



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile  
Anno Accademico 2023/2024

# **Studio di miscele sostenibili ad alto contenuto di fresato e plastiche di riciclo**

Relatori:

Prof. Orazio Baglieri  
Prof. Davide Dalmazzo  
Dott. Ing. Joseph La Macchia

Candidato:

Luigi Coppola



*A Carlo e Ale,  
a tutti i vostri sorrisi.*



## ***Abstract***

Negli ultimi anni si è verificato un aumento significativo dell'impiego di materiali di scarto per la produzione di miscele di conglomerato bituminoso sostenibili per le pavimentazioni stradali.

In tale ambito il fresato e le plastiche di riciclo rappresentano risorse chiave per la transizione ad una mobilità più ecologica e ad un futuro più verde.

Gli evidenti vantaggi ambientali ed economici, offerti dalla realizzazione di miscele sostenibili, devono, però, essere accompagnati da prestazioni operative affidabili e di qualità.

Il presente elaborato di tesi si concentra sullo studio di miscele bituminose costituite da un elevato contenuto di fresato, ovvero il 50%, e da diverse percentuali di un compound polimerico composto al 100% da plastiche di riciclo, implementato tramite metodologia ibrida.

Al fine di effettuare dei confronti e comprendere a pieno i contributi sulle prestazioni globali offerti dal fresato e dalle plastiche, sono state realizzate anche miscele prive di RAP e miscele con integrazione umida del polimero.

La selezione delle miscele ottime, basata sullo studio del mix design, è stata effettuata considerando sia proprietà volumetriche sia meccaniche.

I risultati sperimentali dimostrano la possibilità di impiegare plastiche ed elevate quantità di fresato nelle miscele bituminose, garantendo sostenibilità e traguardando i principali requisiti tecnici richiesti dai capitolati.

Nonostante siano necessarie ulteriori analisi di dettaglio, non solo dal punto di vista meccanico, ma anche di fattibilità di realizzazione in grande scala tramite impianti, i quantitativi impiegati di tali materiali sono destinati ad aumentare ulteriormente nelle future applicazioni.

## ***Sommario***

1	Le miscele sostenibili: il fresato e le plastiche di riciclo .....	1
1.1	Introduzione .....	1
1.2	Il fresato o RAP .....	1
1.2.1	Definizione e diffusione.....	1
1.2.2	Tecniche di produzione .....	2
1.2.3	Limiti e prestazioni delle miscele ad alto contenuto di fresato.....	4
1.2.4	Aspetti ambientali ed economici.....	6
1.3	Le plastiche di riciclo.....	7
1.3.1	La produzione di rifiuti in plastica nel mondo.....	7
1.3.2	Proprietà e metodologie di implementazione delle plastiche nei conglomerati bituminosi .....	9
1.3.3	Limiti e prestazioni delle plastiche .....	13
1.3.4	Aspetti ambientali ed economici.....	14
1.4	Obiettivi ed inquadramento del lavoro .....	15
2	Materiali.....	16
2.1	Introduzione .....	16
2.2	Aggregati .....	17
2.2.1	Aggregati vergini .....	17
2.2.2	RAP.....	18
2.2.3	Curva granulometrica di progetto .....	20
2.3	Bitume.....	21
2.4	Rejuvenator.....	22
2.5	Plastiche di riciclo.....	23
2.6	Presentazione delle miscele .....	24
3	Campagna sperimentale.....	27
3.1	Introduzione .....	27
3.2	Miscelazione .....	30

3.2.1	Quartatura degli aggregati .....	30
3.2.2	Essiccazione degli aggregati.....	30
3.2.3	Definizione dei quantitativi .....	32
3.2.4	Procedura di miscelazione .....	35
3.3	Valutazione del contenuto di legante .....	39
3.3.1	Descrizione del parametro .....	39
3.3.2	Procedura .....	40
3.3.3	Calcolo.....	40
3.3.4	Fotografie.....	42
3.4	Determinazione della massima massa volumica teorica .....	43
3.4.1	Descrizione del parametro .....	43
3.4.2	Procedura .....	43
3.4.3	Calcolo.....	44
3.4.4	Fotografie.....	45
3.5	Compattazione e valutazione del contenuto di vuoti.....	47
3.5.1	Descrizione della prova .....	47
3.5.2	Procedura .....	48
3.5.3	Calcolo.....	49
3.5.4	Fotografie.....	55
3.6	Determinazione della bulk density .....	56
3.6.1	Descrizione del parametro .....	56
3.6.2	Procedura .....	56
3.6.3	Calcolo.....	57
3.6.4	Fotografie.....	58
3.7	Valutazione dei moduli di rigidezza .....	59
3.7.1	Descrizione del parametro .....	59
3.7.2	Procedura .....	60
3.7.3	Calcolo.....	61
3.7.4	Fotografie.....	62

3.8	Definizione della resistenza a trazione indiretta .....	64
3.8.1	Descrizione del parametro .....	64
3.8.2	Procedura .....	66
3.8.3	Calcolo .....	66
3.8.4	Fotografie.....	67
3.9	Valutazione del comportamento a fatica.....	69
3.9.1	Descrizione della prova .....	69
3.9.2	Procedura .....	70
3.9.3	Calcolo.....	71
3.9.4	Fotografie.....	73
4	Analisi dei risultati.....	75
4.1	Introduzione .....	75
4.2	Dati ottenuti dalle miscele .....	76
4.2.1	SP1 .....	76
4.2.2	SP2 .....	84
4.2.3	PMB .....	88
4.2.4	RIF .....	91
4.3	Confronti fra le miscele .....	92
4.3.1	Contenuto di vuoti .....	93
4.3.2	Moduli di rigidezza .....	97
4.3.3	Comportamento a fatica.....	110
4.4	Definizione delle miscele ottime .....	113
5	Conclusioni e sviluppi futuri.....	119

## ***Indice delle figure***

Figura 1: Possibili combinazioni di riciclaggio (fonte: Lucia Rosa, 2010).....	3
Figura 2: Costi di miscele bituminose al variare della percentuale di RAP (fonte: Zaumanis et al, 2014) .....	7
Figura 3: Produzione e gestione dei rifiuti in plastica nel tempo (fonte: EPA, 2020)..	8
Figura 4: Scenario futuro di domanda di plastica (fonte: OECD, 2023).....	9
Figura 5: range della temperatura di fusione di diverse tipologie di plastiche (fonte: Ma et al, 2021).....	10
Figura 6: densità e MFI per diverse tipologie di plastiche (Mehta et al, 2023).....	11
Figura 7: diffusione in letterature del metodo umido e secco (Mehta et al, 2023).....	11
Figura 8: ruolo delle plastiche nelle tre tipologie di miscelazione (fonte: Boom et al, 2023).....	12
Figura 9: centro di produzione Bitux S.p.a.....	16
Figura 10: posizione di Bitux S.p.a. ....	16
Figura 11: classi granulometriche degli aggregati vergini.....	17
Figura 12: classi granulometriche di fresato.....	19
Figura 13: curva di riferimento.....	20
Figura 14: curva di progetto .....	21
Figura 15: proprietà fisiche del rejuvenator impiegato .....	23
Figura 16: esempio di applicazione del rejuvenator.....	23
Figura 17: estratto della scheda tecnica del compound polimerico impiegato (fonte: Iterchimica).....	24
Figura 18: materiale polimerico SuperPlastEco .....	24
Figura 19: miscelatore meccanico .....	28
Figura 20: miscelatore manuale.....	28
Figura 21: schema di funzionamento di un impianto discontinuo (fonte: Brasileiro et al, 2019).....	31
Figura 22: fase di essiccazione degli aggregati vergini.....	32
Figura 23: preparazione dei quantitativi di aggregati da “ricetta”.....	33
Figura 24: risultato della miscelazione manuale .....	38
Figura 25: risultato della miscelazione meccanica.....	38

Figura 26: aggiunta del filler .....	38
Figura 27: aggiunta del bitume vergine .....	38
Figura 28: forno carbolite .....	42
Figura 29: inserimento del campione.....	42
Figura 30: cestino di campionamento e vassoio di raccolta .....	42
Figura 31: massa finale più attrezzatura ( $W_{a+t}$ ).....	42
Figura 32: massa iniziale del campione + attrezzatura ( $W_{s+t}$ ).....	42
Figura 33: procedura di quartatura del campione (fonte: BS EN 12697-38).....	43
Figura 34: disgregazione del materiale .....	45
Figura 35: quartatura del materiale .....	45
Figura 36: fase di deaerazione .....	46
Figura 37: massa picnometro con tappo ( $m_1$ ) .....	46
Figura 38: massa del picnometro con tappo e campione ( $m_2$ ) .....	46
Figura 39: massa del picnometro con tappo, campione ed acqua fino al menisco ( $m_3$ ) .....	46
Figura 40: particolare del menisco.....	47
Figura 41: azioni in gioco durante la compattazione con pressa a taglio giratoria (fonte: BS EN 12697-31).....	48
Figura 42: curva di compattazione provino V1 della miscela SP1 4.1 .....	53
Figura 43: limitazioni sulle grandezze imposte dal CSA dell'A4 (fonte: CSA autostrada A4).....	54
Figura 44: fustella da 150 mm .....	55
Figura 45: caricamento della fustella con la miscela sciolta .....	55
Figura 46: estrazione del provino compattato.....	55
Figura 47: compattazione tramite pressa a taglio giratoria.....	55
Figura 48: inserimento in acqua.....	58
Figura 49: massa del provino asciutto ( $m_1$ ).....	58
Figura 50: creazione della superficie satura a superficie asciutta.....	58
Figura 51: massa in acqua ( $m_2$ ).....	58
Figura 52: impulso di carico con relative caratteristiche (fonte:BS EN12697-26) ...	60
Figura 53: definizione di $z$ (fonte:BS EN12697-26) .....	62
Figura 54: macchinario UTM-30.....	62

Figura 55: inserimento del campione .....	63
Figura 56: castelletto di prova .....	63
Figura 57: interfaccia del software, impulsi di carico e spostamenti .....	63
Figura 58: setup prova ITS (fonte: BS EN 12697-23).....	64
Figura 59: possibili rotture (fonte: BS EN 12697-23).....	65
Figura 60: macchinario di prova per ITS.....	67
Figura 61: rottura del provino a fine test .....	67
Figura 62: tipologie di rotture registrate.....	67
Figura 63: particolare della rottura di due campioni post ITS.....	68
Figura 64: vista frontale della prova.....	73
Figura 65: rottura del campione.....	73
Figura 66: inserimento del campione nel castelletto di prova .....	73
Figura 67: inserimento sotto il pistone di carico con trasduttori .....	73
Figura 68: output del software, decrescita del modulo di rigidezza con il numero di cicli di carico .....	74
Figura 69: moduli di rigidezza a 10°C miscele SP1 .....	79
Figura 70: moduli di rigidezza a 20°C miscele SP1 .....	79
Figura 71: moduli di rigidezza a 40°C miscele SP1 .....	80
Figura 72: ITS a 25°C miscele SP1 .....	80
Figura 73: rette di fatica miscele SP1 .....	81
Figura 74: moduli di rigidezza a 10°C miscele SP2.....	85
Figura 75: moduli di rigidezza a 20°C miscele SP2.....	86
Figura 76: moduli di rigidezza a 40°C miscele SP2.....	86
Figura 77: ITS a 25°C miscele SP2.....	87
Figura 78: moduli di rigidezza a 10°C miscele PMB.....	89
Figura 79: moduli di rigidezza a 20°C miscele PMB.....	90
Figura 80: moduli di rigidezza a 40°C miscele PMB.....	90
Figura 81: ITS a 25°C miscele SP2 .....	91
Figura 82: vuoti a 10 giri in funzione della percentuale di bitume vergine.....	93
Figura 83: vuoti a 10 giri in funzione della percentuale di legante totale .....	94
Figura 84: vuoti a 120 giri in funzione della percentuale di bitume vergine.....	94
Figura 85: vuoti a 120 giri in funzione della percentuale di legante totale .....	95

Figura 86: vuoti a 200 giri in funzione della percentuale di bitume vergine.....	96
Figura 87: vuoti a 200 giri in funzione della percentuale di legante totale.....	96
Figura 88: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 10°C.....	98
Figura 89: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 20°C.....	99
Figura 90: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 40°C.....	99
Figura 91: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta dell'1.60%.....	101
Figura 92: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta dell'1.80%.....	101
Figura 93: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta del 2.00% .....	102
Figura 94: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 10°C.....	103
Figura 95: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 20°C.....	104
Figura 96: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 40°C.....	104
Figura 97: moduli a 10°C a parità di legante totale .....	106
Figura 98: moduli a 20°C a parità di legante totale .....	106
Figura 99: moduli a 40°C a parità di legante totale .....	107
Figura 100: moduli a 10°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1 .....	108
Figura 101: moduli a 20°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1 .....	108
Figura 102: moduli a 40°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1 .....	109
Figura 103: prove pilota a fatica .....	110

## ***Indice delle tabelle***

Tabella 1: distribuzione granulometriche delle classi di aggregati vergini .....	18
Tabella 2: distribuzione granulometriche delle classi di fresato.....	19
Tabella 3: contenuto di bitume associato alle classi di fresato .....	19
Tabella 4: definizione della curva di progetto .....	21
Tabella 5: classificazione empirica dei bitumi.....	22
Tabella 6: classificazione prestazionale dei bitumi .....	22
Tabella 7: miscele realizzate.....	26
Tabella 8: definizione dei quantitativi di materiale per una miscela SP1 .....	33
Tabella 9: definizione dei quantitativi di materiale per la miscela di riferimento .....	34
Tabella 10: quantitativo di massa per il test di ignizione (fonte: BS EN 12697-39)..	39
Tabella 11: grandezza iniziali per la valutazione dei vuoti provino V1 della miscela SP1 4.1 .....	52
Tabella 12: valutazione del contenuto di vuoti per il provino V1 della miscela SP1 4.1 .....	52
Tabella 13: valori di C1 e k provino V1 della miscela SP1 4.1 .....	53
Tabella 14: limiti di accettabilità per i moduli di rigidezza (fonte: CSA dell'autostrada A4) .....	59
Tabella 15: altezza ammissibili per il test di modulo (fonte:BS EN12697-26).....	60
Tabella 16: limiti di accettabilità per i valori di ITS (fonte: CSA dell'autostrada A4) .....	65
Tabella 17: altezza del campione da testare (fonte: BS EN 12697-24).....	70
Tabella 18: proprietà volumetriche miscele SP1 .....	77
Tabella 19: proprietà meccaniche miscele SP1 .....	78
Tabella 20: provini a fatica SP1 4.0.....	82
Tabella 21: provini a fatica SP1 4.1 .....	82
Tabella 22: provini a fatica SP1 5.2.....	82
Tabella 23: parametri della fatica miscele SP1 .....	83
Tabella 24: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscele SP1 .....	83
Tabella 25: proprietà volumetriche miscele SP2 .....	84
Tabella 26: proprietà meccaniche miscele SP2 .....	85

Tabella 27: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscele SP2.....	87
Tabella 28: proprietà volumetriche miscele PMB .....	88
Tabella 29: proprietà meccaniche miscele PMB.....	89
Tabella 30: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscele PMB.....	91
Tabella 31: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscela RIF.....	92
Tabella 32: moduli di rigidezza a parità di vuoti .....	103
Tabella 33: valori dei moduli a parità di legante totale.....	105
Tabella 34: incrementi percentuali di rigidezza fra le 4 miscele .....	105
Tabella 35: incrementi percentuali di rigidezza fra le miscele RIF ed SP1 .....	107
Tabella 36: incrementi percentuali di rigidezza fra le miscele RIF, SP1 ed SP2.....	109
Tabella 37: risultati fatica SP1 .....	111
Tabella 38: risultati fatica SP2 .....	111
Tabella 39: risultati fatica PMB .....	111
Tabella 40: risultati fatica RIF .....	111
Tabella 41: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione .....	112
Tabella 42: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione .....	112
Tabella 43: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione .....	112
Tabella 44: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione .....	112
Tabella 45: range di legante vergine per i vuoti a 10 giri .....	113
Tabella 46: range di legante vergine per i vuoti a 120 giri .....	113
Tabella 47: range di legante vergine per i vuoti a 200 giri .....	114
Tabella 48: range di legante vergine sulla base della volumetria .....	114
Tabella 49: moduli di rigidezza per i range volumetrici.....	115
Tabella 50: moduli di rigidezza per i range volumetrici e meccanici.....	115
Tabella 51: range ottimi di bitume vergine di aggiunta .....	115
Tabella 52: moduli di rigidezza per i range volumetrici in funzione del legante totale .....	116
Tabella 53: moduli di rigidezza per i range volumetrici e meccanici in funzione del legante totale.....	116
Tabella 54: confronto fra i risultati ottenuti sulla base del vergine di aggiunta e del legante totale.....	117
Tabella 55: range di definizione delle miscele ottime .....	117

Tabella 56: risultati della campagna sperimentale.....	118
--	-----



# ***1 Le miscele sostenibili: il fresato e le plastiche di riciclo***

## **1.1 Introduzione**

Una delle principali sfide della società moderna è quella di incentivare e traguardare una mobilità sostenibile, promuovendo la transizione tecnologica ed ecologica mediante innovazioni volte a rendere le infrastrutture più sicure, intelligenti e, soprattutto, sostenibili.

La sostenibilità di un'infrastruttura è legata in modo particolare alla pavimentazione e, dunque, ai suoi materiali costituenti. Da sempre le materie prime implementate per la realizzazione di conglomerati bituminosi stradali sono aggregati minerali vergini e bitume tal quale.

Esistono, però, delle risorse che possono essere considerate chiave per la transizione ad una mobilità più ecologica e ad un futuro più verde, se integrate in maniera funzionale ed efficace all'interno delle miscele bituminose stradali.

