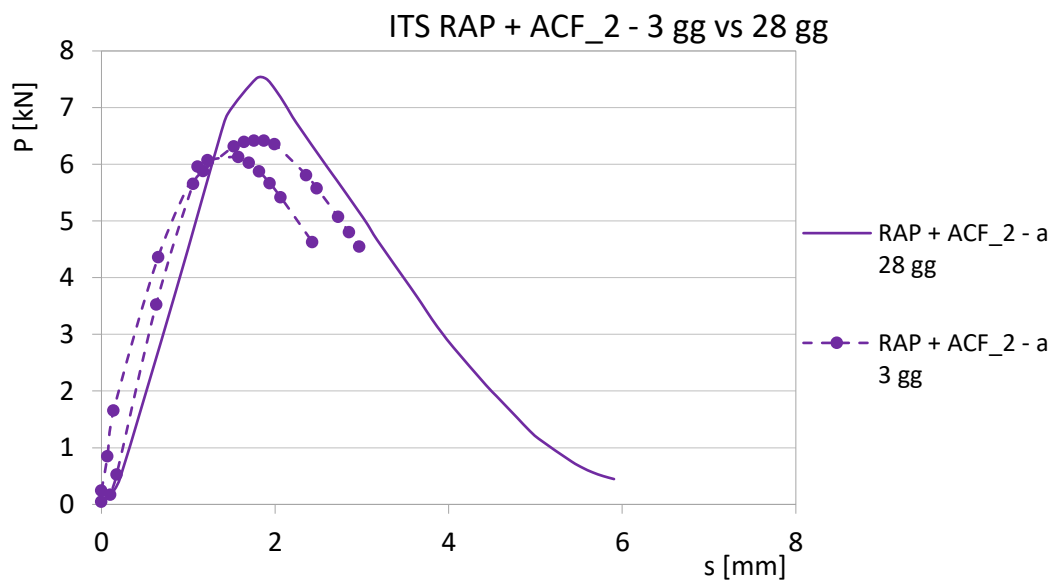
Inoltre, sono state diagrammate le curve relative del solo RAP e dei campioni di RAP additivato coi rejuvenators relative ai test a 3 e 28 giorni per poter osservare eventuali effetti tempo dipendenti:



Non si manifesta un apprezzabile differenza tra le curve nel primo tratto di carico ma dal punto di vista della fragilità si nota un migliore comportamento per il campione testato dopo 3 giorni di maturazione rispetto a quelli testati a 28 giorni. Anche il carico di picco e lo spostamento a rottura mostrano valori più elevati a 3 giorni, mettendo in luce un infragilimento del materiale col tempo di maturazione.



Non si manifesta un apprezzabile differenza tra le curve a 3 e 28 giorni né nel primo tratto di carico, né in termini di fragilità dopo il punto di rottura. Si può notare invece un incremento di prestazioni al crescere del tempo di maturazione.



Trascurando il primo tratto di assestamento dei campioni, non si manifesta un apprezzabile differenza tra le curve a 3 e 28 giorni né nel primo tratto di carico, né in termini di fragilità dopo il punto di rottura. Si può notare invece un incremento di prestazioni al crescere del tempo di maturazione.

Questo comportamento è del tutto simile a quello manifestato anche dal rejuvenator 1, a conferma del fatto che il comportamento dei due ACF soggetti ai test garantiscono sotto certi aspetti prestazioni simili.

Un altro tipo di analisi effettuato sulle curve di resistenza a trazione indiretta è quella relativa al parametro Ductility Toughness (DT) definito nel seguente modo:

$$DT = \frac{A_{s_{80}} - A_p}{s_{80} - s_p}$$

- A_p è l'area sottesa alla curva fino alla forza di picco;
- $A_{s_{80}}$ è l'area sottesa alla curva fino ad un decadimento di resistenza pari al 20% della forza di picco;
- s_{80} è lo spostamento in corrispondenza di un decadimento di resistenza pari al 20%;
- s_p è lo spostamento in corrispondenza del picco di forza.

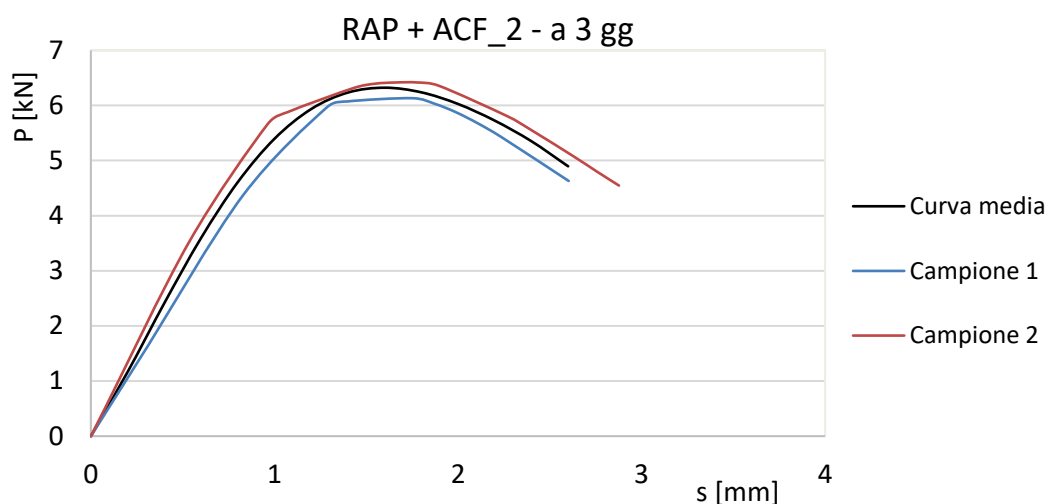
Tale parametro è stato elaborato per valutare quantitativamente l'efficacia dei rejuvenators e del bitume vergine sui campioni contenenti 100% RAP. Confrontando il DT dei campioni composti da RAP ed additivi/bitume con quello dei campioni di RAP si può dunque valutare in maniera oggettiva il comportamento dei diversi materiali.

Il parametro DT è proporzionale alle caratteristiche di duttilità del campione.