Il così detto fresato, o anche RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), e le plastiche di riciclo, o PWM (Plastic Waste Materials), sono due soluzioni, non solo capaci di ridurre l'impatto ambientale delle attività di costruzione e manutenzione stradale, ma contribuiscono, anche, a promuovere un'economia circolare in cui i rifiuti sono trasformati in risorse preziose, garantendo al contempo la sicurezza e la qualità delle nostre strade.

## **1.2 Il fresato o RAP**

### ***1.2.1 Definizione e diffusione***

Per fresato, o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), si intende il conglomerato bituminoso che viene rimosso da infrastrutture esistenti.

Essendo composto da due preziose risorse non rinnovabili, ovvero aggregati e legante bituminoso, il suo utilizzo consapevole può garantire la sostenibilità della costruzione di nuove reti infrastrutturali.

Un primo vasto impiego di RAP nelle nuove formulazioni di conglomerati bituminosi, con una percentuale del 40% rispetto alla miscela, è stato condotto in Sud Africa nel 2009. Solo un decennio dopo, però, si consolida come una procedura industriale affermata (SABITA, 2019).

Anche il Giappone rappresenta fin dal 2013 un esempio efficiente di riciclaggio del fresato, infatti solo due anni dopo, nel 2015, il 99% di tale risorsa è stato reinserto nel ciclo produttivo. (NAPA, 2015).

Analogamente alla tendenza giapponese, l'ultimo sondaggio della National Asphalt Pavement Association (NAPA) ha evidenziato che l'industria del settore stradale statunitense ha riutilizzato più del 99% in peso del RAP disponibile nel 2018, ciò ha reso tale materiale il più riciclato tra gli stati americani (NAPA, 2019).

Spostando lo sguardo alla nostra penisola un'analisi condotta dal SITEB (Associazione Strade Italiane e Bitumi) ha evidenziato come, grazie all'utilizzo del fresato, nel 2023 in Italia sono stati risparmiati oltre 10 milioni di tonnellate di materie prime e più di 420mila tonnellate di bitume, con un tasso di recupero del RAP del 60%, riducendo il divario rispetto ad altri Paesi europei che registrano in media un recupero del 68%.

La stessa ricerca riporta come le pavimentazioni stradali realizzate in Italia contengono mediamente il 30% di fresato, un valore in crescita rispetto al 25% del 2018 ed il 20% del 2014.

Pertanto, supponendo uno scenario ottimistico ed accelerato di impiego di tale risorsa fino al 50% del conglomerato bituminoso prodotto in Italia, il risparmio di materiali potrebbe raggiungere quota 17.5 milioni di tonnellate per gli inerti e 700mila tonnellate per il bitume, con un controvalore economico di 735 milioni di euro (Alessandro Pesaresi, 2024).

### ***1.2.2 Tecniche di produzione***

La produzione di conglomerati bituminosi a base di fresato può avvenire in situ o all'interno di impianti fissi, inoltre è presente un'ulteriore distinzione fra riciclaggio a caldo o a freddo (figura 1).

Di seguito saranno descritte le possibili quattro combinazioni per la produzione di RAP con i relativi vantaggi.



*Figura 1: Possibili combinazioni di riciclaggio (fonte: Lucia Rosa, 2010)*

**Riciclaggio a caldo, in impianto.** Le miscele prodotte tramite tale tecnica sono composte da: aggregati lapidei vergini preventivamente riscaldati, fresato composto da diverse classi granulometriche, bitume tal quale o modificato ed eventuali additivi. La produzione avviene in impianti fissi, discontinui o continui, ed assicura prestazioni elevate al conglomerato grazie all'elevata possibilità di controllo di dosaggi e pesi.

**Riciclaggio a freddo, in impianto.** In questo caso l'aggregato lapideo di primo impiego è aggiunto all'atto del confezionamento a temperatura ambiente. Il RAP, invece, viene miscelato con emulsioni bituminose, rigeneranti ed inerti vergini. Gli impianti, in questo caso, sono caratterizzati da grande facilità di smobilitazione che ne permette l'installazione nei pressi della zona di interesse. L'impiego di emulsioni bituminose, ovvero bitume, acqua ed agenti emulsionanti, permette di rendere lavorabile il bitume evitando il riscaldamento con evidenti vantaggi economici, energetici ed ambientali; tuttavia, l'azione di rivestimento degli inerti ha inizio solo dopo la "rottura" dell'emulsione e risulta meno coprente rispetto a quella di un bitume ad alte temperature.

**Riciclaggio a caldo, in situ.** Tale metodologia prevede l'utilizzo di treni di riciclaggio, ovvero una serie di attrezzature chiamate a svolgere i seguenti compiti: scarifica della pavimentazione, riscaldamento del fresato, aggiunta di inerti vergini e

bitume, miscelazione, stesa e compattazione. I vantaggi sono un importante risparmio economico ed ambientale dovuto alla riduzione del numero dei trasporti e delle spese di stoccaggio dei materiali. D'altro canto, i principali svantaggi sono: la limitazione dell'intervento ai soli strati superficiali e la grande criticità di ottenere una correzione granulometrica esatta.

**Riciclaggio a freddo, in situ.** Le miscele vengono realizzate con apposite apparecchiature in grado di miscelare in continuo fresato, emulsione bituminosa, sostanze stabilizzanti (calce o cemento) ed aggregati vergini. I vantaggi economici ed ambientali sono, però, accompagnati dalla scarsa possibilità di controllo sulla granulometria del prodotto finale dovuta al fatto che la procedura è svolta in situ. (Rosa, 2010).

### ***1.2.3 Limiti e prestazioni delle miscele ad alto contenuto di fresato***

Nonostante diversi studi abbiano riscontrato risposte positive dalle miscele ad alto contenuto di fresato, la pratica comune limita ancora il contenuto di RAP intorno al 20 – 30% rispetto al peso della miscela.

Le suddette limitazioni derivano prevalentemente dalle 4 cause elencate di seguito:

1. la qualità degli aggregati provenienti dalla fresatura;
2. le tecnologie degli impianti di produzione;
3. la metodologia di mix-design;
4. le prestazioni finali della miscela.

Per poter considerare il fresato come un input affidabile per la progettazione di miscele stradali, risulta necessaria una valutazione della qualità e dell'omogeneità degli aggregati. Una volta rimosso dalla pavimentazione esistente, infatti, il materiale presenta una maggior quantità di aggregati fini, generati dall'azione della fresatrice (Kandhal et al, 1998). Tali particelle fini, data la maggiore superficie libera, contengono una maggiore quantità di bitume invecchiato ed una tendenza superiore a trattenere l'umidità. Infine, gli aggregati derivanti dal fresato non sono caratterizzati dalla stessa capacità di drenaggio di quelli vergini.

Pertanto, per una corretta gestione e progettazione delle miscele contenenti RAP è importante andare a valutare e considerare tutti questi fattori.

Un prodotto fresato di buona qualità è figlio di operazioni di fresatura eseguite a regola d'arte e di un corretto stoccaggio del materiale generato: in tale fase, creare cumuli separati per materiali fresati provenienti da diversi siti o strati della pavimentazione consente di evitare contaminazioni tra di essi e, dunque, una maggiore uniformità nelle caratteristiche fisiche e meccaniche del prodotto finale. Mentre il RAP ottenuto da una sola fonte tracciabile potrebbe non richiedere ulteriori lavorazioni se non un'ispezione per la presenza di contaminanti, quando si ha a che fare con materiali provenienti da origini differenti è altamente consigliato procedere con operazioni di vagliatura, frantumazione e frazionamento, al fine di creare un materiale fresato coerente che soddisfi gli standard per la produzione di miscele bituminose (Copeland et al, 2011).

Spostando l'attenzione agli impianti di produzione di conglomerato bituminoso, bisogna sottolineare come il fresato non possa essere implementato e gestito nel processo industriale come gli aggregati vergini. Il RAP, infatti, essendo ricoperto da bitume, non può essere riscaldato tramite fiamma diretta, ma solo per conduzione e contatto con gli aggregati vergini caldi. Il fresato, caratterizzato da un'umidità del 7-8% (West et al, 2013), causa un aumento dei tempi di miscelazione poiché abbassa la temperatura ed introduce, anche, un possibile rischio di lievi esplosioni. Per tali ragioni si raccomanda di tenere il fresato in condizioni asciutte, oppure, specie se bisogna impiegarlo in grandi quantità, di riscaldarlo in maniera indiretta (Tarsi et al, 2020).

Per quanto concerne il mix-design di miscele ad alto contenuto di fresato gli standard prestazionali da soddisfare sono gli stessi dei conglomerati tradizionali.

Per tale ragione, solo tramite operazioni di vagliatura, frantumazione e frazionamento è possibile contare su un materiale omogeneo capace di ricreare, in modo affidabile, una curva granulometrica di progetto (Zaumanis et al, 2014).

Particolarmente rilevante è il discorso sul legante contenuto dal RAP. Esso, per contribuire alle proprietà reologiche e al contenuto totale di legante nella miscela finale, deve subire l'aggiunta di agenti ammorbidenti e ringiovanenti (Al-Qadi et al, 2007). L'introduzione di tali sostanze rappresenta una variabile aggiuntiva nel processo di progettazione della miscela, richiedendo la selezione di un agente compatibile e la determinazione del dosaggio appropriato. Attualmente, la

miscelazione del legante invecchiato con gli agenti riciclati è ancora oggetto di ricerca (Lo Presti et al, 2020).

Molti studiosi hanno analizzato il comportamento delle miscele al variare del contenuto di RAP confrontandole con conglomerati tradizionali. In generale, gli studi di laboratorio hanno mostrato una maggiore rigidità dei conglomerati bituminosi riciclati, dovuta al bitume invecchiato, che si traduce in una minore resistenza alla fatica e una migliore resistenza all'ormaiamento.

Tali risultati sono funzione del contenuto di fresato presente: è stato più volte provato come percentuali inferiori al 30% di fresato influenzino marginalmente le prestazioni finali della miscela.

Inoltre, l'uso di un bitume vergine più morbido può mitigare l'effetto di irrigidimento dettato dal legante invecchiato (Tarsi et al, 2020).

#### ***1.2.4 Aspetti ambientali ed economici***

Per quanto possano risultare evidente i vantaggi ambientali derivanti dall'utilizzo di elevate quantità di fresato all'interno delle miscele bituminose, è opportuno cercare di quantificare i benefici sia ambientali sia economici.

Lo studio di Vidal et al. del 2013, grazie ad un approccio LCA (Life Cycle Assessment), permette di valutare le differenze in termini di impatti di miscele bituminose con e senza RAP, considerando l'intera vita utile dell'infrastruttura: dalla sua concezione alla dismissione.

La ricerca evidenzia come: l'introduzione di aggregati di riciclo riduca le emissioni di gas serra legate alla produzione di materie prime e, inoltre, diminuisce le emissioni al termine della vita utile, poiché evita lo smaltimento del materiale.

In particolare, l'implementazione del 15% di RAP porta ad una riduzione degli impatti sul cambiamento climatico del 13% e in positivo del 14% sul risparmio delle fonti fossili (Vidal et al, 2013).

Dal punto di vista economico un'analisi condotta da NAPA ha riportato che, grazie all'utilizzo di fresato, nel 2018 gli USA hanno risparmiato 2.8 miliardi di dollari.

Il RAP ha, infatti, sostituito 4.1 miliardi di tonnellate di legante vergine e 78 miliardi di tonnellate di aggregati vergini.

Lo studio di Zaumanis et al. è riuscito a quantificare il costo di una tonnellata di miscela di conglomerato al variare della percentuale di RAP.

I risultati, in figura 2, sono relativi ad una miscela con un legante totale del 5.7% ed evidenziano una riduzione di costo fra la miscela senza RAP e quella composta per metà da fresato di circa 40% (Zaumanis et al, 2014).

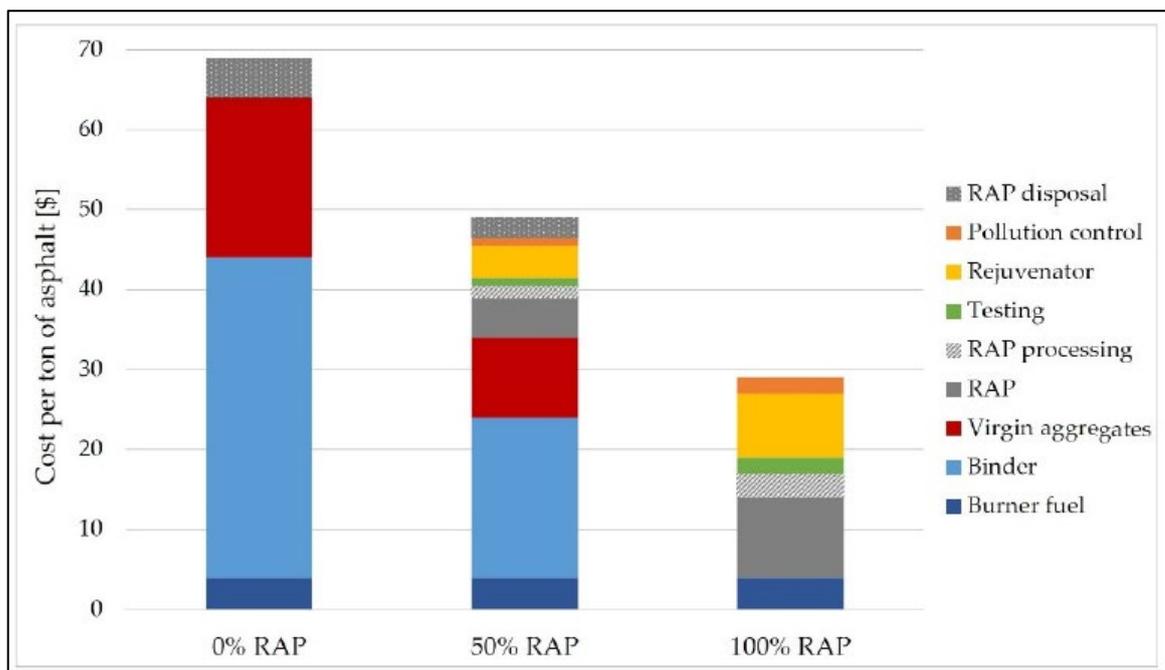


Figura 2: Costi di miscele bituminose al variare della percentuale di RAP (fonte: Zaumanis et al, 2014)

### 1.3 Le plastiche di riciclo

#### 1.3.1 La produzione di rifiuti in plastica nel mondo

Ogni giorno in tutto il mondo vengono prodotti enormi quantità di rifiuti plastici (Plastic Waste Materials – PWM).

Nel 2010, l'Agenzia per la Protezione Ambientale degli Stati Uniti (EPA) ha evidenziato come, di tali rifiuti, solo l'8.0% sia stato riciclato, il 14.4% è stato incenerito, mentre la restante parte collocata nelle discariche.

Lo stesso studio relativo, però al 2018, ha riportato percentuali praticamente identiche, il tasso di riciclo riscontrato è stato, infatti, del 8.7%.

Purtroppo, queste grandi quantità di rifiuti plastici con bassi tassi di riciclo riguardano l'intero globo (Elnaml et al, 2023): tra il 2016 ed il 2017 in Australia sono state prodotte oltre 3.5 milioni di tonnellate di PWM, di cui l'11.8% riciclate (Chin et al, 2019); in Cina si registrano 30 milioni di tonnellate annuali, di cui il 30% riciclate (Chen et al, 2019); in Europa delle 60 milioni di tonnellate se ne ricicla circa il 30% (Leal Filho et al, 2019).

La figura 3 presa da uno studio dell'EPA del 2020 mostra, oltre alla quantità di rifiuti in plastica prodotti ogni anno, permettendo di coglierne il trend di crescita, come sono state gestite tali quantità di PWM e come il riciclaggio abbia rappresentato una soluzione con basse percentuali.