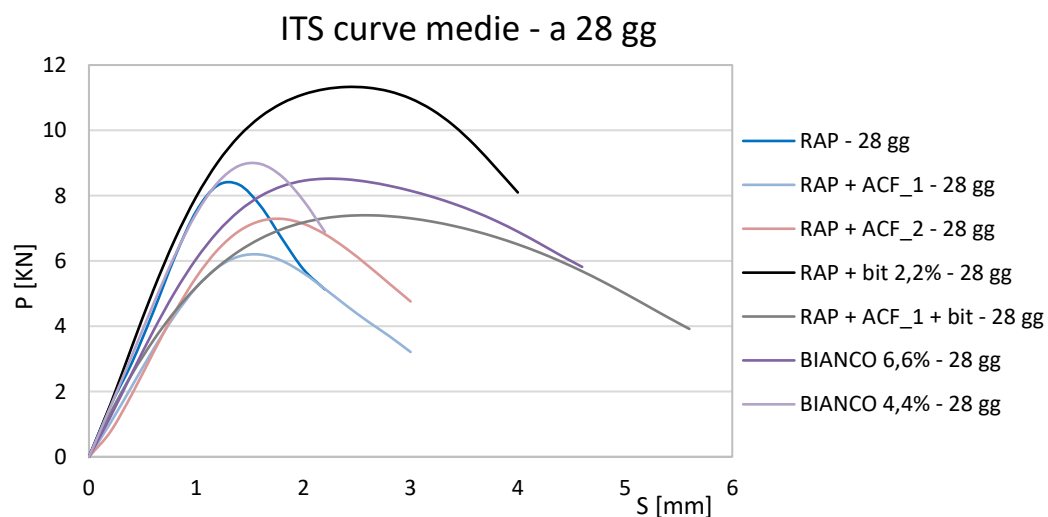
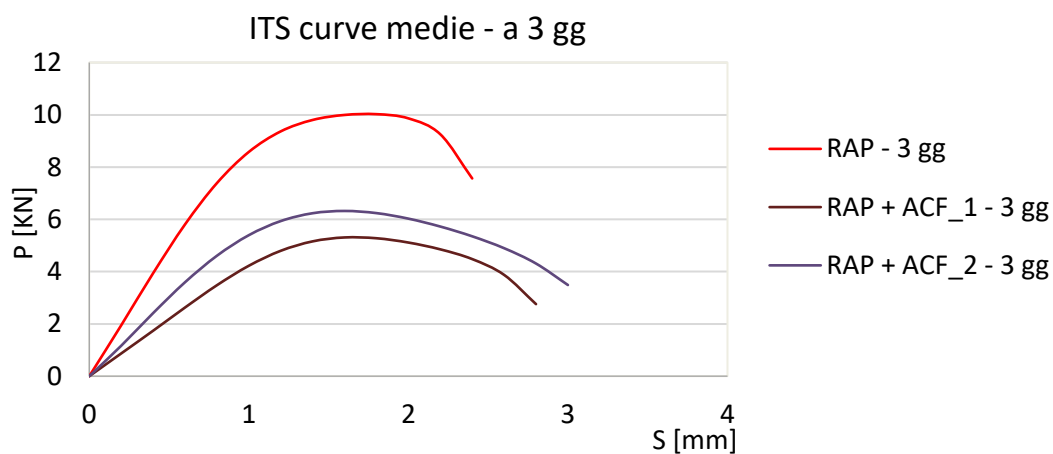
Come si può vedere dai grafici F-s rilevati, le curve del medesimo materiale, con stesso tempo di maturazione, presentano un comportamento molto simile tra loro, perciò è stata determinata la loro curva media col seguente metodo:

- Per ognuna delle curve è stata ricavato un polinomio interpolante di 6° grado;
- È stata fatta la media dei coefficienti omologhi dei polinomi;
- È stata tracciata la curva media assieme alle curve rilevate per valutare visivamente la correttezza del metodo.

A titolo di esempio si riporta la rappresentazione grafica della curva media del materiale RAP + ACF_2 dopo 3 giorni di maturazione, messa a confronto con le curve rilevate:

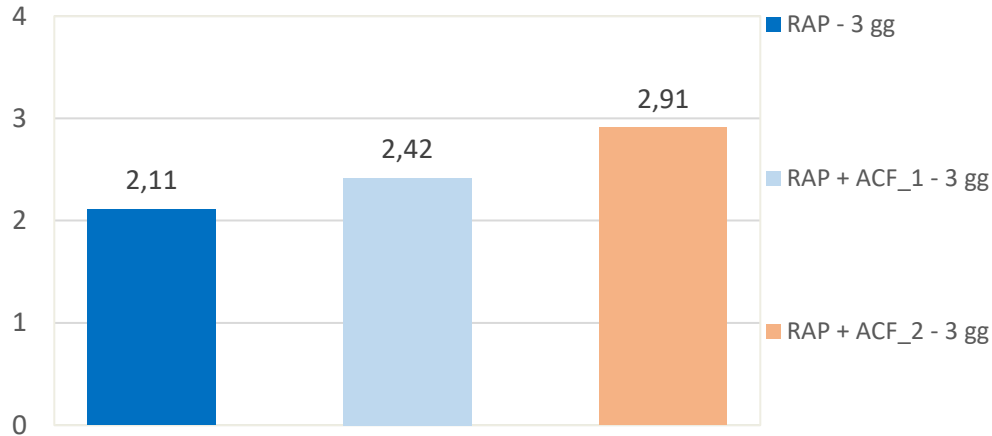


Le curve medie così determinate per tutti i materiali, sono riportate di seguito:



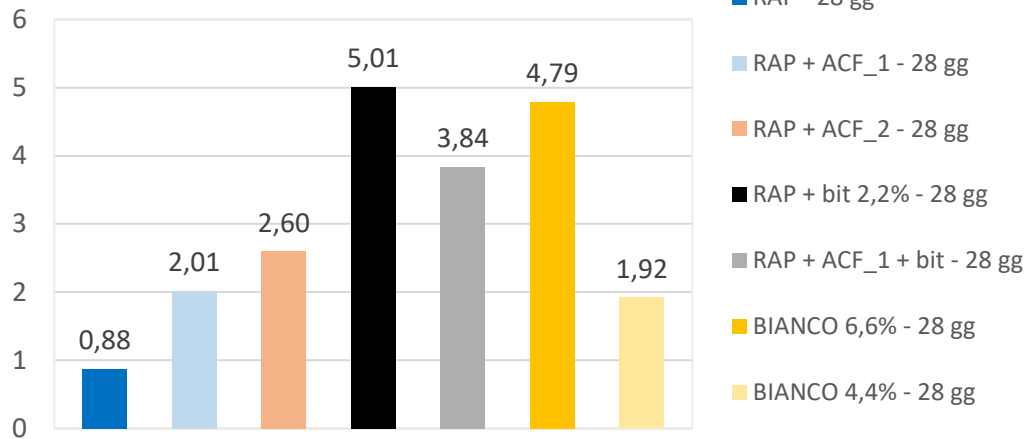
Facendo riferimento alla formulazione del Ductility Toughness sopra riportata, si diagrammano i valori ottenuti:

Ductility Toughness - a 3 gg



Il grafico appena riportato mostra come l'aggiunta dei rejuvenators al RAP incrementi la duttilità dei campioni anche dopo soli 3 giorni di maturazione.