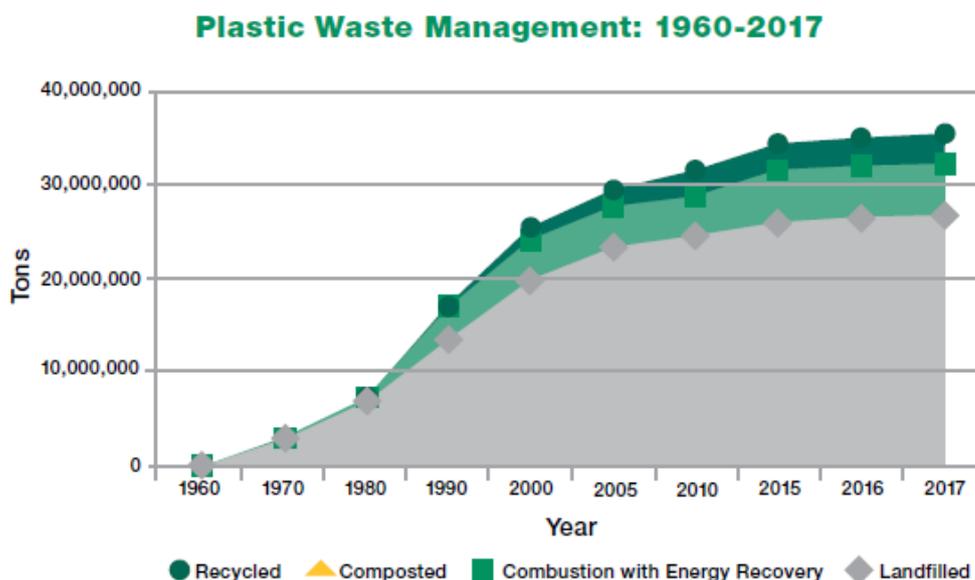
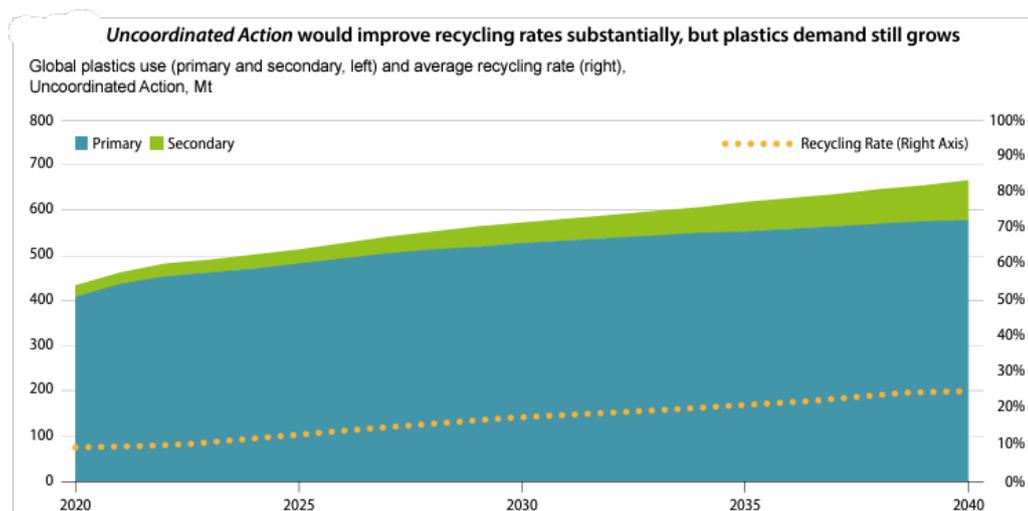


Figura 3: Produzione e gestione dei rifiuti in plastica nel tempo (fonte: EPA, 2020)

Uno studio dell'OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) del 2023 evidenzia come, seguendo uno scenario inalterato per quanto concerne la gestione della plastica a livello mondiale, e tenendo in considerazione il futuro aumento della popolazione mondiale, la richiesta di plastica nel 2040 potrebbe sfiorare le 600milioni di tonnellate (figura 4).



*Figura 4: Scenario futuro di domanda di plastica (fonte: OECD, 2023)*

Il trend evidenziato tramite i dati passati, così come lo scenario futuro, dimostrano l'assoluta necessità di migliorare la gestione dei nostri rifiuti in plastiche reinserendo maggiori percentuali all'interno del ciclo produttivo tramite il riciclaggio.

### ***1.3.2 Proprietà e metodologie di implementazione delle plastiche nei conglomerati bituminosi***

Le pavimentazioni delle infrastrutture viarie possono, data l'estensione e diffusione, rappresentare un'importante risorsa per il riciclaggio delle plastiche. Per permettere, però, un vasto impiego delle plastiche nei conglomerati bituminosi è necessario individuare delle tecniche di implementazione e miscelazione facilmente realizzabili e tali da conferire buone proprietà in termini di lavorabilità, volumetria e risposta meccanica alle miscele.

Prima di descrivere le diverse possibilità di miscelazione, è necessario comprendere quali sono le principali proprietà del materiale polimerico da investigare.

Lo studio di Mehta et al. del 2023 individua come aspetti più rilevanti: la temperatura di fusione, l'emissione di fumi, dimensioni e forma, la densità e, infine, il Melt Flow Index (MFI).

La temperatura di fusione gioca un ruolo chiave poiché, a seconda della temperatura di miscelazione del conglomerato, si può andare a verificare la totale o parziale fusione delle particelle polimeriche, decretando il passaggio da una metodologia

secca ad una ibrida. La figura 5 riporta i range di fusione di diverse tipologie di plastiche.

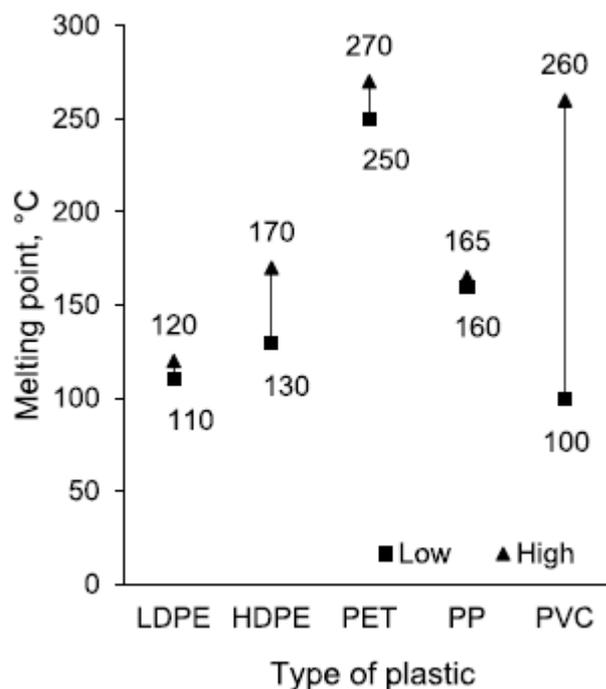


Figura 5: range della temperatura di fusione di diverse tipologie di plastiche (fonte: Ma et al, 2021)

Le dimensioni e la forma vanno ad influire sulla corretta dispersione della plastica e, quindi, sull'omogeneità della miscela finale. In letteratura sono state impiegati polimeri sotto forma di pellet, scaglie, fiocchi, polvere e con dimensioni variabili da pochi millimetri a decine di millimetri (Mehta et al, 2023).

La densità ed il MFI determinano una corretta dispersione, compatibilità e lavorabilità. La densità del polimero non deve, infatti, superare in maniera eccessiva quella del bitume impiegato, così da risultare compatibile e non causare segregazione.

Alti valori di MFI si riferiscono ad una bassa viscosità della plastica e, dunque, ad una miscela resistente alle deformazioni permanenti, ma poco lavorabile.

Risulta, dunque, importante ricercare una plastica con valori congrui di MFI così da garantire sia resistenza alla fessurazione sia una buona dispersione (Liang et al. 2021; Audy et al. 2022).

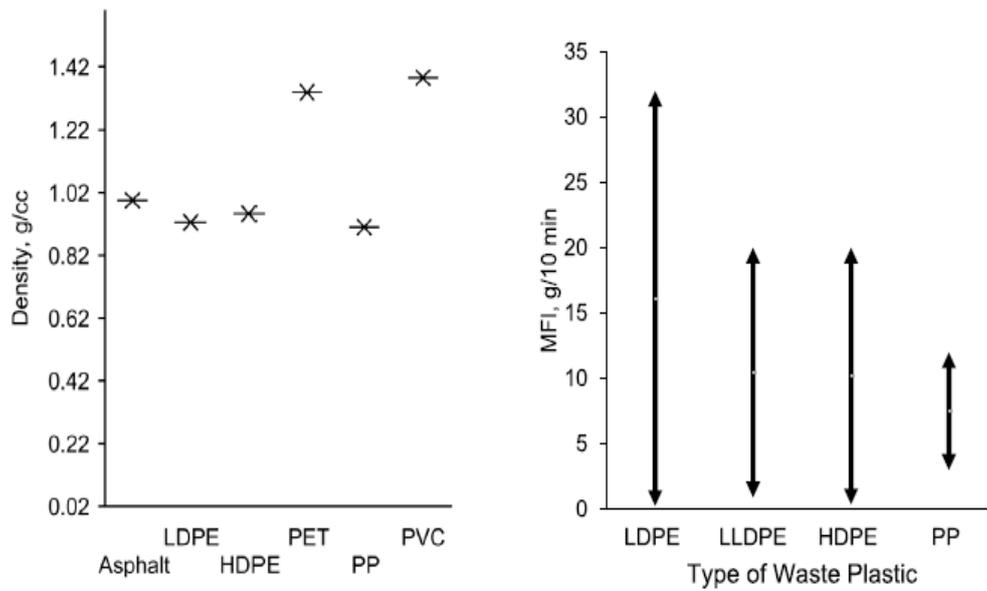


Figura 6: densità e MFI per diverse tipologie di plastiche (Mehta et al, 2023)

Attualmente sono tre i metodi di miscelazione utilizzati per incorporare le plastiche nei conglomerati bituminosi: quello a secco, il processo umido e la metodologia ibrida. La figura 7 permette di evidenziare come il metodo umido sia per ora quello più studiato ed implementato.

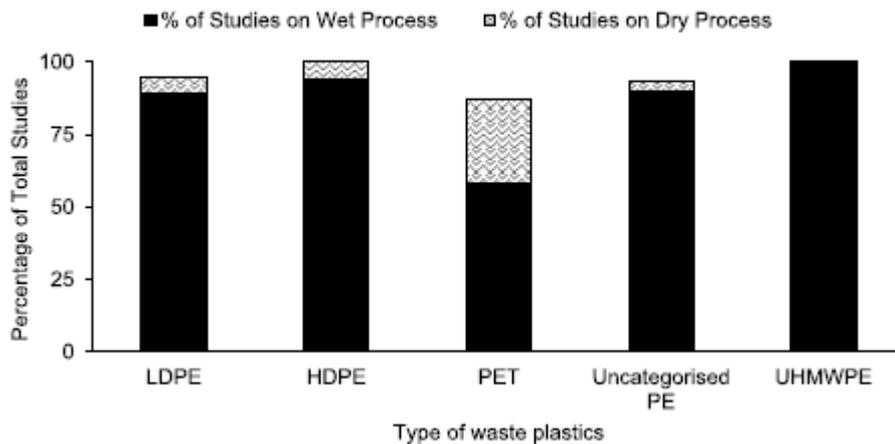


Figura 7: diffusione in letteratura del metodo umido e secco (Mehta et al, 2023)

Il processo umido consiste nel miscelare una certa percentuale di plastica con il legante bituminoso a temperature tipicamente superiori a 150 °C per produrre un bitume modificato tramite plastica (PMB).

La miscelazione avviene mediante uno shear mixer con delle proprietà prefissate e da verificare, per ottenere un legante omogeneo ed efficace, come: temperatura e durata di miscelazione e lo shear rate.

Questo processo utilizza plastiche riciclate con basse temperature di fusione e consente di miscelare percentuali dal 2% all'8% sul peso del bitume (Willis et al, 2020).

Per quanto concerne la metodologia a secco, i rifiuti plastici vengono miscelati con aggregati preriscaldati prima dell'aggiunta di bitume (Patil et al., 2023).

Il materiale polimerico, dunque, viene incorporato direttamente nella miscela come sostituto dell'aggregato, modificatore della miscela, modificatore del legante o una combinazione di queste. Le particelle plastiche vanno parzialmente a ricoprire la superficie dell'aggregato, mentre la rimanente parte resta nella fase legante.

Questo processo sfrutta polimeri con elevati punti di fusione, così che la forma resti quasi totalmente intatta, e permette di incorporare contenuti variabili dallo 0.2% a più dell'1% sul peso degli aggregati (Willis et al, 2020).

Mantenendo inalterata la procedura di miscelazione, ma utilizzando plastiche con punti di fusione inferiori, vicini alla temperatura di miscelazione, si ricade in una metodologia ibrida. Il materiale polimerico, in questo caso, fonde e va a ricoprire quasi totalmente la superficie dell'aggregato prima del bitume, partecipando attivamente alla fase legante.

La figura 8, che segue, consente, in maniera visiva, di distinguere i diversi contributi offerti dalle plastiche nelle tre metodologie descritte.

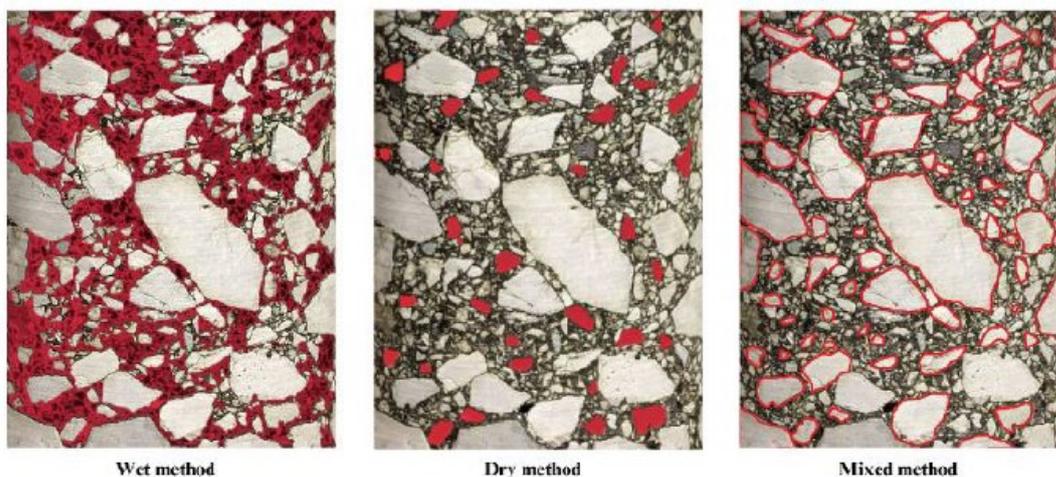


Figura 8: ruolo delle plastiche nelle tre tipologie di miscelazione (fonte: Boom et al, 2023)

### ***1.3.3 Limiti e prestazioni delle plastiche***

Il processo umido risulta quello più diffuso, in quanto capace di produrre miscele in modo efficace ed affidabile, tuttavia esistono, comunque, delle problematiche e delle limitazioni. L'uso di polimeri inadeguati, o non compatibili, porta a miscele eterogenee e prive di coesione (Polacco et al, 2005); inoltre lo stoccaggio prolungato ad alte temperature e senza agitazione può comportare segregazioni permanenti del polimero (Brasileiro et al, 2019). Per ovviare a quest'ultima problematica è possibile impiegare particolari cisterne stabilizzanti che, però, incrementano, naturalmente, il costo di produzione delle miscele (Yu et al, 2015).

Il metodo a secco, invece, oltre a permettere un maggiore impiego di quantità di polimero, può essere considerato più semplice da implementare dato che le plastiche vengono aggiunte, solo, in fase di miscelazione, ma anch'esso presenta degli aspetti negativi: per alti dosaggi di plastiche si rischia un comportamento poco stabile e difficile da prevedere per la miscela; inoltre la temperatura e la durata di miscelazione devono essere controllate attentamente per non compromettere la giusta omogeneità del conglomerato (Lastra-Gonzalez et al, 2016).

Nonostante l'utilizzo di plastiche di riciclo nei conglomerati bituminosi sia un campo di ricerca relativamente recente, esistono diversi studi in letteratura che descrivono come l'implementazione di materiale polimerico modifichi le prestazioni della miscela.

Pur esistendo una grande varietà di plastiche e, come visto, diversi modi di miscelarle, il loro impatto risulta essere coerente per la quasi totalità delle proprietà.

Le plastiche determinano un significativo aumento di rigidità della miscela, con un conseguente miglioramento in termini di resistenza all'ormaiamento (Willis et al, 2020). La resistenza all'umidità è, invece, una proprietà che non subisce grande influenza dalla presenza di polimeri (Pasetto et al, 2022). Un parametro ancora argomento di ricerca è il comportamento a fatica. Nonostante sia facile credere che la vita a fatica possa decrescere con l'aumento della rigidità, sono presenti studi che registrano anche comportamenti praticamente simili tra miscele con o senza plastiche ed alcuni, anche, performance in termini di vita a fatica superiori per i conglomerati modificati.

#### ***1.3.4 Aspetti ambientali ed economici***

Essendo la modifica dei conglomerati bituminosi un settore emergente nell'ambito dell'industria delle pavimentazioni stradali è doveroso comprendere quelli che sono gli aspetti ambientali con particolare attenzione alle emissioni.

Uno studio di Boom et al. del 2023 ha investigato quelle che sono le emissioni di composti organici volatili (VOCs) e di idrocarburi aromatici policiclici (PAHs) confrontando miscele con plastiche, a diversi dosaggi, e senza.

I risultati presentano uno scenario più che positivo per la futura diffusione delle plastiche nei conglomerati poiché: l'impiego di plastiche, grazie alla loro capacità assorbente, ha permesso di registrare una diminuzione superiore al 30% per entrambi i composti chimici analizzati; inoltre, all'aumentare del contenuto di polimero le emissioni diminuiscono (Boom et al, 2022).

L'analisi del 2022 di Assaf e Abu Abdo evidenzia riduzioni superiori al 20% di CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> mediante modifica umida del bitume e riduzioni di oltre il 40% tramite la sostituzione di una miscela tradizionale con una composta dal 40% di RAP e da un alto contenuto di plastiche (Assaf et al, 2022).

Dal punto di vista economico i potenziali vantaggi derivanti dall'integrazione di plastiche riciclate nei conglomerati bituminosi possono essere determinati tramite analisi dei costi del ciclo di vita (LCCA).

Yao et al. (2022) hanno valutato la fattibilità economica dell'utilizzo di PET, al 2% sul peso del bitume con metodologia umida, e materiale fresato, 40% sul peso della miscela. I risultati evidenziano un risparmio del 31% rispetto ad un conglomerato tradizionale.

Assaf e Abu Abdo (2022) hanno constatato come una miscela composta dal 40% RAP e 20% plastica abbia ridotto il costo complessivo del 70%, per quanto il valore del risparmio sia altissimo, esso è solo un dato indicativo poiché, ad oggi, è impensabile, dal punto di vista meccanico, concepire una miscela con un così elevato contenuto di polimero.

In un altro studio, Vasudevan et al. (2012) hanno applicato plastica di scarto (PP, PE e PS) agli aggregati utilizzando un metodo a secco. Hanno valutato la fattibilità economica confrontando i costi di costruzione di una strada con dimensioni di 3.75 m di larghezza e 1 km di lunghezza. La strada modificata con plastica di scarto ha

portato a un risparmio di 1 tonnellata di bitume per km, equivalente a 35.000 INR (400 euro).

#### **1.4 Obiettivi ed inquadramento del lavoro**

Definiti e descritti quelli che possono essere i materiali costituenti una miscela bituminosa sostenibile, come fresato e plastiche di riciclo, questo elaborato vuole, non solo proporre uno studio di mix-design, ma cercare di individuare delle linee guida per la progettazione di conglomerati sostenibili con alti contenuti di queste due componenti.

Si vogliono evidenziare quelle che sono le variazioni delle proprietà volumetriche e meccaniche al crescere del contenuto di plastica e al modificarsi della metodologia di implementazione del polimero tra processo ibrido ed umido.

Questo lavoro di tesi cerca, anche, di comprendere a pieno il contributo del fresato nelle prestazioni della miscela, scindendolo dal ruolo delle plastiche.

Al fine di trarre gli obiettivi presentati, sono state realizzate tre differenti famiglie di miscele:

1. SP1: contenente il 50% di fresato (sul peso degli aggregati) e lo 0.3% di plastica di riciclo miscelata con metodologia ibrida (sul peso della miscela);
2. SP2: contenente il 50% di fresato e lo 0.5% di plastica di riciclo miscelata con metodologia ibrida;
3. PMB: composta dal 50% di fresato e miscelata con un bitume modificato con metodologia umida.

Al fine di operare dei confronti e separare i contributi di RAP e materiale polimerico sono stati realizzati dei provini di riferimento privi della componente di fresato.

La miscela bituminosa oggetto di progettazione rappresenta uno strato di collegamento (AC 16), mentre per la definizione dei limiti di accettazione delle varie grandezze è stato consultato il Capitolato Speciale d'Appalto relativo al rifacimento dello strato di usura e strati sottostanti dell'autostrada A4.

## 2 *Materiali*

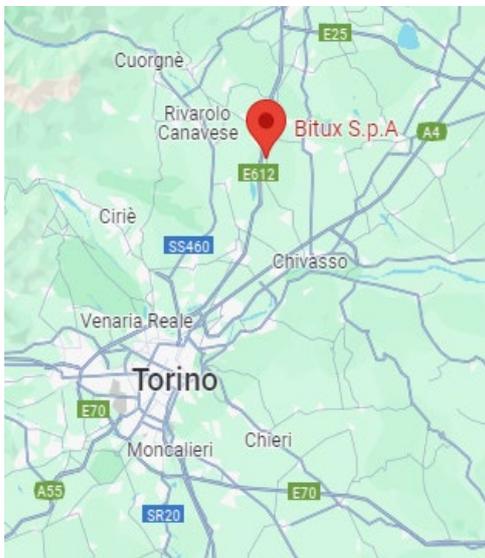
### 2.1 **Introduzione**

In questo capitolo inizialmente verranno descritti quelli che sono i materiali costituenti i conglomerati bituminosi realizzati in laboratorio, per poi presentare le famiglie di miscele con i relativi dosaggi e le sottocategorie ottenute modificando il quantitativo di legante totale.

I materiali implementati per la produzione delle miscele sono:

- aggregati vergini;
- aggregati di riciclo (fresato);
- bitume tal quale;
- bitume modificato con polimero (PMB);
- rejuvenator;
- compound polimerico composto al 100% da plastiche di riciclo per l'implementazione ibrida.

Gli aggregati vergini e il RAP sono stati prelevati presso Bitux S.p.a, un'azienda piemontese specializzata nell'asfaltatura di strade ed autostrade, a Foglizzo, dove è stato anche possibile visitare il loro centro di produzione di conglomerati bituminosi.



*Figura 10: posizione di Bitux S.p.a.*



*Figura 9: centro di produzione Bitux S.p.a.*

Per quanto concerne il compound polimerico di recupero utilizzato per la modifica a secco, esso è stato fornito da Iterchimica con la denominazione di SuperPlastEco.

## 2.2 Aggregati

### 2.2.1 *Aggregati vergini*

Seguendo le specifiche del CSA dell'autostrada A4 per la realizzazione di uno strato di collegamento AC16, gli aggregati vergini utilizzati con i relativi range granulometrici sono i seguenti:

- sabbia 0-5 mm;
- pietrisco 8-16 mm;
- pietrisco 16-20 mm, ottenuto da vagliatura di un pietrisco 16-22 mm;
- filler <0.063 mm.



*Figura 11: classi granulometriche degli aggregati vergini*

La tabella 1 che segue riporta la distribuzione granulometriche delle classi di aggregati sopra elencate.

Setaccio (mm)	Sabbia 0-5 (%)	Pietrisco 8-16 (%)	Pietrisco 16-20 (%)	Filler (%)
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0
20	100.0	100.0	100.0	100.0
16	100.0	100.0	43.4	100.0
12.5	100.0	82.2	5.6	100.0
8	100.0	12.0	1.9	100.0
4	76.1	0.5	1.6	100.0
2	42.1	0.4	1.6	100.0
0.5	18.7	0.4	1.3	100.0
0.25	12.0	0.4	1.2	100.0
0.063	3.0	0.3	0.8	97.2

*Tabella 1: distribuzione granulometriche delle classi di aggregati vergini*

### **2.2.2 RAP**

Il fresato impiegato in questo lavoro di tesi è stato ricavato dalla fresatura di un'autostrada della Valle d'Aosta, è un RAP misto in quanto deriva da scarifica di strati di: base, collegamento ed usura.

Come riportato nel sottoparagrafo 1.2.3 per garantire un input affidabile ed omogeneo, il fresato ha subito preventivamente operazioni di vagliatura, frantumazione e frazionamento.

Le classi granulometriche di fresato impiegate con i relativi range sono le seguenti:

- RAP 0-12 mm;
- RAP 0-20 mm.



*Figura 12: classi granulometriche di fresato*

La tabella 2 riporta la distribuzione granulometrica delle due classi di RAP bianco, dunque solo la parte litica, mentre la tabella 3 contiene le percentuali di bitume contenute, rispetto al peso della parte litica, dagli aggregati di fresato. Questi ultimi valori sono stati ricavati mediando più risultati di prove di ignizione

RAP 0-12 (%)	RAP 0-20 (%)
100.0	100.0
100.0	100.0
100.0	97.2
100.0	89.0
91.0	61.1
64.7	35.4
48.3	25.8
26.7	15.4
18.7	11.3
9.9	5.9

*Tabella 2: distribuzione granulometriche delle classi di fresato*

Pb (%)	
RAP 0-12	RAP 0-20
5.45%	4.15%

*Tabella 3: contenuto di bitume associato alle classi di fresato*

### 2.2.3 Curva granulometrica di progetto

La curva granulometrica di progetto è stata precedentemente calcolata nell'ambito di un lavoro di dottorato di ricerca all'interno del quale si inserisce il presente elaborato.

Il grafico di progetto è stato ricavato utilizzando il fuso granulometrico consigliato dal CSA dell'autostrada A4 e quello del SIIV.

Il primo passo è stato ricavare la curva di riferimento ponendosi nel centro dei limiti dei due CSA.

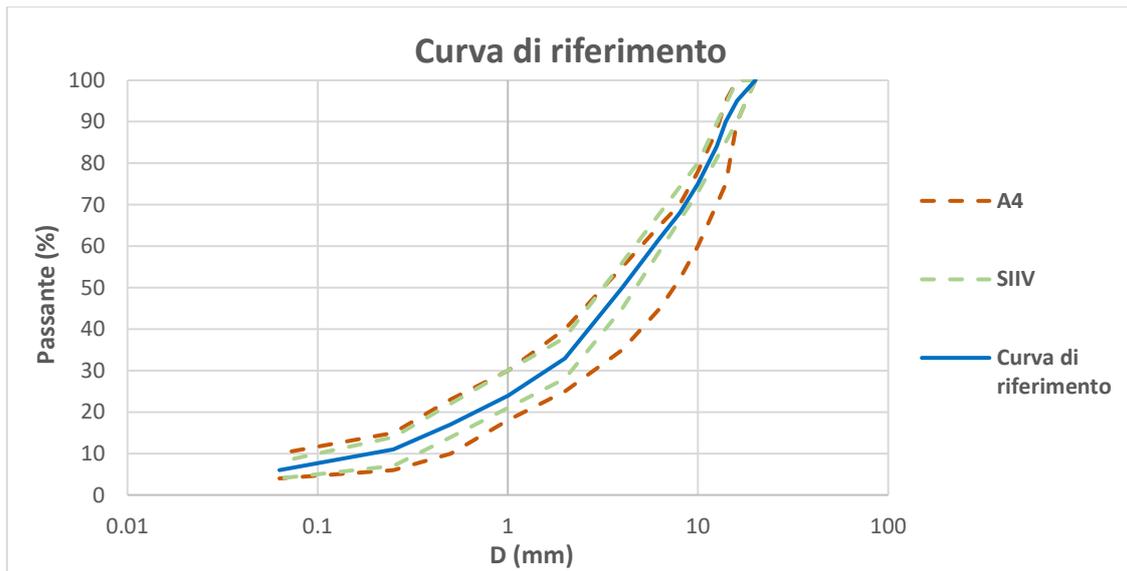


Figura 13: curva di riferimento

Successivamente, minimizzando lo scarto con il grafico di riferimento, si è ottenuto la curva di progetto rappresentata in figura 14.

Setaccio (mm)	Sabbia 0-5 (%)	Pietrisco 8-16 (%)	Pietrisco 16-20 (%)	RAP 0-12 (%)	RAP 0-20 (%)	Filler (%)	Curva di progetto (%)	Curva di riferimento (%)	Scarto (-)
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
16	100.0	100.0	43.4	100.0	97.2	100.0	93.0	95.0	3.9
12.5	100.0	82.2	5.6	100.0	89.0	100.0	85.3	84.0	1.6
8	100.0	12.0	1.9	91.0	61.1	100.0	69.3	68.0	1.7
4	76.1	0.5	1.6	64.7	35.4	100.0	48.4	50.0	2.4
2	42.1	0.4	1.6	48.3	25.8	100.0	32.2	33.0	0.6
0.5	18.7	0.4	1.3	26.7	15.4	100.0	17.1	17.0	0.0
0.25	12.0	0.4	1.2	18.7	11.3	100.0	12.1	11.0	1.1
0.063	3.0	0.3	0.8	9.9	5.9	97.2	5.8	6.0	0.0

Tabella 4: definizione della curva di progetto

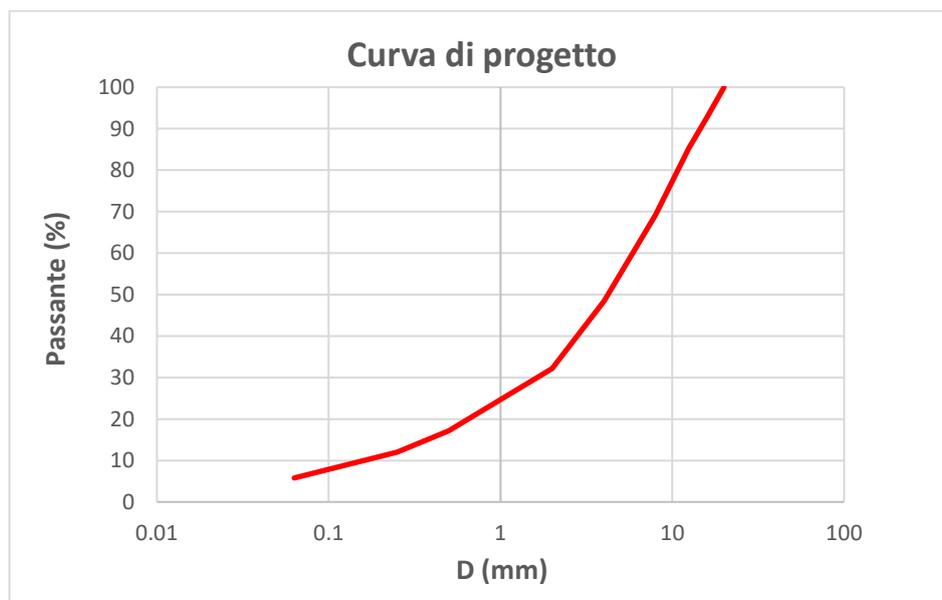


Figura 14: curva di progetto

## 2.3 Bitume

I leganti impiegati per la realizzazione delle miscele sono due:

1. bitume tal quale, impiegato in tutte le miscele in cui le plastiche sono state integrate con metodologia ibrida;
2. bitume modificato con polimero (PMB), utilizzato per le miscele caratterizzate dal processo umido. Non è nota la percentuale di modifica, ma è un bitume hard e, dunque, con alto contenuto di plastica.

Grazie ad un lavoro di tesi parallelo è stato possibile caratterizzare i due bitumi impiegati secondo la classificazione empirica, o tradizionale, (tabella 5) e quella prestazionale, o Superpave (tabella 6).

Bitume tal quale	
P <sub>25</sub> <sup>°C</sup> (dmm)	70.0
T <sub>R</sub> (°C)	48.1

 **BITUME 50/70**

Bitume PMB	
P <sub>25</sub> <sup>°C</sup> (dmm)	55.3
T <sub>R</sub> (°C)	80.3

 **PMB CLASSE 4**

*Tabella 5: classificazione empirica dei bitumi*

Bitume tal quale	
Low PG (°C)	-22.0
High PG E (°C)	46.0

 **PG 46 E - 22**

Bitume PMB	
Low PG (°C)	-22.0
High PG E (°C)	64.0

 **PG 64 E - 22**

*Tabella 6: classificazione prestazionale dei bitumi*

## 2.4 Rejuvenator

Il conglomerato bituminoso, così come ogni altro materiale, presenta alcune criticità. Una di queste è la dipendenza delle sue proprietà fisiche e meccaniche dalle condizioni ambientali.

Il principale fattore di deterioramento risulta essere l'invecchiamento del legante bituminoso, ciò si verifica a cause delle alte temperature, dell'umidità e della presenza di ossigeno (Pyrig et al, 2022).

Il fresato, come già descritto, non è altro che un insieme di aggregati ricoperti da bitume invecchiato.

Quest'ultimo, per potersi considerare attivo, deve ammorbidirsi e riacquistare le sue proprietà leganti.

I così detti rejuvenator svolgono proprio queste funzioni, ristabilendo i corretti rapporti chimici tra i costituenti del bitume così da rigenerare la capacità legante.

Il prodotto impiegato nel lavoro di tesi è denominato ITERLENE ACF 2000 GREEN ed è un additivo liquido di nuova generazione, un mix di oli vegetali, con alte

proprietà ringiovanenti ed elevato flash point. La ditta produttrice consiglia un dosaggio di circa lo 0.30% sul peso del RAP impiegato.

Nella figura seguente vengono riportate alcune proprietà fisiche.

PHYSICAL PROPERTIES	
Aspect	liquid
Color	Brown - Purple
Density at 80°F (25°C)	0.93 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity at 80°F (25°C )	100 ± 50 cP
Flash point	> 390°F (200°C)
Water content	< 2%

*Figura 15: proprietà fisiche del rejuvenator impiegato*

Per quanto concerne le tempistiche di applicazione del rejuvenator, esso è stato applicato, secondo il dosaggio consigliato, 30 minuti prima della miscelazione, spruzzandolo sul fresato in modo omogeneo e mescolando.



*Figura 16: esempio di applicazione del rejuvenator*

## 2.5 Plastiche di riciclo

La parte polimerica impiegata per la modifica con metodologia ibrida della miscela bituminosa è stata resa disponibile dalla società Iterchimica.

Il prodotto, dal nome SuperPlastEco, è un compound polimerico 100% di riciclo, la sua composizione chimica risulta protetta da brevetto industriale.

Nella figura 17 vengono riportate tutte le informazioni disponibili sulle plastiche impiegate, da evidenziare come la temperatura di fusione sia circa di 170°C, aspetto

chiave poiché la temperatura di miscelazione sarà la medesima, così da consentire la modifica di forma del polimero che è alla base del processo ibrido.

La figura 18, invece, permette di comprendere forma e grandezza delle particelle.

**COMPOSIZIONE**

Miscela di plastiche tecno-selezionate da recupero.

**PROPRIETÀ**

Aspetto	granuli
Colore	tonalità di grigio
Densità apparente a 25°C	0,4 - 0,6 g/cm <sup>3</sup>
Punto di rammollimento	160 - 180°C

*Figura 17: estratto della scheda tecnica del compound polimerico impiegato (fonte: Iterchimica)*



*Figura 18: materiale polimerico SuperPlastEco*

## 2.6 Presentazione delle miscele

Al fine di tragguardare gli obiettivi del lavoro di tesi sono state realizzate 3 famiglie di miscele, all'interno di esse sono presenti delle sotto-miscele caratterizzate da diversi quantitativi di legante totale.

Le miscele prodotte sono:

- SP1: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator, 0.3% (sul peso della miscela) del compound polimerico di riciclo implementato tramite metodologia ibrida e, infine, una percentuale variabile di legante vergine tal quale (per questa miscela sono stati investigati 5 contenuti differenti);
- SP2: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator, 0.5% (sul peso della miscela) del compound polimerico di riciclo implementato tramite metodologia ibrida e, infine, una percentuale variabile di legante vergine tal quale (per questa miscela sono stati investigati 3 contenuti differenti);
- PMB: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator e, infine, una percentuale variabile di bitume modificato con processo umido (per questa miscela sono stati investigati 4 contenuti differenti);
- RIF: 100% di aggregati vergini, 0.3% di polimero con metodologia ibrida ed un solo dosaggio di legante tal quale. Non è da considerare una vera e propria miscela, ma come dei provini di riferimento utili per scindere il contributo del RAP, essendone privi, dal ruolo delle plastiche.