Ductility Toughness - a 28 gg



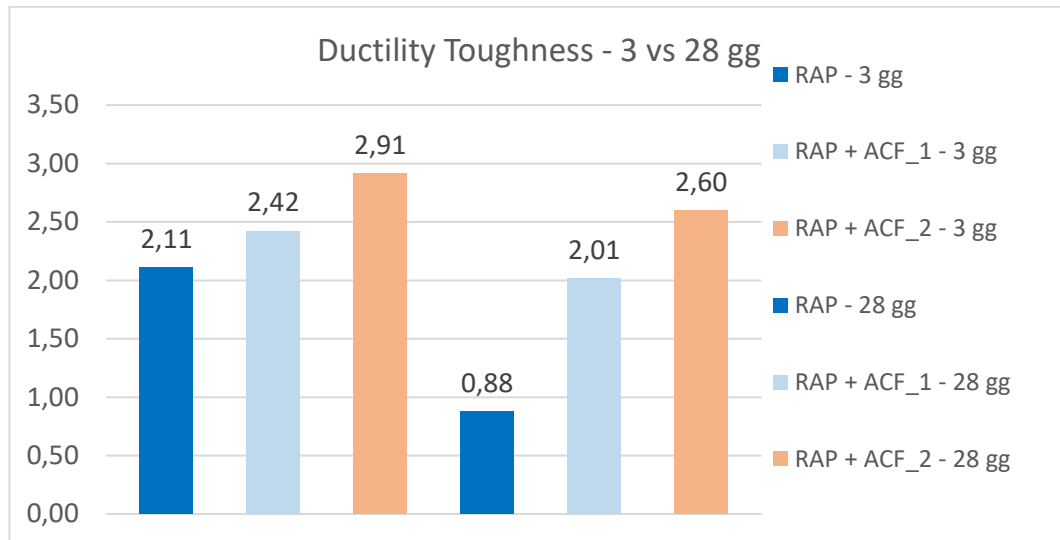
Il grafico mostra, confermando quanto detto in precedenza per le curve F-s, come l'uso degli additivi rigeneranti e/o l'aggiunta di bitume vergine, anche in piccola percentuale, incrementi la duttilità degli aggregati nella fase successiva al raggiungimento del carico di picco.

In particolare, i campioni che mostrano la maggiore duttilità sono quelli composti da RAP additivato con l'ACF 1 e miscelato al bitume vergine, quelli composti da RAP miscelato al bitume vergine e quelli di aggregati ricostituiti e miscelati con il 6.6% di bitume vergine.

In generale, anche a 28 giorni, i campioni additivati con i rejuvenators manifestano maggiore duttilità rispetto a quelli composti da solo RAP, che si confermano i più fragili.

Si riportano ora solo i valori dei campioni dei quali è stato effettuato il test sia a 3 che a 28 giorni per mettere in luce eventuali comportamenti tempo dipendenti.

Le tre colonne di sinistra si riferiscono ai test eseguiti a 3 giorni mentre quelle di destra fanno riferimento ai test eseguiti a 28 giorni.



Dal grafico sopra riportato, si può notare come, in generale, i campioni di RAP ed ACF mostrino una maggiore duttilità rispetto a quelli di solo RAP, testati dopo il medesimo numero di giorni di maturazione.

Guardando invece ai fenomeni tempo dipendenti, si individua un decremento del parametro DT passando dai 3 ai 28 giorni di condizionamento. In particolare, i campioni di solo RAP mostrano un decremento maggiore rispetto a quelli in cui è presente anche l'additivo, mettendo in luce l'effetto benefico degli ACF.

6.4 MODULO RESILIENTE

Le prove di modulo resiliente sono state effettuate ad un giorno dalla compattazione dei campioni, i quali sono stati preventivamente condizionati a 20 °C dal momento della compattazione fino all'esecuzione del test.

La temperatura di prova è 20 °C ed il protocollo adottato è quello per base/subbase.

I materiali sottoposti al test presentano la seguente composizione:

- RAP
- RAP + ACF_1
- RAP + ACF_2
- RAP + bit

Di seguito si riportano i valori di modulo resiliente per i diversi materiali:

SEQUENZA DI CARICO	θ	Mr misurato [Mpa]			
		campione 1	campione 2	campione 3	campione 4
[-]	[MPa]				
1	0,06	366	266	503	255
2	0,08	381	359	562	368
3	0,10	402	456	562	475
4	0,10	389	344	588	343
5	0,13	423	471	585	498
6	0,16	476	599	606	605
7	0,20	451	492	623	535
8	0,26	547	687	664	707
9	0,32	629	801	721	780
10	0,27	466	506	649	533
11	0,30	521	635	672	650
12	0,39	656	815	734	806
13	0,37	536	647	691	669
14	0,40	583	730	674	738
15	0,52	745	906	812	882

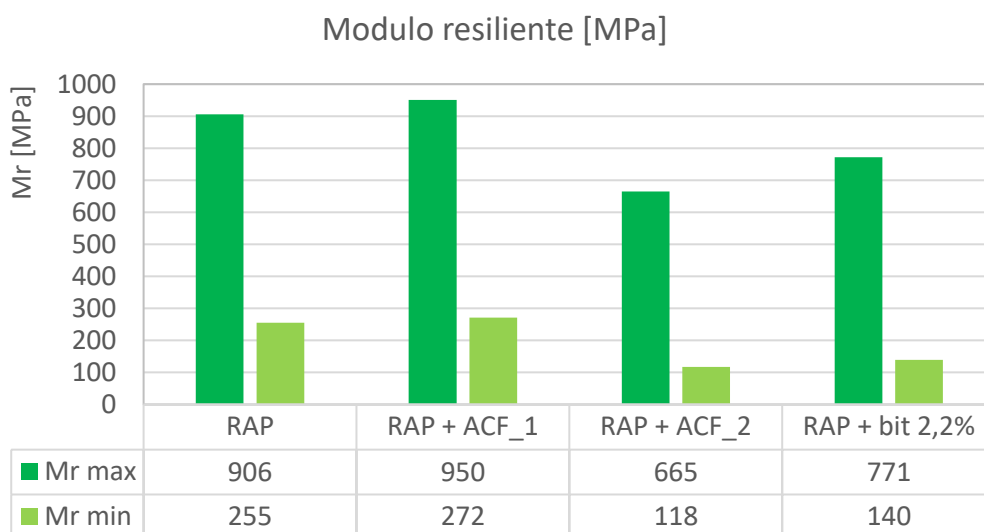
SEQUENZA DI CARICO	θ	RAP + ACF_1 - Mr misurato [Mpa]	
		campione 1	campione 2
[-]	[MPa]		
1	0,06	310	272
2	0,08	430	357
3	0,10	540	434
4	0,10	403	330
5	0,13	549	439
6	0,16	652	569
7	0,20	589	463
8	0,26	738	665
9	0,32	792	789
10	0,27	612	476
11	0,30	716	608
12	0,39	813	797
13	0,37	728	625
14	0,40	776	696
15	0,52	867	888

SEQUENZA DI CARICO	θ	RAP + ACF_2 - Mr misurato [Mpa]	
		campione 1	campione 2
[-]	[MPa]		

1	0,06	118	188
2	0,08	208	217
3	0,09	292	253
4	0,10	187	251
5	0,13	299	285
6	0,16	386	335
7	0,20	311	343
8	0,26	468	416
9	0,32	538	509
10	0,27	322	369
11	0,30	420	400
12	0,39	580	533
13	0,37	430	415
14	0,40	499	458
15	0,52	665	628

SEQUENZA DI CARICO	θ	RAP + bit 2,2% - Mr misurato [Mpa]	
		campione 1	campione 2
[-]	[MPa]		
1	0,06	140	149
2	0,08	231	280
3	0,10	296	325
4	0,10	233	297
5	0,13	317	373
6	0,16	399	431
7	0,20	353	466
8	0,26	499	568
9	0,32	594	629
10	0,27	388	533
11	0,30	481	597
12	0,39	656	688
13	0,37	525	634
14	0,40	606	687
15	0,52	771	766

Per una più semplice interpretazione dei dati, si riporta di seguito la tabella coi soli valori di modulo resiliente massimo e minimo misurato, per ogni tipologia di materiale oggetto di studio:



Al termine della prova è stato eseguito il Quick Shear Test sui campioni ma, anche nelle condizioni più severe di prova (pressione di confinamento nulla), non si è giunti a rottura per l'elevata coesione degli stessi. Per questo motivo, i campioni da 200 mm sono poi stati testati a rottura per compressione semplice (che è assimilabile ad un Quick Shear Test a tensione di confinamento nulla).