Inizialmente le singole sotto-miscele sono state ottenute partendo da 60kg di materiale così da poter realizzare 3 provini volumetrici (compattati a 200 giri,  $N_{max}$ ), 6 provini per i test di fatica (compattati a 120 giri,  $N_{design}$ ) e prove di caratterizzazione di base al fine di identificare la massima massa volumica teorica della miscela e l'esatto contenuto di legante (via ignizione).

Ricavato in questo modo un dataset iniziale ricco e consistente, per accelerare il lavoro ed ottenere più dati possibili su più contenuti di legante, si è passati a realizzare miscele a partire da 9kg di materiale così da compattare un provino volumetrico ed uno a fatica.

La tabella 7 sottostante permette di visualizzare le diverse miscele, le quantità di materiale ed i dosaggi di bitume.

Famiglia	Miscela	Materiale (kg)	Pb (%)	Pb_RAP (%)	Pb_VERG (%)
S P 1	SP1 4.0	60	3.99	2.37	1.18
	SP1 4.1	60	4.09	2.36	1.29
	SP1 4.6	9	4.60	2.35	1.80
	SP1 5.2	60	5.18	2.32	2.42
	SP1 5.4	60	5.41	2.51	2.46
S P 2	SP2 4.3	9	4.34	2.36	1.33
	SP2 4.8	9	4.80	2.35	1.80
	SP2 5.2	9	5.31	2.34	2.30
P M B	PMB 3.7	9	3.64	2.38	1.11
	PMB 4.3	9	4.26	2.36	1.75
	PMB 4.6	9	4.56	2.35	2.06
	PMB 5.0	9	5.01	2.34	2.51
R I F	RIF 4.0	9	3.97	-	3.70

Tabella 7: miscele realizzate

Con riferimento alla tabella 7, la seconda colonna contiene, oltre al codice relativo alla famiglia, il quantitativo di legante totale target, mentre le colonne 4-5-6 sono rispettivamente: il contenuto di legante ottenuto tramite prova di ignizione, la percentuale di bitume contenuto dal RAP, secondo la tabella 3 paragrafo 2.2.2, e, infine, il quantitativo di legante vergine di aggiunta da “ricetta”.

È possibile notare come il contenuto di legante offerto dal fresato sia pressoché costante, con un valore medio intorno al 2.36%, tranne per la miscela SP1 5.4.

Quest’ultima, la prima realizzata, è stata caratterizzata da un campionamento del RAP in impianto non perfetto, il fresato è stato prelevato unicamente dalla parte alta del cumulo di aggregati senza un’opportuna e preventiva omogenizzazione e miscelazione.

Tale aspetto permette di sottolineare, come visto nel paragrafo 1.2.3, le criticità nella gestione di questo tipo di materiale caratterizzato da forte eterogeneità sia dal punto di vista granulometrico che di dosaggio di bitume rilasciato in fase di miscelazione.

## ***3 Campagna sperimentale***

### **3.1 Introduzione**

Nel presente capitolo sarà descritta la campagna di prove sperimentali condotta, presso il Laboratorio di Materiali Stradali del DIATI del Politecnico di Torino, al fine di caratterizzare dal punto di vista fisico e meccanico le miscele presentate nel capitolo precedente.

Inoltre, saranno illustrate le procedure di miscelazione implementate nel lavoro di tesi che differiscono sia fra miscele con integrazione ibrida della plastica (SP1 ed SP2) ed umida (PMB) sia con la miscela priva di materiale fresato (RIF).

Un'ulteriore distinzione presente in fase di miscelazione riguarda il quantitativo di materiale coinvolto.

Il miscelatore meccanico è stato impiegato per la realizzazione delle miscele da 60 kg di materiale, mentre per quelle costituite da 9 kg la miscelazione è avvenuta manualmente in due fasi distinte, prima 5 kg e, successivamente, i 4 kg restanti.

Nelle immagini sottostanti vengono riportate le due attrezzature impiegate: il miscelatore meccanico (figura 19) e quello manuale (figura 20).



*Figura 19: miscelatore meccanico*



*Figura 20: miscelatore manuale*

Da ogni miscelazione (BS EN 12697-35) sono stati ricavati tramite compattazione con pressa a taglio giratoria (BS EN 12697-31):

- provini volumetrici, diametro 150 mm, compattati a 200 giri (Nmax), 3 per le miscele da 60 kg ed 1 per le miscele da 9 kg;
- provini destinati alla fatica diametro 150 mm, compattati a 120 giri (Ndesign), 6 per le miscele da 60 kg ed 1 per le miscele da 9 kg.

I provini compattati a 200 giri sono stati, poi, testati come segue:

- prova di bulk density con procedura SSD, saturated surface dry (BS EN 12697-6);
- taglio del provino per raggiungere un'altezza target di 60 mm;
- nuova prova di bulk density sul campione tagliato;
- verifica dei moduli di rigidezza alle temperature di 10°C, 20°C e 40°C (BS EN 12697-26 Annex C);
- prova ITS (BS EN 12697-23).

Per quanto concerne la metodologia dei test svolti sui provini a Ndesign è la seguente:

- prova di bulk density;
- moduli di rigidezza alla temperatura di 20°C;
- test a fatica (BS EN 12697-24 Annex F).

In parallelo sono state condotte test per la determinazione della massima massa volumica teorica, MMVT o TMD, (BS EN 12697-5) e prove di ignizione, carbolite, (BS EN 12697-39) per verificare il corretto quantitativo di legante totale.

Quest'ultima grandezza, in questo lavoro, è stata considerata come somma di più aliquote:

1. il legante vergine di aggiunta, tal quale o modificato;
2. il bitume proveniente dal fresato;
3. le plastiche di riciclo che, essendo miscelate con metodologia ibrida, presentano un punto di fusione all'incirca pari alla temperatura di miscelazione e per questo, fondendosi, partecipano al ricoprimento degli aggregati e conferiscono proprietà leganti;

4. il rejuvenator, contributo quasi trascurabile poiché presente solo come 0.15% sul peso della miscela e, inoltre, alla temperatura di miscelazione una piccola aliquota tende ad evaporare.

## **3.2 Miscelazione**

La procedura di miscelazione è stata concepita con l'obiettivo di essere simulativa di ciò che avviene in impianto.

Prima di descriverla in dettaglio è necessario presentare le 3 attività che precedono la miscelazione:

1. quartatura degli aggregati;
2. essiccazione degli aggregati;
3. definizione del quantitativo di tutti i materiali.

### ***3.2.1 Quartatura degli aggregati***

Il materiale litico vergine e di riciclo viene raccolto dall'impianto in container da circa 40 kg. L'input della miscelazione deve essere un materiale omogeneo e rappresentativo del lotto così da rispettare la curva granulometrica.

Per tali ragioni il quantitativo inizialmente raccolto viene suddiviso in due parti uguali da circa 20 kg che, a loro volta, vengono quartati e stoccati in container più piccoli e leggeri.

Tale operazione è stata realizzata tramite un quartatore così da garantire un'efficace e precisa divisione del materiale.

### ***3.2.2 Essiccazione degli aggregati***

Oltre che omogeneo il materiale prima di essere miscelato deve essere privo di umidità, essa può, infatti, falsare il peso degli aggregati.

Negli impianti discontinui prima di arrivare alla cima della torre di miscelazione, gli aggregati vengono riscaldati ad alte temperature, anche superiori ai 300°C, per circa 30 secondi. Successivamente a tale operazione gli aggregati di primo impiego vengono vagliati e stoccati. Questa operazione consente di inserire nel tamburo di miscelazione il corretto peso di ogni classe granulometrica, priva di umidità.

In figura 21 è possibile osservare lo schema di funzionamento di un impianto discontinuo con particolare attenzione alla fase di essiccazione degli aggregati tramite un tamburo rotante.

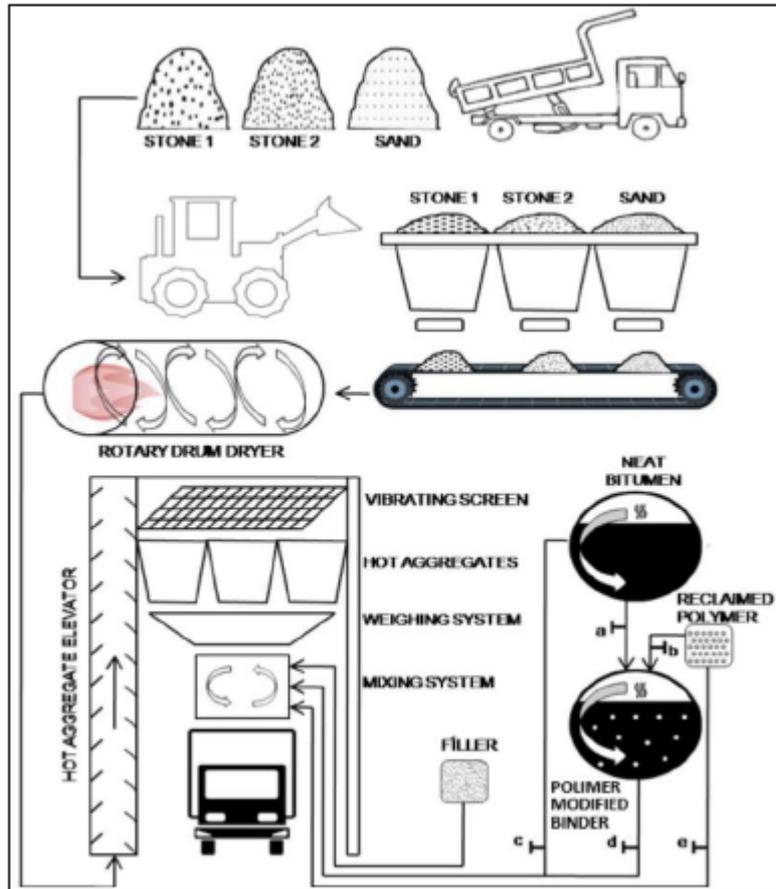


Figura 21: schema di funzionamento di un impianto discontinuo (fonte: Brasileiro et al, 2019)

In laboratorio, non essendo possibile raggiungere temperature troppo elevate, gli aggregati vergini vengono riscaldati alla temperatura di 110°C per una notte. Per essere considerati asciutti è necessario che 3 pesate successive, a distanza di 1 ora, diano la stessa massa.

Per quanto concerne il fresato, utilizzare alte temperature per grandi durate potrebbe invecchiare, ulteriormente, il legante che ricopre gli aggregati, compromettendone le proprietà.

Si è scelto, dunque, di asciugare il RAP a 40°C per 5 giorni.

Dopo averli rimossi dai forni e pesati, tutti gli aggregati vengono disposti in sacchi, opportunamente sigillati, per evitare l'esposizione a nuova umidità.

Grazie a queste operazioni la parte litica del futuro conglomerato bituminoso è pronta alla miscelazione.



*Figura 22: fase di essiccazione degli aggregati vergini*

### **3.2.3 Definizione dei quantitativi**

A partire dalla curva granulometrica di progetto, definita nel paragrafo 2.2.3, è stato possibile definire i quantitativi di tutti i materiali costituenti la miscela nota la massa target finale, ovvero 60 kg o 9 kg (figura23).

Per ogni famiglia di miscela è stato creato un calcolatore, grazie al quale, modificando il quantitativo di legante totale e di massa finale di conglomerato, si possono ottenere in grammi le aliquote di tutti i costituenti.

Di seguito viene riportata, a scopo di esempio, la tabella 8 utilizzata per determinare le masse da impiegare per la realizzazione della miscela SP1 4.1, da 60 kg.

SP1 4.1	rispetto al peso degli aggregati (%)	rispetto al peso della miscela (%)	m da impiegare (g)
Sabbia 0/5	27.63	26.49	15896.97
Pietrisco 8/16	10.32	9.90	5938.32
Pietrisco 16/22	11.35	10.88	6528.34
RAP 0/12 bianco	30.00	28.77	17260.23
RAP 0/20 bianco	20.00	19.18	11506.82
Filler	0.70	0.67	403.41
Legante totale	4.29	4.11	2465.91
Bitume RAP 0/12	1.64	1.57	940.68
Bitume RAP 0/20	0.83	0.80	477.53
Bitume vergine	1.35	1.30	777.06
Polimero	0.31	0.30	180.08
Rejuvenator	0.16	0.15	90.56
RAP 0/12 TOTALE	31.64	30.33	18200.91
RAP 0/20 TOTALE	20.83	19.97	11984.35
RAP TOTALE	52.47	50.31	30185.26
<b>TOTALE</b>	<b>104.29</b>	<b>100.00</b>	<b>60000.00</b>

Tabella 8: definizione dei quantitativi di materiale per una miscela SPI



Figura 23: preparazione dei quantitativi di aggregati da “ricetta”

È opportuno chiarire come, a seconda della miscela da realizzare, le aliquote in percentuale all'interno dei calcolatori sono state modificate: le miscele SP2 contengono una percentuale di polimero dello 0.50% sul peso della miscela, le PMB non contengono plastiche di aggiunta, mentre la miscela di riferimento è priva di RAP.

Per quanto concerne quest'ultima sono state determinate delle nuove aliquote percentuali di aggregati vergini per traguardare nel miglior modo possibile la curva di progetto.

Nella tabella 9 sottostante viene riportato il calcolatore utilizzato per i quantitativi della miscela RIF (ottenuta con due miscelazioni successive una da 5 kg e una da 4 kg), grazie al quale è possibile evidenziare le diverse percentuali della parte litica e la totale assenza di fresato e, dunque, anche di rejuvenator.

Per tali ragioni il legante totale della miscela di riferimento è determinato solo dalle aliquote di legante vergine e plastiche.

RIF 4.0	rispetto al peso degli aggregati (%)	rispetto al peso della miscela (%)	m da impiegare (g)
Sabbia 0/5	60.21	57.80	2890.21
Pietrisco 8/16	23.52	22.58	1128.86
Pietrisco 16/22	11.41	10.96	547.86
RAP 0/12 bianco	0.00	0.00	0.00
RAP 0/20 bianco	0.00	0.00	0.00
Filler	4.85	4.66	232.92
Legante totale	4.17	4.00	200.15
Bitume RAP 0/12	0.00	0.00	0.00
Bitume RAP 0/20	0.00	0.00	0.00
Bitume vergine	3.86	3.70	185.13
Polimero	0.31	0.30	15.02
Rejuvenator	0.00	0.00	0.00
RAP 0/12 TOTALE	0.00	0.00	0.00
RAP 0/20 TOTALE	0.00	0.00	0.00
RAP TOTALE	0.00	0.00	0.00
<b>TOTALE</b>	104.17	100.00	5000.00

Tabella 9: definizione dei quantitativi di materiale per la miscela di riferimento

### ***3.2.4 Procedura di miscelazione***

Uno dei futuri campi di ricerca, collegati a questo lavoro di tesi, è rappresentato dalla comprensione della fattibilità tecnica di produzione di miscele sostenibili, ad alto contenuto di fresato e plastiche di riciclo, in impianto e, dunque, in larga scala.

Per tale ragione la procedura di miscelazione che è stata concepita vuole simulare in piccola scala, per quanto possibile, ciò che avviene in un impianto di miscelazione discontinuo, come quello della Bitux S.p.a. (impresa fornitrice degli aggregati e dei bitumi impiegati).

Di seguito vengono descritte le fasi della miscelazione svolta in laboratorio tramite miscelatore meccanico (miscele da 60 kg) o manuale (9 kg):

1. riscaldare gli aggregati vergini alla temperatura di 280°C (massima temperatura consentita dai forni del laboratorio) per 2 ore;
2. mantenere il fresato a 70°C per 1.5 ore, spruzzare il corretto dosaggio di rejuvenator e lasciare in forno per ulteriori 30 minuti.
3. inserire gli aggregati vergini dalla pezzatura più grande alla pezzatura più piccola nel miscelatore impostato alla temperatura di 170°C e miscelare per 30 secondi;
4. immettere il RAP e miscelare per 1 minuto;
5. aggiungere il quantitativo di SUPER-PLAST ECO e mescolare per 2 minuti;
6. inserire metà del bitume vergine (160°C) e metà filler (160°C) e miscelare a bassa velocità per 30 secondi;
7. completare con la restante parte di legante e filler mescolando per 3 minuti a bassa velocità;
8. continuare per 1 minuto ad alta velocità;
9. mantenere la temperatura di miscelazione (170°C) per 15 minuti;
10. miscelare il conglomerato per ulteriore 1 minuto a bassa velocità e 30 secondi ad alta velocità.

La temperatura di miscelazione di 170°C è sia coerente con quelle adottate in impianto sia la temperatura di fusione del compound polimerico impiegato.

Per una corretta applicazione della metodologia ibrida, di implementazione della plastica, questo aspetto è necessario affinché il polimero, modificando la sua forma, vada a coprire l'aggregato e, parzialmente, a fondersi con il legante bituminoso.

Si vuole, adesso, per i vari punti descritti trovare i relativi parallelismi con un impianto di miscelazione discontinuo.

In tale luogo il primo punto viene svolto contemporaneamente all'attività propedeutica dell'essiccazione (paragrafo 3.2.2), infatti in impianto gli aggregati vergini subiscono un riscaldamento iniziale ad alte temperature, superiori ai 300°C, per circa 30 secondi, prima di giungere sulla cima della torre di miscelazione e subire vagliatura e pesatura.

La fase 2 risulta poco simulativa o, meglio, rispecchia solo ciò che avviene in impianti moderni predisposti all'utilizzo di grandi quantitativi di fresato.

Qui il RAP viene pre-riscaldato in tamburi a basse temperature e lontano da fiamme vive, per evitare pericoli correlati al contatto del legante invecchiato con il fuoco.

Dopo tale fase, prima di giungere nel tamburo principale di miscelazione, avviene l'aggiunta del rejuvenator.

Negli impianti tradizionali gli aggregati di riciclo vengono semplicemente aggiunti a temperatura ambiente, con successiva necessità di aumentare la temperatura di miscelazione, mentre l'additivo ammorbidente viene inserito insieme al bitume vergine.

I punti 6 e 7, aggiunte di legante e filler, in impianto avvengono in una fase unica in pochi secondi. In laboratorio, date le dimensioni ridotte delle attrezzature impiegate, l'inserimento simultaneo della totalità di bitume e filler avrebbe portato alla formazione di un mastice bituminoso completamente slegato dagli aggregati senza alcuna funzione di ricoprimento.

Gli ultimi due punti, più che simulare ciò che avviene in impianto, vogliono emulare quanto segue ovvero: il trasporto (punto 9) e la prima stesa tramite vibro-finitrice (punto 10).

Anche in questo ambito sono necessaria delle modifiche alla procedura per le diverse famiglie di miscele.

Tra SP1 ed SP2, aumentando solo il dosaggio di plastica, non ci sono variazioni.

La PMB è priva del compound polimerico e, dunque, priva anche in fase di miscelazione del punto 5.

La miscela di riferimento, senza fresato, è quella che presenta la differenza principale. La temperatura di riscaldamento agli aggregati vergini, tale da provocare

shock termico con quella molto più bassa del RAP e decretare una temperatura di equilibrio di circa 170°C, deve essere modificata.

La parte litica della miscela RIF è stata riscaldata a 200°C cosicché, assumendo delle perdite di calore dal forno al miscelatore, la temperatura fosse coerente con i 170°C di miscelazione.

Di seguito vengono riportate alcune immagini delle miscele eseguite.



*Figura 27: aggiunta del bitume vergine*



*Figura 26: aggiunta del filler*



*Figura 24: risultato della miscelazione manuale*



*Figura 25: risultato della miscelazione meccanica*

### 3.3 Valutazione del contenuto di legante

#### 3.3.1 Descrizione del parametro

Verificare che il contenuto di legante della miscela rispecchi quello concepito in fase di miscelazione è un aspetto fondamentale per la caratterizzazione del conglomerato bituminoso.

In questo elaborato, in particolare, diventa un mezzo atto a verificare l'omogeneità del contributo di legante offerto dal fresato che, come detto, è un parametro da attenzionare.

L'aliquota di fase legante, infatti, influenza tutte le successive proprietà sia fisiche che meccaniche dei campioni.

Per ottenere tale percentuale, le miscele sono state testate con una prova di ignizione secondo la normativa BS EN 12697-39.

Il metodo B del testo prevede l'utilizzo di un forno, bilance esterne, un castelletto forato dove predisporre il materiale e un vassoio di raccolta.

Il quantitativo di massa da testare viene definito in funzione della dimensione massima nominale degli aggregati (NMA) secondo la tabella 10 da normativa.

Nominal maximum aggregate size mm	Mass of sample g	Maximum constant mass limit g
4	1 000 to 1 400	0,15
5,6 or 6,3 or 8 or 10	1 000 to 1 600	0,15
11,2 or 12,5 or 14 or 16	1 000 to 1 700	0,20
20 or 22,4	1 000 to 2 400	0,25
31,5	1 000 to 3 000	0,30
40 or 45	1 000 to 4 000	0,40

Tabella 10: quantitativo di massa per il test di ignizione (fonte: BS EN 12697-39)

Il valore di NMA pari a 16 mm porta ad utilizzare una massa compresa fra 1.0 kg ed 1.7 kg.

### 3.3.2 Procedura

Di seguito vengono elencate tutte le fasi per un corretto test di ignizione:

1. il forno viene portato alla temperatura di prova (540 °C);
2. il campione deve essere preriscaldato a 110 °C per asciugarlo e consentirne la lavorabilità;
3. misurare la massa ( $W_t$ ) del cestino di campionamento e del vassoio di raccolta opportunamente ripuliti da residui;
4. disporre il campione in modo omogeneo sui due livelli del castello e prenderne la massa ( $W_{t+s}$ );
5. inserimento dell'attrezzatura nel forno alla temperatura di 540°C fino a quando non si registrano più perdite di massa;
6. rimozione del cestino di campionamento, messa in sicurezza tramite schermo protettivo;
7. una volta a temperatura ambiente viene misurata la massa finale ( $W_{t+m}$ ).

### 3.3.3 Calcolo

Tutte le masse devono essere espresse in grammi (g) con la precisione di 0.1 g.

La massa iniziale del campione è valutata come segue:

$$W_s = W_{t+s} - W_t$$

Dove:

- $W_s$  massa del campione iniziale (g);
- $W_{t+s}$  massa del campione più attrezzatura (g);
- $W_t$  massa attrezzatura (g)

Mentre la massa finale del campione risulta:

$$W_a = W_{t+a} - W_t$$

Con:

- $W_a$  massa del campione post ignizione (g);
- $W_{t+a}$  massa del campione post ignizione con attrezzatura di prova (g);
- $W_t$  massa attrezzatura (g).

Infine, la percentuale finale di legante si ottiene dalla formula:

$$B = \frac{(W_s - W_a)}{W_s} \times 100 - C_F$$

- B percentuale di legante (%);
- $W_s$  massa del campione iniziale (g);
- $W_a$  massa del campione post ignizione (g);
- $C_F$  fattore di calibrazione (%).

Il fattore di calibrazione consente di tenere in considerazione e, dunque, escludere dal legante la parte volatile dell'aggregato che volatilizza per le elevate temperature.

Il lavoro di dottorato, che include il presente elaborato di tesi, ha riscontrato una percentuale di volatilizzazione dello 0.23%. Tale aliquota è stata dimezzata, poiché gli aggregati vergini rappresentano solo per metà lo scheletro litico delle miscele, per ottenere un  $C_F$  di 0.12%.

### 3.3.4 Fotografie



Figura 28: forno carbolite



Figura 29: inserimento del campione



Figura 30: cestino di campionamento e vassoio di raccolta



Figura 32: massa iniziale del campione + attrezzatura ( $W_s+t$ )



Figura 31: massa finale più attrezzatura ( $W_a+t$ )

### 3.4 Determinazione della massima massa volumica teorica

#### 3.4.1 Descrizione del parametro

La massima massa volumica teorica, MMVT o TMD, indica la densità che avrebbe la miscela se fosse priva di vuoti.

Essa rappresenta un parametro indispensabile per la valutazione dei vuoti d'aria dei provini dopo la compattazione.

La prova di determinazione della TMD è stata effettuata seguendo la procedura volumetrica, con acqua, della norma BS EN 12697-5.

#### 3.4.2 Procedura

Il corretto svolgimento della prova prevede:

1. preparare un campione di materiale sciolto, con una massa minima di 50 volte la N<sub>MAS</sub> in mm.
2. riscaldarlo in forno alla temperatura di  $110 \pm 5$  °C fino ad essere lavorabile;
3. disporre il campione sciolto su una superficie, opportunamente pulita con solvente, e disgregare manualmente in modo accurato, allontanando gli aggregati fini da quelli grossolani;
4. quartare il materiale come illustrato dalla norma BS EN 12697-38 così da ottenere due campioni pronti per essere testati;

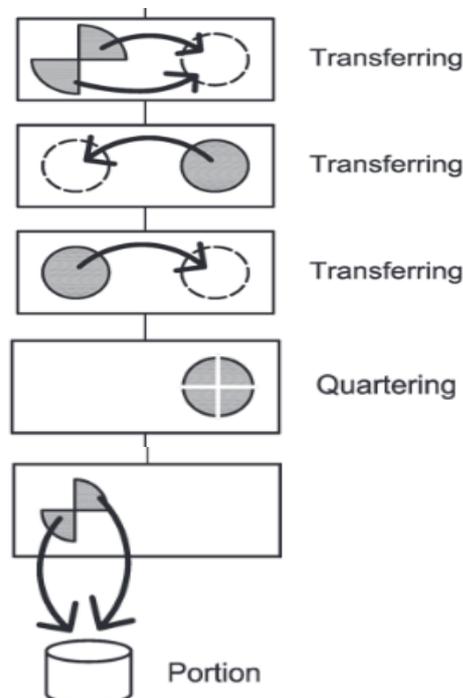


Figura 33: procedura di quartatura del campione  
(fonte: BS EN 12697-38)

5. utilizzare due picnometri di volume noto e prenderne la massa comprensiva del tappo dello strumento ( $m_1$ );
6. inserire i due campioni di miscela e registrare le masse ( $m_2$ );
7. riempire con acqua distillata e, precedentemente, deaerata fino a circa 3 dita sopra la superficie degli aggregati;
8. collegarli ad un sistema capace di deaerare il contenuto dei picnometri per circa 30 minuti, agitando ogni 2 minuti;
9. inserire nuovamente il tappo del picnometro e riempirlo fino ad creare il menisco di acqua, registrando, così la massa finale ( $m_3$ );
10. misurare la temperatura dell'acqua all'interno del picnometro.

### 3.4.3 Calcolo

Il calcolo delle TMD si effettua applicando le seguenti formulazioni.

$$\rho_w = 1,00025205 + \left( \frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6} \right)$$

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \times V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}}$$

Dove:

- $\rho_w$  è la densità dell'acqua funzione della temperatura ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ );
- $t$  è la temperatura dell'acqua ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $\rho_{mv}$  è la massima massa volumica teorica ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ );
- $m_1$  è la massa del picnometro con il rispettivo tappo (g);
- $m_2$  è la massa del picnometro con tappo e campione (g);
- $m_3$  è la massa del picnometro con tappo, campione, e pieno di acqua da formare il menisco;
- $V_p$  è il volume del picnometro ( $\text{m}^3$ ).

### 3.4.4 Fotografie



*Figura 34: disgregazione del materiale*



*Figura 35: quartatura del materiale*



*Figura 37: massa picnometro con tappo (m1)*



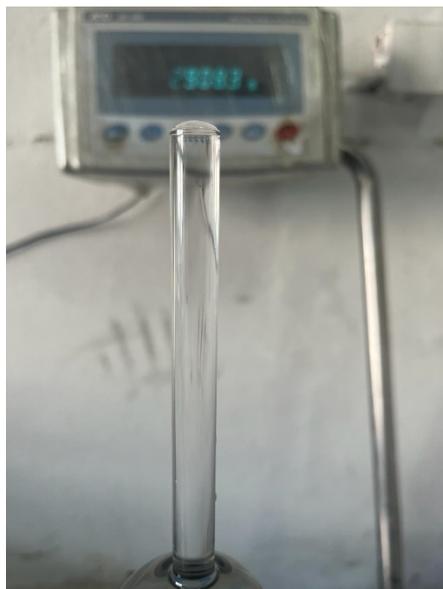
*Figura 38: massa del picnometro con tappo e campione (m2)*



*Figura 36: fase di deaerazione*



*Figura 39: massa del picnometro con tappo, campione ed acqua fino al menisco (m3)*



*Figura 40: particolare del menisco*

### **3.5 Compattazione e valutazione del contenuto di vuoti**

#### ***3.5.1 Descrizione della prova***

La compattazione della miscela permette la formazione dei provini oggetto dei test meccanici e la normativa di riferimento è la BS EN 12697-31.

Presso il Laboratorio di Materiali Stradali del Politecnico di Torino è stato possibile utilizzare una pressa a taglio giratoria. Questo macchinario permette una notevole simulazione di quanto avviene durante una compattazione reale. I rulli implementati sui cantieri stradali, infatti, non si limitano ad applicare solo uno sforzo normale, ma determinano anche degli sforzi taglianti che contribuiscono alla compattazione dello strato di conglomerato bituminoso.

Tale capacità simulativa viene esplicitata dalla macchina tramite due movimenti contemporanei: una compressione statica ed un'azione di taglio. Quest'ultima è determinata dalla rotazione dell'asse del campione, che produce una superficie conica di rivoluzione avente un apice  $O$  con un angolo di  $2\phi$  (figura 41).

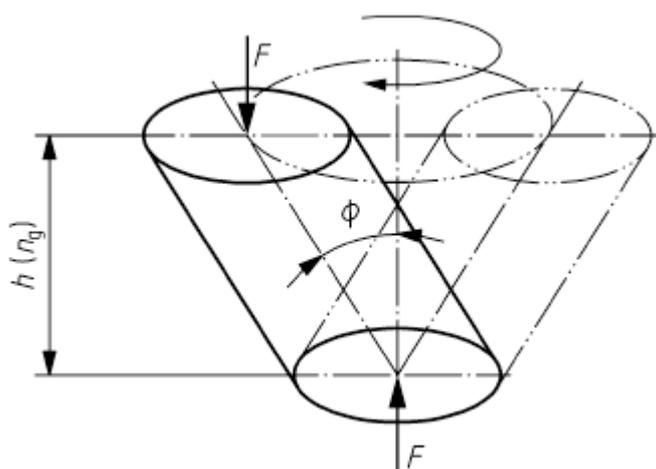


Figura 41: azioni in gioco durante la compattazione con pressa a taglio giratoria (fonte: BS EN 12697-31)

La pressa a taglio giratoria è stata impiegata mantenendo un livello di stress verticale pari a 600 KPa, una velocità di rotazione di 30 giri al minuto ed un angolo di  $1.25^\circ$ .

Durante la compattazione un software collegato al macchinario registra i valori delle altezze del campione per ogni giro.

Tali valori sono poi di fondamentale importanza per:

- graficare la curva di compattazione;
- valutare la lavorabilità della miscela;
- determinare il quantitativo di vuoti dei provini.

Per le miscele oggetto di studio la temperatura di compattazione selezionata è di  $150^\circ\text{C}$ , il diametro dei provini cilindrici, sulla base del valore di NMA, pari a 150 mm e, infine, il numero massimo di giri, da CSA dell'A4, impostato a 200.

### 3.5.2 Procedura

La corretta procedura di compattazione tramite pressa a taglio giratoria, da normativa BS EN 12697-31, prevede:

1. inserire la fustella (diametro 150mm) con relativi inserti metallici alla temperatura di compattazione ( $150 \pm 2^\circ\text{C}$ );
2. portare la miscela sciolta alla temperatura di compattazione;

3. raggiunta la temperatura target, la fustella viene riempita con un quantitativo di massa della miscela precedentemente definito, ponendo un filtro di carta alla base prima del caricamento;
4. riposizionare la fustella piena nel forno e monitorare il nuovo raggiungimento, da parte del cuore del materiale interno, della temperatura di compattazione;
5. estrarre dal forno, applicare una breve e rapida omogenizzazione del materiale tramite spatola metallica, inserire filtro superiore ed inserto finale;
6. trasportare, rapidamente, la fustella in corrispondenza della pressa a taglio giratoria e inserirla negli opportuni alloggiamenti offerti dalla macchina;
7. definito preventivamente il settaggio della macchina, inserendo: stress verticale, diametro e numero di giri, iniziare la procedura di compattazione;
8. al termine della compattazione estrarre il campione cilindrico tramite pistone idraulico.

### 3.5.3 Calcolo

Il primo passo prevede di quantificare la massa da inserire all'interno della fustella per la compattazione. Di seguito viene riportata la formulazione da normativa.

$$M = 10^{-3} \pi \frac{D^2}{4} h_{\min} \rho_M$$

Dove:

- M è la massa da inserire nella fustella (g);
- D è il diametro del campione finale e, dunque, della fustella (mm);
- $h_{\min}$  è la minima altezza del provino compattato, relativa all'assenza di vuoti (mm);
- $\rho_M$  è la massima massa volumica teorica della miscela ( $\text{Mg}/\text{mm}^3$ ).

Per un dato tipo di pressa a taglio giratoria, l'altezza minima ( $h_{\min}$ ) rimarrà costante ed il suo rapporto con il diametro (D) dovrebbe cadere nell'intervallo tra 0.66 e 1.05.

La determinazione della curva di compattazione e dei vuoti necessita di due parametri: la massima massa volumica teorica della miscela di interesse e la densità saturata a superficie asciutta del campione (analizzata nel paragrafo 3.6).

Note queste due grandezze si è operato come segue (a tutti i giri):

1. calcolo della densità geometrica del provino nota altezza, diametro e massa;
2. valutazione dei vuoti geometrici:

$$v_{geom} = 1 - \frac{\rho_{geom}}{\rho_{MMVT}}$$

3. definizione del parametro correttivo (s) per tenere in considerazione che il provino non rappresenta un cilindro perfetto e che si verifica un effetto parete fra la fustella e la miscela inserita:

$$s = \frac{\rho_{SSD\_Nc}}{\rho_{geom\_Nc}}$$

4. calcolo della densità satura a superficie asciutta ( $\rho_{SSD}$ ) dalla correzione tramite s della densità geometrica:

$$\rho_{SSD} = \rho_{geom} \cdot s$$

5. determinazione dei vuoti reali del campione:

$$v_{real} = 1 - \frac{\rho_{SSD}}{\rho_{MMVT}}$$

6. valutazione della percentuale di compattazione (C):

$$C = 1 - v_{real}$$

7. realizzazione della curva di compattazione, diagrammando il logaritmo del numero di giri sulle ascisse e la percentuale di compattazione sulle ordinate;
8. sfruttando una linea di tendenza ed estrapolando l'equazione si possono quantificare la lavorabilità (k) in percentuale e, anche, la percentuale di auto compattazione (C1), ovvero la compattazione iniziale della miscela dopo 1 giro:

$$C = C1 + k \cdot \log Ng$$

Dove:

- $v_{geom}$  sono i vuoti geometrici del campione, considerandolo come un cilindro perfetto (%);
- $\rho_{geom}$  è la densità geometrica del campione;
- $\rho_{MMVT}$  è la massima massa volumica teorica ( $g/cm^3$ );
- s è il fattore di correzione;
- $\rho_{SSD\_Nc}$  è la densità satura a superficie asciutta finale del provino compattato ad un determinato numero di giri ( $g/cm^3$ );

- $\rho_{geom\_Nc}$  è la densità geometrica valutata al numero di giri della compattazione ( $g/cm^3$ );
- $v_{real}$  sono i vuoti reali del campione, valutati per ogni numero di giri (%);
- $\rho_{SSD}$  è la densità satura a superficie asciutta, ad ogni giro ( $g/cm^3$ );
- $C$  è la percentuale di compattazione (%);
- $C_1$  è la compattazione iniziale (%);
- $k$  è la lavorabilità (%).