6.5 RESISTENZA A ROTTURA PER COMPRESSIONE SEMPLICE (UCS)

Come anticipato nel paragrafo precedente, i campioni sottoposti al test di modulo di rigidità, sono poi stati testati a compressione semplice con strain rate pari all'1%/min (2 mm/min).

Con la prova UCS è stato possibile tracciare le curve F-s e σ - ϵ per ogni materiale in modo tale da poterle confrontare le caratteristiche meccaniche.

Raggiunto il massimo valore di forza, si prosegue alla registrazione dei dati di prova fino all'ottenimento di un abbattimento del 50% della forza di picco.

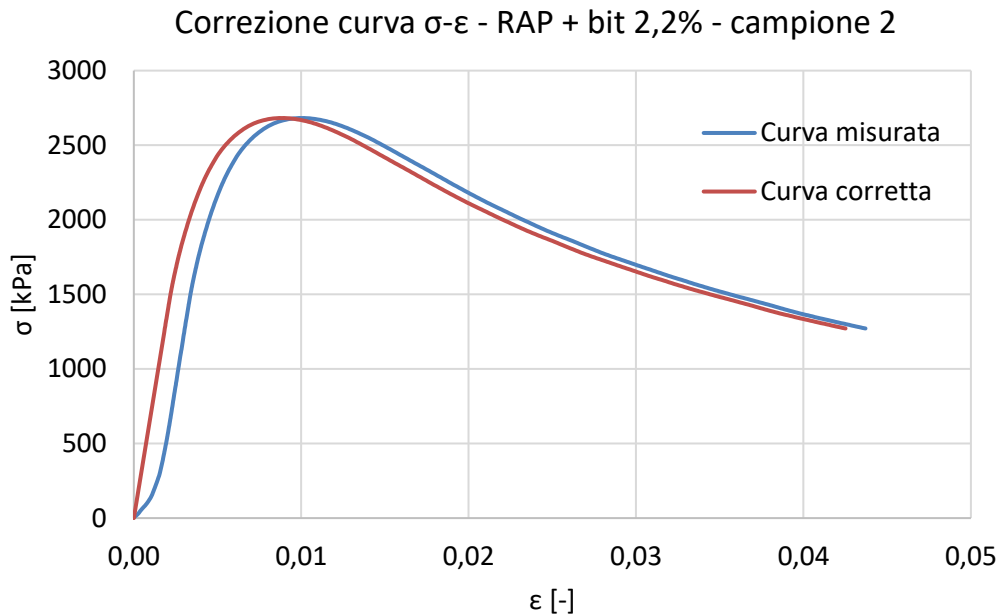
In questo modo è stato possibile poter tracciare il ramo discendente della curva di compressione per definire il comportamento dei campioni nel tratto plastico.

L'assestamento iniziale dei campioni durante la prova, determina nel grafico della curva sperimentale σ - ϵ un andamento non lineare, il quale necessita di essere corretto mediante la linearizzazione del primo tratto di curva.

Dal punto di vista operativo, la correzione della curva è stata effettuata andando a ricercare graficamente il tratto lineare della fase di carico, prolungando la tangente alla curva nel tratto lineare e traslandola verso sinistra per far coincidere il punto iniziale con

l'origine degli assi.

Di seguito viene mostrata a titolo di esempio una curva sperimentale σ - ϵ e la sua versione corretta:

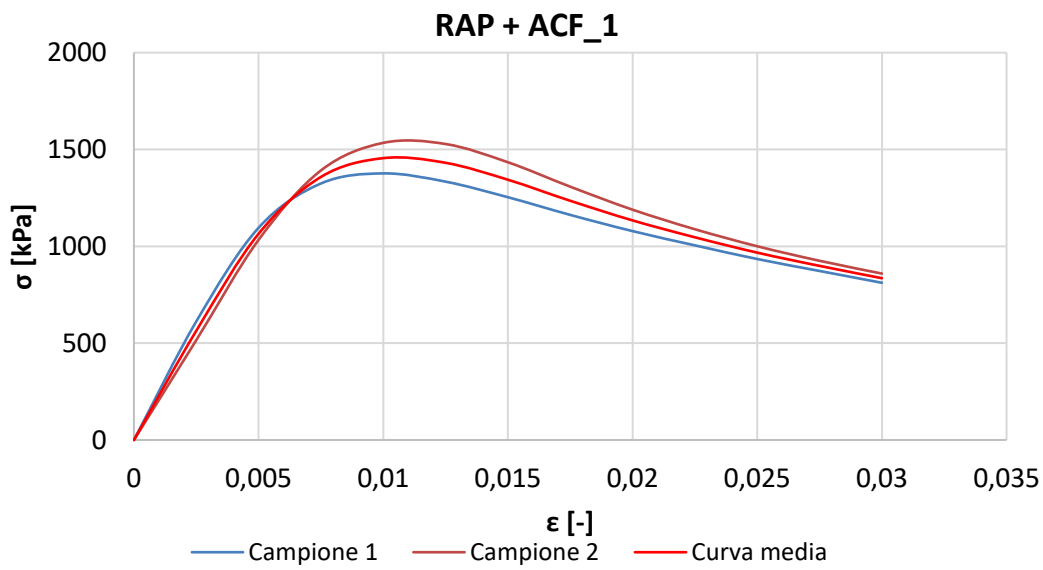
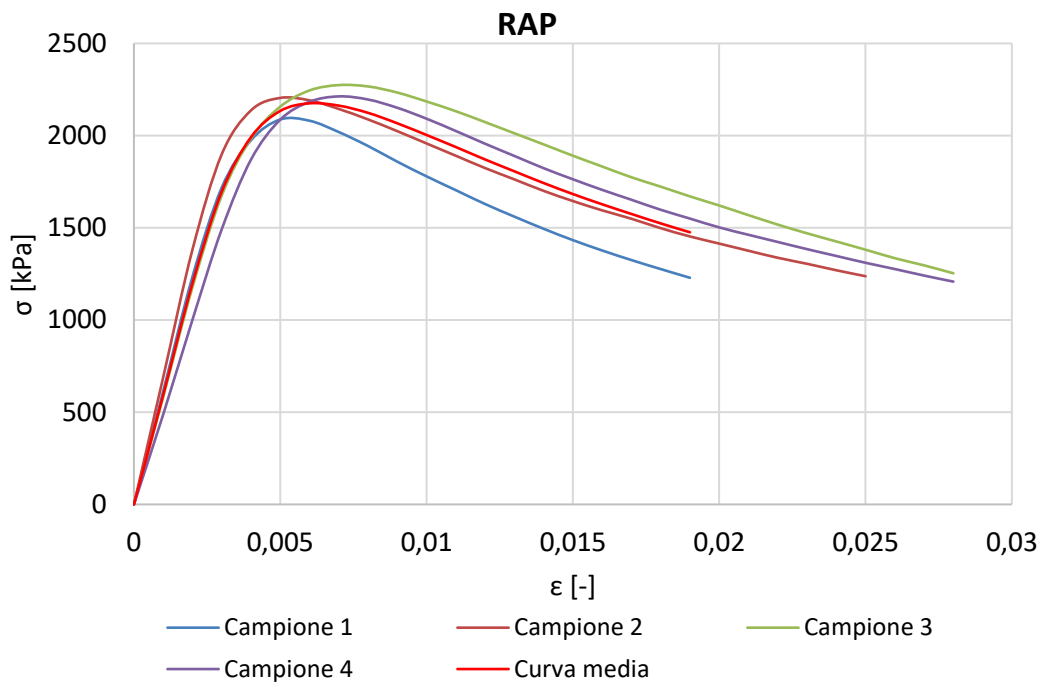