Di seguito viene riportata la valutazione delle grandezze sopra descritte ed il grafico della curva di compattazione per il provino volumetrico (V1) della miscela SP1 4.1.

SP1 4.1% V1	
M (g)	4688.6
D (mm)	150
$\rho_{MMVT}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.598
$\rho_{SSD\_200}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.489
$\rho_{geom200}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.416
s	1.030

Tabella 11: grandezza iniziali per la valutazione dei vuoti provino V1 della miscela SP1 4.1

giri (n°)	h (mm)	$\rho_{geom}$ (g/cm <sup>3</sup> )	vgeom (%)	$\rho_{SSD}$ (g/cm <sup>3</sup> )	vreal (%)	C (%)
0	136.2	1.948	25.03%	2.007	22.77%	77.23%
1	131.3	2.021	22.23%	2.082	19.89%	80.11%
2	128.9	2.058	20.78%	2.120	18.40%	81.60%
3	127.2	2.086	19.72%	2.149	17.31%	82.69%
4	125.9	2.107	18.89%	2.171	16.45%	83.55%
5	124.8	2.126	18.18%	2.190	15.72%	84.28%
6	123.9	2.141	17.58%	2.206	15.10%	84.90%
7	123.2	2.154	17.11%	2.218	14.62%	85.38%
8	122.5	2.166	16.64%	2.231	14.13%	85.87%
9	121.9	2.177	16.23%	2.242	13.71%	86.29%
<b>10</b>	<b>121.4</b>	<b>2.186</b>	<b>15.89%</b>	<b>2.251</b>	<b>13.36%</b>	<b>86.64%</b>
20	118.1	2.247	13.54%	2.314	10.93%	89.07%
30	116.3	2.281	12.20%	2.350	9.56%	90.44%
40	115.1	2.305	11.28%	2.374	8.61%	91.39%
50	114.2	2.323	10.58%	2.393	7.89%	92.11%
60	113.5	2.338	10.03%	2.408	7.32%	92.68%
70	113	2.348	9.63%	2.419	6.91%	93.09%
80	112.5	2.358	9.23%	2.429	6.50%	93.50%
90	112.1	2.367	8.91%	2.438	6.17%	93.83%
100	111.7	2.375	8.58%	2.447	5.83%	94.17%
110	111.4	2.382	8.34%	2.453	5.58%	94.42%
<b>120</b>	<b>111.2</b>	<b>2.386</b>	<b>8.17%</b>	<b>2.458</b>	<b>5.41%</b>	<b>94.59%</b>
130	111	2.390	8.01%	2.462	5.24%	94.76%
140	110.7	2.397	7.76%	2.469	4.98%	95.02%
150	110.6	2.399	7.67%	2.471	4.89%	95.11%
160	110.4	2.403	7.51%	2.476	4.72%	95.28%
170	110.2	2.408	7.34%	2.480	4.55%	95.45%
180	110.1	2.410	7.25%	2.482	4.46%	95.54%
190	110	2.412	7.17%	2.485	4.38%	95.62%
<b>200</b>	<b>109.8</b>	<b>2.416</b>	<b>7.00%</b>	<b>2.489</b>	<b>4.20%</b>	<b>95.80%</b>

Tabella 12: valutazione del contenuto di vuoti per il provino V1 della miscela SP1 4.1

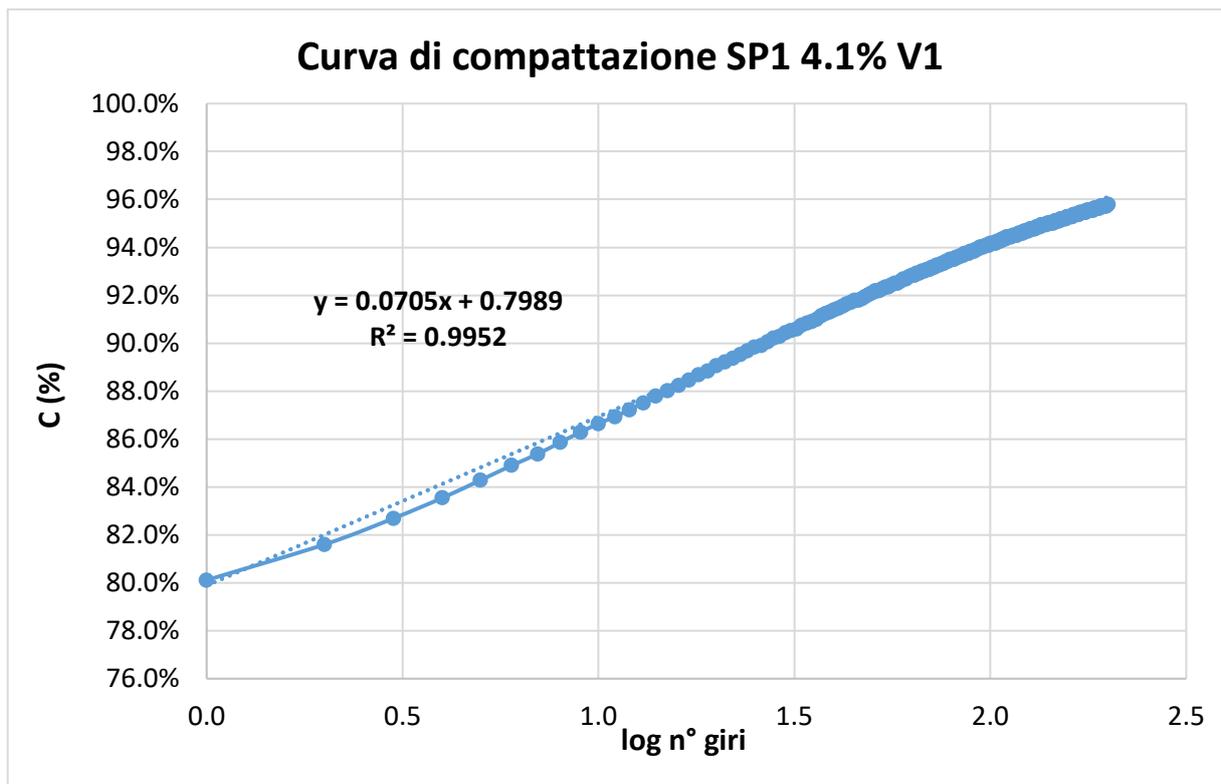


Figura 42: curva di compattazione provino V1 della miscela SP1 4.1

SP1 4.1% V1	
<b>C1 (%)</b>	79.9
<b>k (%)</b>	70.5

Tabella 13: valori di C1 e k provino V1 della miscela SP1 4.1

Parametri di forte interesse risultano quelli evidenziati in tabella 10, in particolar modo i vuoti. Questo perché il CSA dell'A4 impone dei limiti a tale grandezza a 10 (Niniziale o N1), 120 (Ndesign o N2) e 200 (Nmax o N3) giri.

In figura 43 vengono riportate tali limitazioni, evidenziando quelle relative ai vuoti.

Miscela bituminosa		
Condizioni di prova (UNI EN 12697-31/13108-20)	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)
Angolo di rotazione	°	1,25 ± 0,02
Velocità di rotazione	Giri/min	30
Pressione verticale	kPa	600 ± 3
Diametro del provino	mm	100
Rotazioni N1	---	10
Rotazioni N2	---	120
Rotazioni N3	---	200

La miscela ottimale dovrà avere le seguenti caratteristiche dopo compattazione a N3:

Risultati richiesti	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)	Limiti (UNI EN 13108-1)
Affinità bitume-aggregato – Spogliamento (UNI EN 12697-11)	%	≥ 5	≥ 5
Vuoti a N1 (UNI EN 12697-8)	%	≤ 14 ( $V_{max14}$ )	≤ 14 ( $V_{max14}$ )
Vuoti a N2 (UNI EN 12697-8)	%	3 + 6 ( $V_{min3} - V_{max6}$ )	3 + 6 ( $V_{min3} - V_{max6}$ )
Vuoti a N3 (UNI EN 12697-8)	%	≥ 2 ( $V_{min2}$ )	≥ 2 ( $V_{min2}$ )
Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-23)	N/mm <sup>2</sup>	0,95 + 1,70	1,20 + 2,20
Coefficiente di Trazione Indiretta a 25°C	N/mm <sup>2</sup>	60 + 250	60 + 250
Perdita di Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-12)	%	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )
Rigidezza (UNI EN 12697-26 – Annesso C)			
T= 5°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	14.000 + 20.000	18.000 + 27.000
T= 20°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	5.000 + 8.000	8.000 + 15.000
T= 40°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	700 + 2.500	900 + 6.000

Figura 43: limitazioni sulle grandezze imposte dal CSA dell'A4 (fonte: CSA autostrada A4)

Si è scelto di integrare anche un limite inferiore ai vuoti a Niniziale pari a 11% da capitolato SIIV.

### 3.5.4 Fotografie



*Figura 44: fustella da 150 mm*



*Figura 45: caricamento della fustella con la miscela sciolta*



*Figura 47: compattazione tramite pressa a taglio giratoria*



*Figura 46: estrazione del provino compattato*

## **3.6 Determinazione della bulk density**

### **3.6.1 Descrizione del parametro**

La norma BS EN 12697-6 definisce la bulk density come “la massa per unità di volume, compresi i vuoti d’aria, di un campione ad una temperatura di prova nota”.

Essa, come già visto nel paragrafo precedente, rappresenta uno strumento indispensabile, insieme alla massima massa volumica teorica, per la determinazione del contenuto di vuoti dei provini.

In questo elaborato la bulk density è stata valutata tramite la metodologia SSD (satura a superficie asciutta). Il parametro è, infatti, calcolato sulla base di un provino dalla superficie asciutta, ma con i vuoti superficiali pieni di acqua.

Questa densità esclude i vuoti superficiali in quanto considera un volume ridotto del campione, generando, dunque, un valore superiore rispetto a quello determinato geometricamente.

### **3.6.2 Procedura**

La norma prevede:

1. valutazione della massa asciutta del campione (m1);
2. inserimento del provino in acqua per circa 1 ora;
3. agitare il campione ogni 10 min per favorire l’espulsione dell’aria dai vuoti;
4. registrare la massa del provino in acqua (m2);
5. estrarre dall’acqua ed asciugare velocemente la superficie tramite un panno di camoscio;
6. annotare la massa satura a superficie asciutta del campione cilindrico (m3);
7. misurare la temperatura dell’acqua.

La prova è stata svolta il giorno seguente alla compattazione di ogni provino, lasciandolo riposare a temperatura ambiente.

Per i campioni volumetrici è stata valutata, non solo la densità post compattazione, ma anche quella dopo il taglio, attendendo, però, circa 3 giorni con il campione in cella climatica priva di umidità, affinché perdesse l’acqua assorbita durante il taglio.

### 3.6.3 Calcolo

La formula implementata per la valutazione della densità mediante metodologia SSD è la seguente:

$$\rho_{SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

Dove:

- $\rho_{SSD}$  è la densità satura a superficie asciutta ( $\text{g/cm}^3$ );
- $m_1$  è la massa del campione asciutto (g);
- $m_2$  è la massa del campione immerso in acqua (g);
- $m_3$  è la massa satura a superficie asciutta (g);
- $\rho_w$  è la densità dell'acqua funzione della temperatura registrata ( $\text{g/cm}^3$ ).

### 3.6.4 Fotografie



Figura 49: massa del provino asciutto (m1)

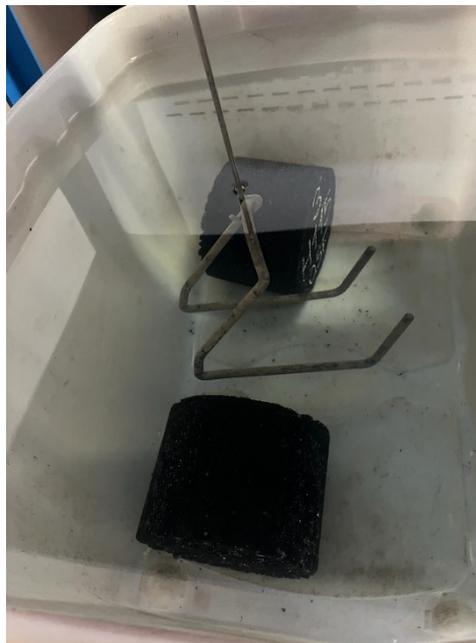


Figura 48: inserimento in acqua



Figura 51: massa in acqua (m2)



Figura 50: creazione della superficie saturo a superficie asciutta

### 3.7 Valutazione dei moduli di rigidezza

#### 3.7.1 Descrizione del parametro

Il modulo di rigidezza è stato valutato seguendo la norma BS EN 12697-26 utilizzando l'allegato C: trazione indiretta su campioni cilindrici (IT-CY).

La rigidezza permette di stimare la risposta tensio-deformativa, ovvero la capacità di resistere al carico meccanico di trazione a diverse temperature.

Il test prevede l'applicazione di uno sforzo verticale di compressione che, però, determina degli spostamenti di trazione orizzontali (trazione indiretta), da cogliere tramite trasduttori di spostamento. Noto carico e spostamento, tramite normativa, si ricava il modulo di rigidezza.

Elevate rigidzze consentono una maggior resistenza all'ormaiamento, poiché determinano un minor accumulo di deformazioni permanenti, ma rischiano di portare a fessurazioni per le basse temperature, a causa della formazione di importanti stati di coazione derivanti da spostamenti impediti.

In questo elaborato di tesi sono stati investigati i moduli di rigidezza per tre differenti temperature 10°C, 20°C e 40°C (su provini compattati ad Nmax), così da comprendere in modo completo il comportamento meccanico delle miscele in un ampio range termico.

Per le temperature di 20°C e 40°C il capitolato speciale d'appalto dell'A4 definisce delle limitazioni all'accettabilità dei valori (tabella 14).

La miscela ottimale dovrà avere le seguenti caratteristiche dopo compattazione a N3:

Risultati richiesti	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)	Limiti (UNI EN 13108-1)
Affinità bitume-aggregato – Spogliamento (UNI EN 12697-11)	%	≥ 5	≥ 5
Vuoti a N1 (UNI EN 12697-8)	%	≤ 14 (V <sub>max14</sub> )	≤ 14 (V <sub>max14</sub> )
Vuoti a N2 (UNI EN 12697-8)	%	3 + 6 (V <sub>min3</sub> -V <sub>max6</sub> )	3 + 6 (V <sub>min3</sub> -V <sub>max6</sub> )
Vuoti a N3 (UNI EN 12697-8)	%	≥ 2 (V <sub>min2</sub> )	≥ 2 (V <sub>min2</sub> )
Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-23)	N/mm <sup>2</sup>	0,95 + 1,70	1,20 + 2,20
Coefficiente di Trazione Indiretta a 25°C	N/mm <sup>2</sup>	60 + 250	60 + 250
Perdita di Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-12)	%	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )
Rigidezza (UNI EN 12697-26 – Annesso C)			
T= 5°C, Def. = 7µm, Freq. = 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	14.000 + 20.000	18.000 + 27.000
T= 20°C, Def. = 7µm, Freq. = 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	5.000 + 8.000	8.000 + 15.000
T= 40°C, Def. = 7µm, Freq. = 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	700 + 2.500	900 + 6.000

Tabella 14: limiti di accettabilità per i moduli di rigidezza (fonte: CSA dell'autostrada A4)

Per quanto riguarda i provini compattati a 120 giri (Ndesign), destinati alla fatica, il modulo è stato valutato solo alla temperatura della prova di fatica (20°C).

### 3.7.2 Procedura

Per consentire lo sviluppo delle proprietà meccaniche dei provini cilindrici vengono attesi 14 giorni prima della realizzazione del test.

Per i campioni volumetrici (compattati a Nmax) il conteggio dei giorni parte non dalla compattazione, bensì dal taglio, volto al raggiungimento di un'altezza target per eseguire la valutazione della rigidità e della resistenza a trazione indiretta (ITS); invece, i campioni compattati a 120 giri (Ndesign), destinati alla fatica; sono stati testati a due settimane dalla compattazione.

La normativa definisce il range di altezza ammissibile in funzione della massima dimensione dell'aggregato (tabella 15), nel caso in esame verranno impiegati campioni cilindrici di 60 mm con una tolleranza di 2 mm.

Maximum grain size mm	Specimen diameter mm	Specimen height mm
≤ 16	100 ± 3	40 to 60 ± 2
	150 ± 3	
> 16 to < 32	150 ± 3	60 ± 2
≥ 32	150 ± 3	90 ± 2

Tabella 15: altezza ammissibili per il test di modulo (fonte:BS EN12697-26)

La procedura prevede che i provini vengano condizionati per 4 ore alla temperatura oggetto di studio per la rigidità.

La prova è stata realizzata tramite UTM-30, macchinario estremamente duttile, capace, in questo caso, di applicare un carico sotto forma di semi-onda sinusoidale con determinati tempi di carico e riposo (figura 52).

Il tempo di carico dall'inizio del test fino al picco deve essere compreso tra 50 e 125 ms ± 5 ms.

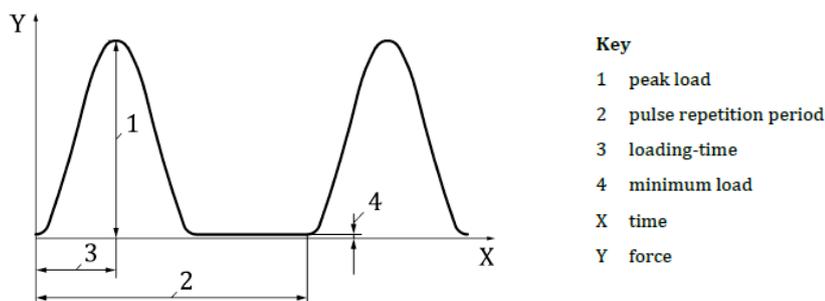


Figura 52: impulso di carico con relative caratteristiche (fonte:BS EN12697-26)

Una volta condizionato, il campione viene inserito all'interno di un castelletto di prova in modo simmetrico e correttamente fissato, tramite chiave dinamometrica.

Gli spostamenti orizzontali vengono registrati tramite trasduttori LVDT montati, in posizioni diametralmente opposte, sul telaio rigido del castelletto di prova.

Inserito nell'UTM-30, vengono somministrati 10 impulsi di carico, volti a regolare il carico necessario per il raggiungimento dello spostamento desiderato.

Dopo questa prima fase, inizia il vero e proprio test: la macchina applica 5 ulteriori impulsi e calcola il modulo di rigidezza come media dei 5.

Successivamente, il campione deve essere ruotato di  $(90 \pm 10)^\circ$  intorno al suo asse orizzontale e il test deve essere ripetuto.

Il valore medio di quest'ultimo test deve essere compreso tra + 10% e -20% della media calcolata per la prima prova.

Se questa verifica viene soddisfatta, il modulo di rigidezza finale sarà la media fra il test iniziale e quello con il provino ruotato, altrimenti andrà ripetuto.

### 3.7.3 *Calcolo*

La norma BS EN 12697-26 indica la seguente formula per il calcolo del modulo di rigidezza:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

Dove:

- E rappresenta il modulo di rigidezza (MPa);
- F è il carico applicato dall'attuatore (N);
- $v$  è il coefficiente di Poisson. Se sconosciuto, può essere ipotizzato essere 0.35 per tutte le temperature di prova;
- $h$  è la media di 4 altezze diametralmente opposte del provino (mm);
- $z$  è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente ottenuta durante il ciclo di carico (mm).

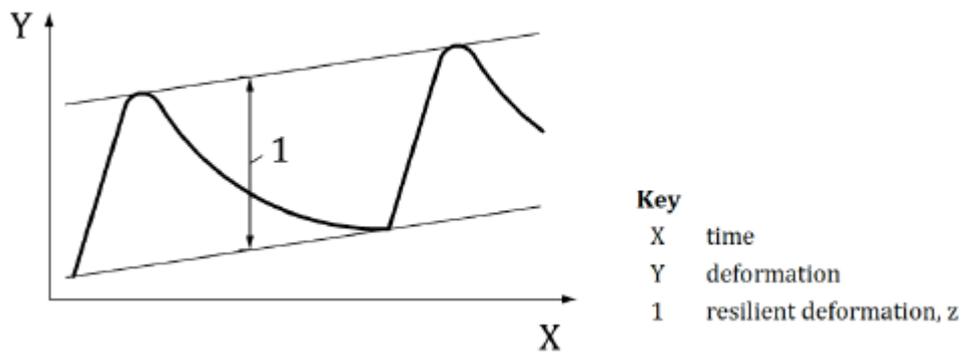


Figura 53: definizione di z (fonte:BS EN12697-26)

### 3.7.4 Fotografie



Figura 54: macchinario UTM-30



Figura 56: castelletto di prova



Figura 55: inserimento del campione

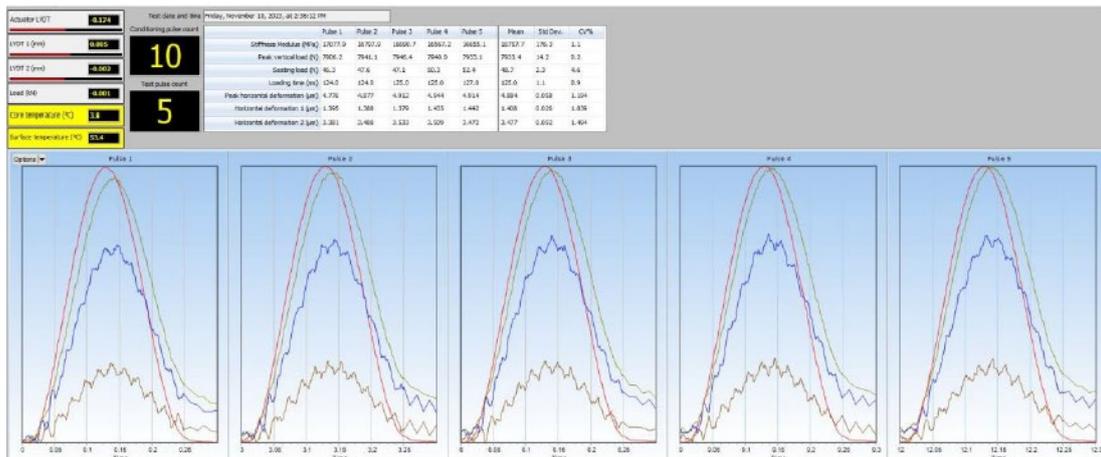


Figura 57: interfaccia del software, impulsi di carico e spostamenti

## 3.8 Definizione della resistenza a trazione indiretta

### 3.8.1 Descrizione del parametro

La norma BS EN 12697-23 definisce la trazione indiretta come: “il massimo sforzo di trazione calcolato a partire dal massimo carico applicato ad un provino cilindrico caricato diametralmente fino alla rottura nelle specifiche condizioni di prova”.

La filosofia della prova richiama quanto visto per la valutazione della rigidezza: un carico di compressione che generi una trazione laterale del provino.

La velocità di deformazione deve mantenersi costante con un valore di 50 mm/min.

I campioni devono avere un'età compresa fra 48 ore e 42 giorni e devono essere condizionati alla temperatura di prova ( $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) per almeno 4 ore.

La figura 58 mostra quello che è il setup di prova riportato in normativa.

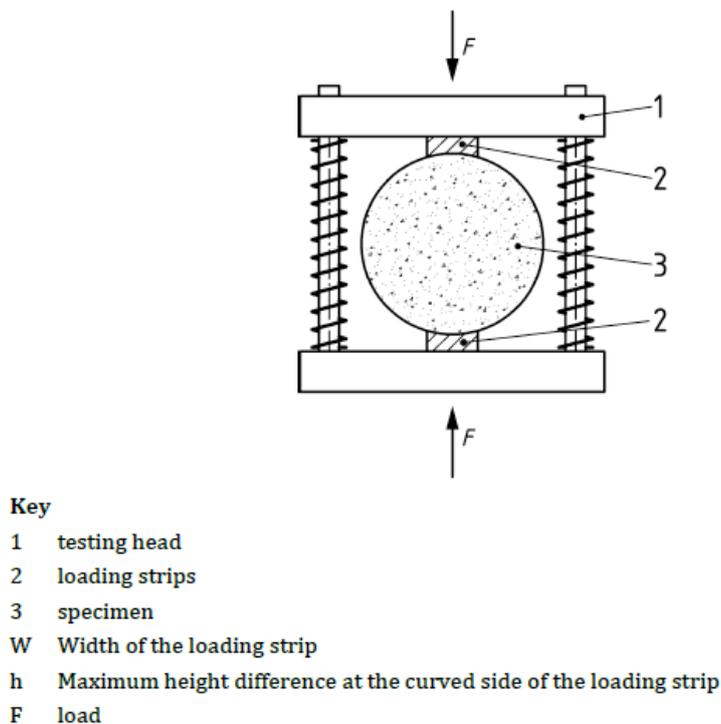


Figura 58: setup prova ITS (fonte: BS EN 12697-23)

Anche per questa grandezza il CSA di riferimento riporta un range di accettazione compreso fra 1.20 e 2.20 MPa (tabella 16).

La miscela ottimale dovrà avere le seguenti caratteristiche dopo compattazione a N3:

Risultati richiesti	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)	Limiti (UNI EN 13108-1)
Affinità bitume-aggregato – Spogliamento (UNI EN 12697-11)	%	≥ 5	≥ 5
Vuoti a N1 (UNI EN 12697-8)	%	≤ 14 ( $V_{max14}$ )	≤ 14 ( $V_{max14}$ )
Vuoti a N2 (UNI EN 12697-8)	%	3 + 6 ( $V_{min3}-V_{max6}$ )	3 + 6 ( $V_{min3}-V_{max6}$ )
Vuoti a N3 (UNI EN 12697-8)	%	≥ 2 ( $V_{min2}$ )	≥ 2 ( $V_{min2}$ )
Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-23)	N/mm <sup>2</sup>	0,95 + 1,70	1,20 + 2,20
Coefficiente di Trazione Indiretta a 25°C	N/mm <sup>2</sup>	60 + 250	60 + 250
Perdita di Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-12)	%	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )
Rigidezza (UNI EN 12697-26 – Annesso C)			
T= 5°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	14.000 + 20.000	18.000 + 27.000
T= 20°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	5.000 + 8.000	8.000 + 15.000
T= 40°C, Def.= 7µm, Freq.= 2Hz, Coeff.P.= 0,35	N/mm <sup>2</sup>	700 + 2.500	900 + 6.000

Tabella 16: limiti di accettabilità per i valori di ITS (fonte: CSA dell'autostrada A4)

La normativa BS EN 12697-23 presenta, inoltre, una descrizione delle possibili rotture del campione (figura 59):

- a) rottura netta a trazione: il provino è chiaramente rotto lungo una linea diametrica, tranne per piccole sezioni triangolari vicino alle strisce di carico;
- b) deformazione: provino senza una linea di rottura a trazione chiaramente visibile;
- c) combinazione: provino con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

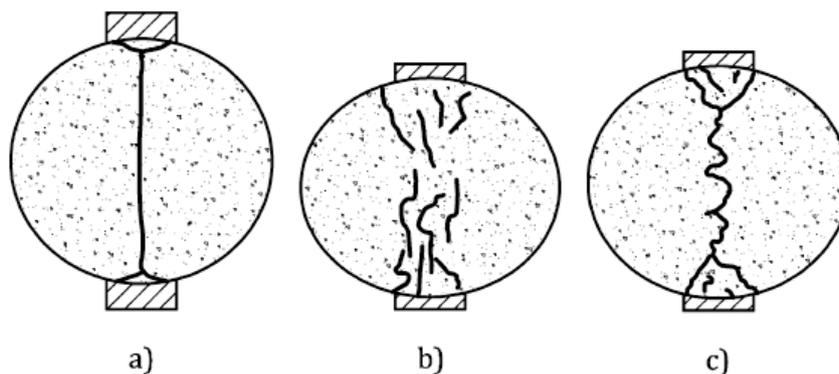


Figura 59: possibili rotture (fonte: BS EN 12697-23)

### **3.8.2 Procedura**

La procedura per la corretta realizzazione della prova risulta estremamente semplice e veloce.

Bisogna posizionare il campione cilindrico all'interno del castelletto di prova, in maniera simmetrica e precisa. Successivamente, va inserito al di sotto del pistone di carico e, così, il test può iniziare.

Grazie ad un software collegato al macchinario di prova è possibile registrare: la durata, lo spostamento verticale (tramite trasduttori) e il valore del carico.

### **3.8.3 Calcolo**

La norma di riferimento calcola il valore della resistenza a trazione indiretta come segue:

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \times 1000$$

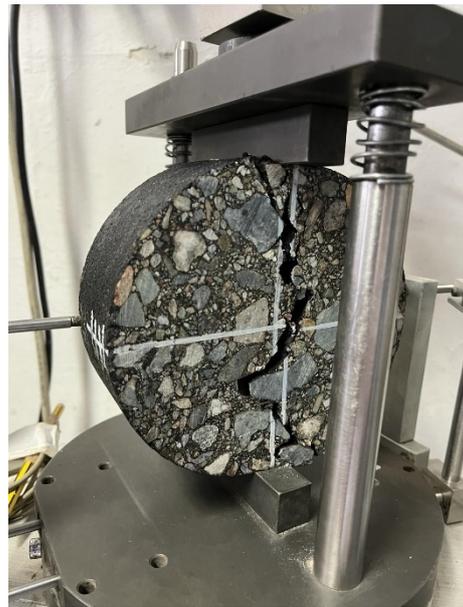
Dove:

- ITS rappresenta la resistenza a trazione indiretta (KPa);
- P è il valore massimo del carico applicato (N);
- D è il diametro del campione (mm);
- H è la media delle 4 altezze diametralmente opposte (mm).

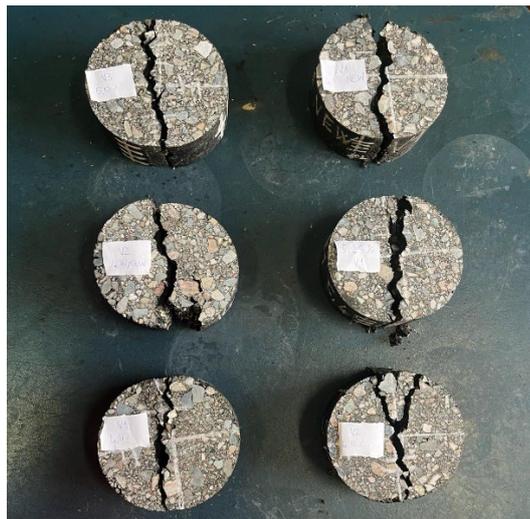
### 3.8.4 Fotografie



*Figura 60: macchinario di prova per ITS*



*Figura 61: rottura del provino a fine test*



*Figura 62: tipologie di rotture registrate*



*Figura 63: particolare della rottura di due campioni post ITS*

## **3.9 Valutazione del comportamento a fatica**

### ***3.9.1 Descrizione della prova***

La normativa BS EN 12697-24 definisce la fatica come “la riduzione della resistenza di un materiale sotto carichi ripetuti rispetto alla resistenza sotto un singolo carico”.

La valutazione del comportamento a fatica delle miscele in conglomerato bituminoso è un indicatore strutturale importante della loro resistenza alla fessurazione a lunga durata.

La normativa propone molteplici alternative per l’implementazione della prova: è possibile variare l’input di carico, la geometria del campione da testare e, anche, il criterio di rottura.

Per questo elaborato di tesi si è scelto di fare riferimento all’allegato F della BS EN 12697-24, ovvero: “Cyclic indirect tensile test on cylindrical shaped specimens (CIT-CY).

Questa metodologia di prova prevede l’applicazione di un carico ciclico sinusoidale di compressione, senza periodi di riposo e costante (controllo di tensione). Tale stato sollecitativo genera uno sforzo di trazione uniforme ortogonalmente alla direzione di stress (trazione indiretta).

La prova si ritiene conclusa quando il provino arriva alla rottura.

Nota il valore iniziale di input della tensione applicata, misurando tramite trasduttori lo spostamento in direzione orizzontale e la conseguente deformazione e, osservando il numero di cicli necessari per la rottura, è possibile determinare un punto nel piano bi-logaritmico che lega la deformazione con il numero di cicli a rottura.

Effettuando un determinato numero di test a diversi valori di tensione (6 provini per miscela) è possibile, interpolando i punti, costruire una retta di fatica.

Essa permette di descrivere e simulare le performance della miscela oggetto d’analisi, in particolare è possibile determinare la deformazione che porta a rottura per un numero di cicli di carico pari ad 1 milione ( $\epsilon_6$ ).

La frequenza di carico dell’allegato F risulta di 10 Hz (simulativi di una velocità di 80 km/h), mentre la temperatura del test è 20°C.

### 3.9.2 Procedura

I campioni cilindrici destinati alla fatica sono stati compattati a 120 giri (Ndesidn), con un'altezza target di 60 mm (tabella 17), dopo 2 settimane è stato valutato il modulo alla temperatura del test di fatica ovvero 20°C, un input importante per la valutazione dello stato tensionale da applicare.

Maximum grain size mm	Specimen diameter $\Omega$ mm	Specimen height $h$ mm
$\leq 16$	$100 \pm 3$	$40 \pm 2$
$> 16$ to $< 32$	$150 \pm 3$	$60 \pm 2$
$\geq 32$	$150 \pm 3$	$90 \pm 2$

Tabella 17: altezza del campione da testare (fonte: BS EN 12697-24)

In questo studio, sono state effettuate 2 ripetizioni per ogni livello di stress, per un totale di 6 campioni testati. Lo stato tensionale applicato deve garantire un'ampiezza della massima deformazione iniziale ( $\epsilon_a$ ) compresa fra 25  $\mu\text{m}/\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Al fine di ottenere una migliore rappresentazione della retta di fatica, sfruttando valori distanziati in modo uniforme, sono stati selezionati 3 intervalli di cicli all'interno dei quali far ricadere la rottura di una coppia di provini: 1'000-10'000 cicli di carico, 10'000-100'000, 100'000-1'000'000.

La vita a fatica, inoltre, deve collocarsi nel range tra  $10^3$  e  $10^6$  cicli di carico.

La procedura di prova prevede l'incollaggio di supporti metallici lungo lo spessore dei provini in due punti diametralmente opposti, tali inserti fungono da supporto per il posizionamento dei trasduttori.

Prima di valutarne il comportamento a lungo termine i provini vengono condizionati per 4 ore a 20°C.

Al termine di questa fase vengono fissati in modo simmetrico mediante un opportuno castelletto di prova e, dopo aver inserito e tarato i trasduttori, è possibile iniziare il test in controllo di tensione.

### 3.9.3 Calcolo

Tramite i trasduttori di spostamento è possibile ricavare quelli che sono gli spostamenti in mm ad ogni