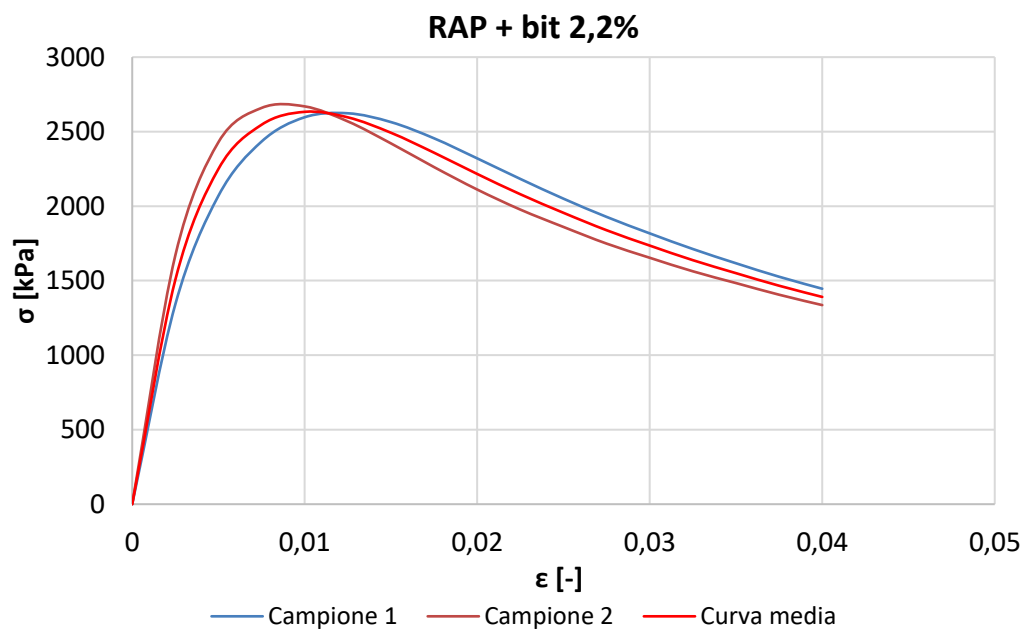
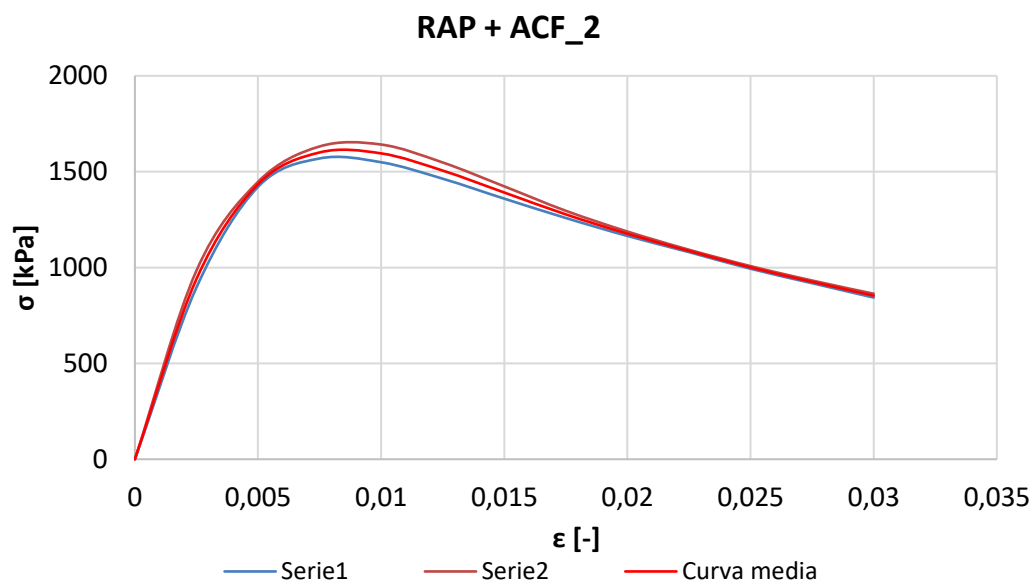
Come si può vedere dal grafico precedente, in seguito alla linearizzazione del primo tratto della curva, si ha l'arretramento del picco.

Questo procedimento è stato poi adottato per correggere tutte le curve sperimentali.

Diagrammando nello stesso grafico le curve corrette di per ogni materiale, si può notare come presentino un andamento simile. Per questo motivo si è proceduto alla determinazione delle curve medie per ogni materiale, al fine di semplificare l'analisi dei risultati.

Di seguito sono riportate le curve corrette per ognuno dei materiali e le risultanti curve medie.



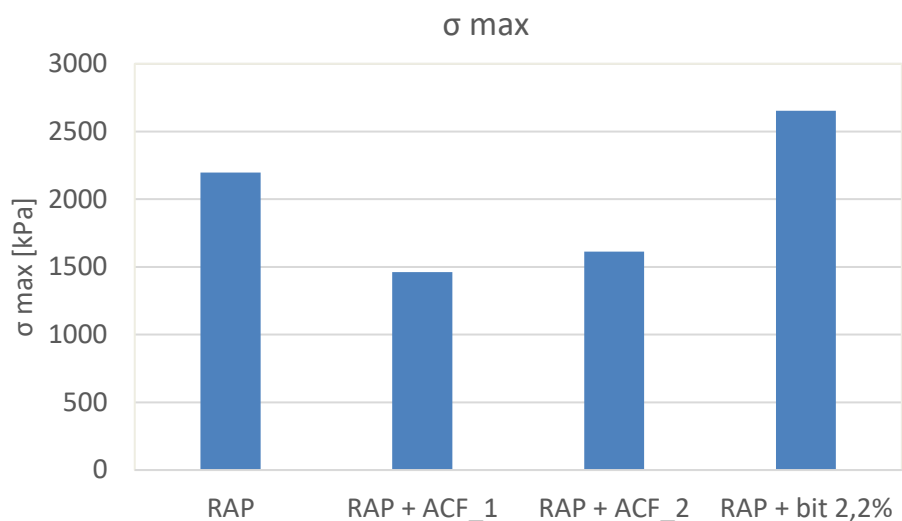


Una volta ricavate le curve medie è stato possibile determinare i valori medi di tensione di compressione e deformazione a rottura:

Materiale	σ max	ϵ (σ max)
[-]	[kPa]	[-]
RAP	2198	0,0062
RAP + ACF_1	1462	0,0104
RAP + ACF_2	1614	0,0085
RAP + bit 2,2%	2655	0,0103

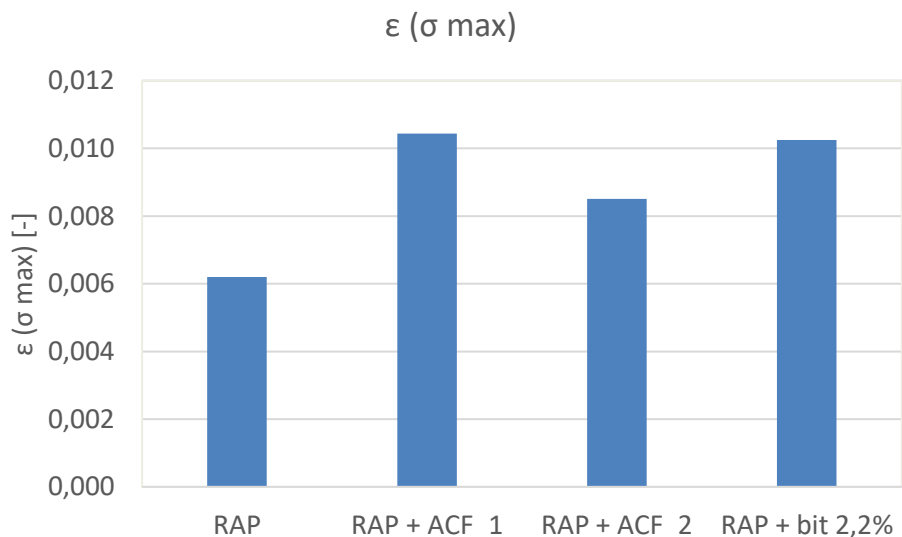
tabella 6.20: Valori medi di tensione e deformazione a rottura - Prova UCS

Di seguito si riportano i grafici dei valori tabellati per una più semplice interpretazione:



Come si può notare dalla figura, l'uso degli ACF esplica la sua azione andando a ridurre di circa il 30% la resistenza a compressione rispetto al valore raggiunto dal solo RAP.

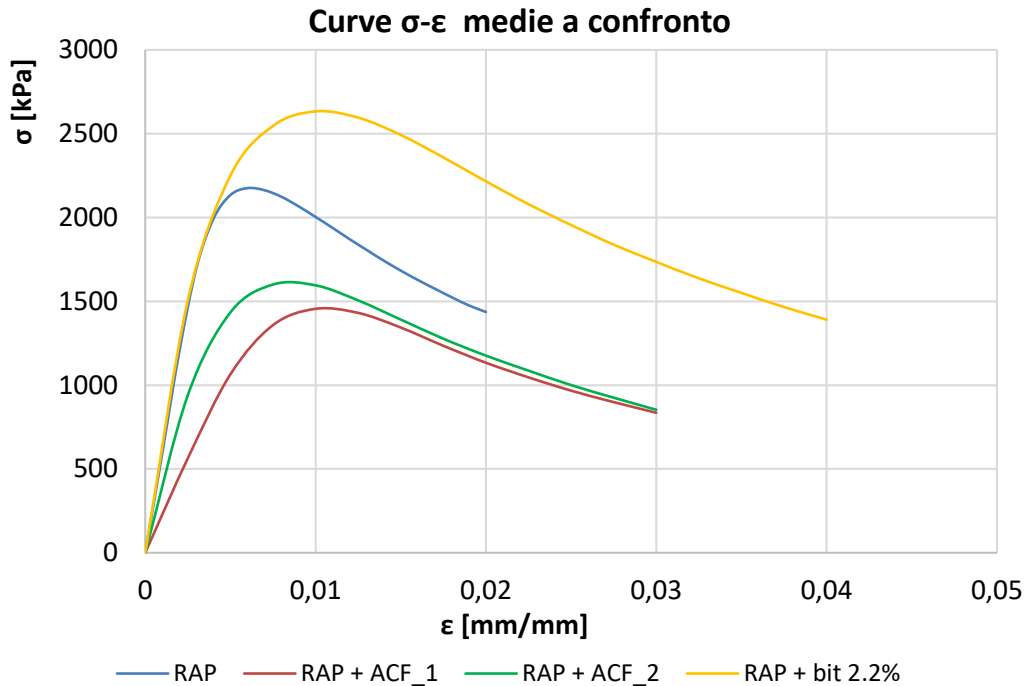
L'aggiunta di bitume in percentuale pari al 2.2% garantisce invece maggiore coesione ai campioni, manifestando un incremento di resistenza di circa il 20% rispetto ai campioni di solo RAP.



Il grafico sopra riportato mostra come l'utilizzo di rejuvenators migliori le caratteristiche di deformazione a rottura dei campioni, rispetto a quelli composti da solo RAP. Questo fatto è molto significativo in quanto conferma l'efficacia dei rigeneranti del fresato bituminoso nei confronti dell'eccessiva rigidità del legante invecchiato.

Anche l'aggiunta di bitume al RAP consente di migliorarne le prestazioni a rottura, mantenendosi in linea con gli effetti mostrati dall'ACF numero 1.

Inoltre, sono state rappresentate le curve medie di ogni materiale in un unico grafico, per metterne in luce i differenti comportamenti:



È interessante osservare che, come mostrato anche per la prova di resistenza a trazione indiretta, le curve di carico dei campioni composti da RAP e da RAP miscelato col bitume vergine presentano, nel tratto lineare iniziale, una sovrapposizione.

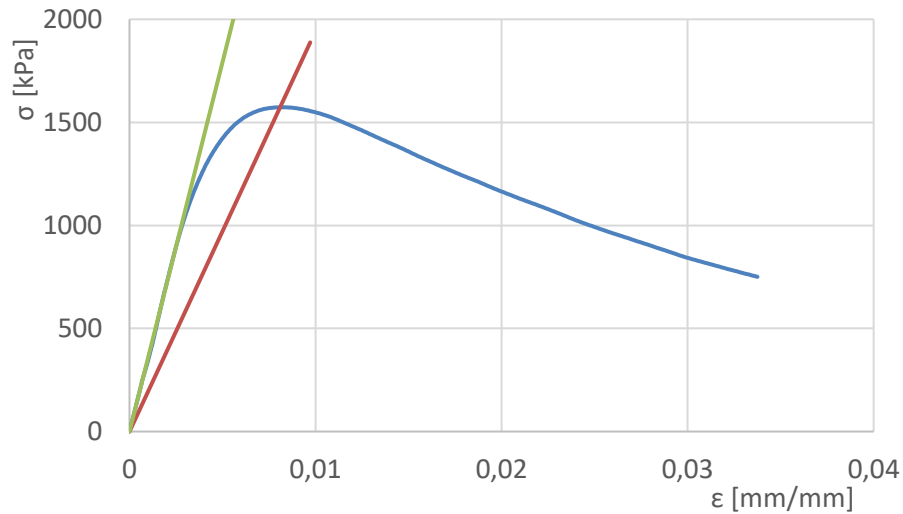
I campioni di RAP additivato con gli ACF mostrano invece comportamenti differenti: in generale si ha una rigidità ridotta rispetto ai campioni di RAP e RAP miscelato al bitume vergine, ma non si allineano tra loro come accade invece per le curve di trazione indiretta: il rejuvenator n°2 presenta una maggiore rigidità rispetto a quello n°1.

Si deduce quindi dalla prova di rottura a compressione semplice che i rejuvenators riducono la rigidità dei campioni, anche se con entità differente.

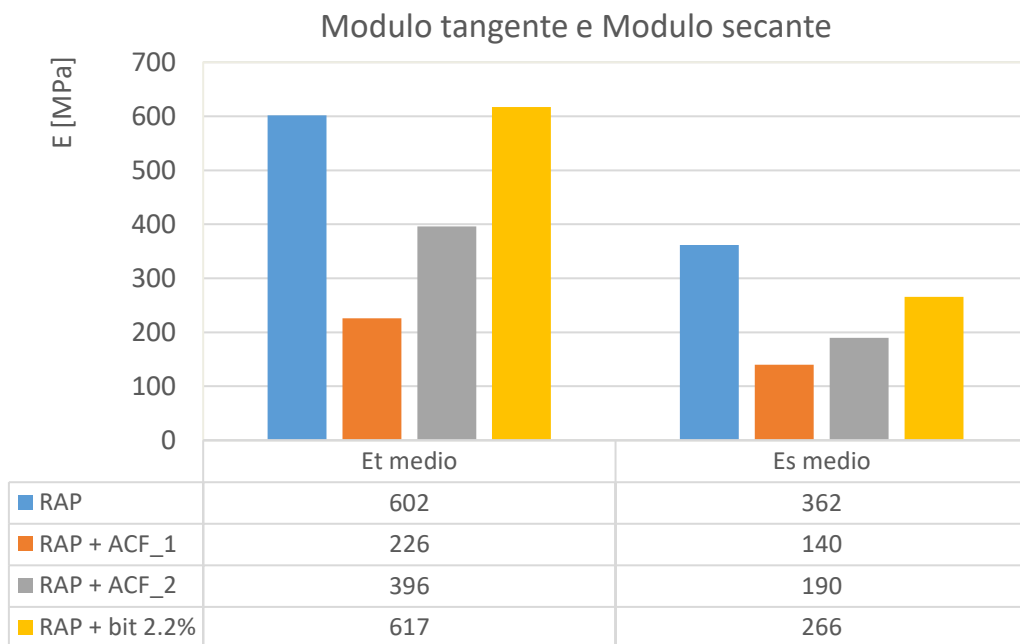
Dalle curve appena determinate è possibile desumere i valori di modulo tangente e modulo secante.

In particolare, il modulo tangente risulta essere pari alla pendenza del tratto lineare della curva mentre, il modulo secante è la pendenza della retta passante per l'origine degli assi ed il punto di picco.

La figura di seguito riportata mostra il concetto di modulo tangente e secante:



Il grafico seguente mostra i valori medi del modulo tangente e secante per ogni materiale:



Per quanto riguarda il modulo tangente dei diversi materiali, si può confermare quanto detto per le curve di compressione:

- I campioni di RAP e RAP + bit 2.2% presentano rigidezza praticamente simile e molto elevata
- I campioni di RAP + ACF_1 e RAP + ACF_2 presentano rigidezza ridotta rispettivamente del 60% e del 40% rispetto a quelli di solo RAP.

Comportamento simile si osserva anche per il modulo secante, ad eccezione del fatto che, in questo caso, i campioni di RAP + bit 2.2% risultano avere una rigidezza secante minore

rispetto a quella manifestata dai campioni di solo RAP.

6.6 RESISTENZA A ROTTURA A TAGLIO (LPDS)

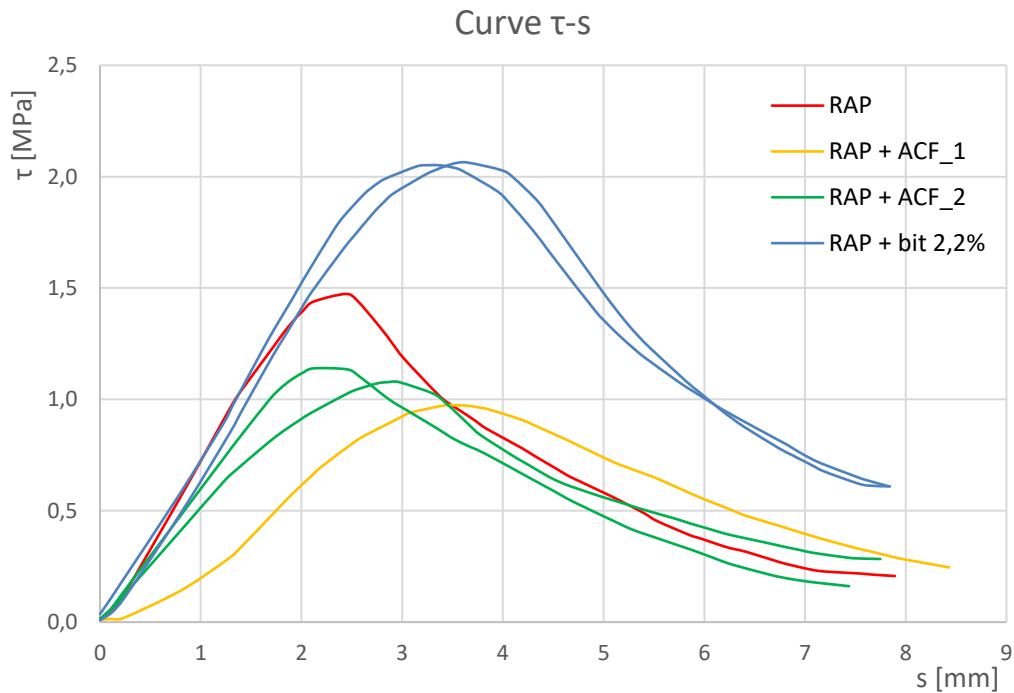
I campioni sottoposti alla prova di resistenza alla rottura per compressione semplice sono stati testati a resistenza alla rottura per taglio.

Poiché la prova di compressione semplice ha indotto nei campioni una rottura localizzata, è stato possibile eseguire il test di taglio sullo strato dei campioni che non ha manifestato deformazioni permanenti.

Il macchinario di prova consente di rilevare gli spostamenti verticali dell'anello di taglio e la forza ad esso applicata per ogni step di carico.

Da queste coppie di punti si può determinare la curva τ - s per ogni campione.

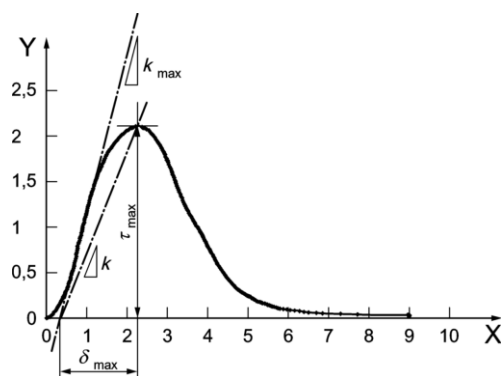
Di seguito si riporta il grafico che mostra le curve sperimentali per ogni campione:



Come si può osservare dal grafico, le curve relative ai campioni composti da solo RAP e RAP miscelato con il 2.2% di bitume mostrano un andamento molto simile nel tratto iniziale della fase di carico, confermando quanto visto in precedenza con le altre prove meccaniche. L'effetto dell'aggiunta di bitume al RAP, consiste essenzialmente nell'incremento della tensione di rottura e della duttilità una volta superato il picco di carico.

Per quanto concerne i campioni additivati coi rejuvenators, si può notare una riduzione di

rigidezza ed un sostanziale incremento di duttilità, a discapito della resistenza alla rottura per taglio, che risulta essersi ridotta rispetto al valore relativo al campione di solo RAP. Anche con questa prova si manifesta ciò che già si è visto con la prova di rottura per compressione semplice: il campione additivato con ACF_1 presenta una rigidezza ed un carico a rottura minore rispetto a quelli dei campioni additivati con l'ACF_2. Una volta note le curve sperimentali per ogni campione è possibile derivare i valori di modulo di rigidezza a taglio massimo e di modulo di rigidezza a taglio. Come proposto da normativa:



I valori di carico massimo e di rigidezza sono riportati di seguito in tabella:

MATERIALE	$\tau_{\text{SBT max}}$	$k_{\text{SBT,max}}$	k_{SBT}
[-]	[MPa]	[Mpa/mm]	[Mpa/mm]
RAP	1,47	0,81	0,63
RAP + ACF_1	0,97	0,44	0,35
RAP + ACF_2	1,11	0,56	0,46
RAP + bit 2,2%	2,06	0,75	0,61

La tabella mostra numericamente ciò che si evince qualitativamente dalle curve sopra riportate:

- I campioni di RAP + bit 2.2% mostrano un'elevata resistenza a taglio rispetto al campione di solo RAP, malgrado presentino un valore di modulo di rigidezza massimo a taglio molto simile;
- I campioni additivati con ACF risultano avere rigidezza ridotta rispetto a quelli composti da solo RAP e RAP + bit 2.2%.
- Il campione di RAP + ACF_1 presenta rigidezza ridotta rispetto a quelli di RAP + ACF_2.

7 CONCLUSIONI

Durante il presente lavoro di Tesi, di fondamentale importanza è stata la fase di studio preliminare allo sviluppo del concetto di sistema modello e alla sperimentazione su di esso fondata. Tutto ciò, al fine di poter meglio comprendere il complesso comportamento del fresato bituminoso all'interno delle miscele, la sua interazione col bitume vergine e con gli additivi rigeneranti.

L'obiettivo della sperimentazione portata avanti nei mesi passati è quello di sviluppare una procedura di prova sperimentale atta a valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato bituminoso sfruttando il concetto di sistema modello.

Il presente lavoro si pone come linea guida per i futuri studi e sviluppi in merito al corretto impiego del RAP e dei rejuvenators in fase di mix design.

La campagna sperimentale è stata articolata su cinque diversi tipi di prove meccaniche effettuate su campioni composti da 100% RAP. Si procede quindi a riportare in modo schematico e metodico quanto si evince dalla sperimentazione con una panoramica sulle diverse prove effettuate:

- **Lavorabilità:** i campioni confezionati con la pressa a taglio giratorio hanno consentito di studiare la lavorabilità delle miscele. Si è osservata una riduzione dell'energia di compattazione necessaria per raggiungere la volumetria target dei campioni, nel caso in cui il RAP venga additivato con gli attivanti chimici funzionali e/o miscelato con del bitume vergine, rispetto ai campioni composti da solo RAP;
- **Prova di modulo di rigidità (ITSM):** i campioni contenenti i rejuvenators e quelli contenenti sia rejuvenator che bitume presentano valori di modulo di rigidità pari a circa il 50% di quello dei campioni contenenti solo RAP, mettendo in evidenza l'effetto esplicato dagli additivi. Nessun fenomeno tempo dipendente è stato invece osservato con questo test;
- **Prova di resistenza alla rottura a trazione indiretta (ITS):** i campioni contenenti i rejuvenators mostrano una riduzione di resistenza a trazione indiretta e un incremento dello spostamento a rottura rispetto ai campioni di solo RAP. L'aggiunta di bitume vergine al RAP consente di conferire invece sia una maggiore resistenza a trazione indiretta, sia un maggior spostamento a rottura rispetto ai

campioni di solo RAP. I campioni di aggregati ricostituiti e miscelati a bitume vergine presentano prestazioni simili a quelli di solo RAP in termini di carico massimo, ma superiori valori di spostamento a rottura.

In termini di comportamento tempo dipendente, i campioni di solo RAP mostrano una minore resistenza al crescere del tempo di condizionamento mentre, per quanto riguarda i campioni additivati con i rejuvenators, la tendenza si inverte.

Il parametro Ductility Toughness consente di discriminare il comportamento fragile del RAP da quello dei campioni additivati con gli ACF, con gli ACF ed il bitume vergine, con il solo bitume vergine ed infine quello dei campioni di aggregati ricostituiti e miscelati al bitume vergine. Tale parametro possiede anche una sensibilità tale da mettere in evidenza il comportamento tempo dipendente, mostrando una riduzione del valore di DT per tutti i campioni, al crescere del tempo. Si può quindi affermare che il tempo di maturazione vada a ridurre la duttilità dei campioni.

- **Prova di modulo resiliente:**
- **Prova di resistenza alla rottura per compressione semplice (UCS):** i campioni composti da solo RAP e RAP miscelato al bitume vergine presentano la medesima rigidità. I campioni di RAP additivato coi rejuvenators mostrano entrambi una rigidità ridotta rispetto a quelli di solo RAP, ma in generale presentano rigidità differenti tra loro, a dimostrare che alcuni tipi di prova consentono di discriminare maggiormente l'effetto di diversi additivi.

In termini di carico massimo a rottura si può affermare che la risposta migliore si ha con i campioni di RAP miscelato al bitume vergine. Seguono i campioni di solo RAP e poi quelli di RAP additivato ai rejuvenators, i quali mostrano un valore di carico di picco pressoché simile tra loro.

- **Prova di resistenza alla rottura a taglio (LPDS):** I campioni di RAP miscelati al bitume vergine mostrano un'elevata resistenza a taglio rispetto al campione di solo RAP, malgrado presentino un valore di modulo di rigidità massimo a taglio molto simile tra loro. L'uso degli ACF consente di ridurre la rigidità dei campioni rispetto a quelli composti dal solo RAP e da RAP miscelato al bitume vergine. Questa prova è inoltre in grado di discriminare il differente comportamento tra i due ACF impiegati nella sperimentazione, mostrando per i campioni contenenti il

rejuvenator 1 una minore rigidità rispetto a quelli contenenti il rejuvenator 2.

8 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA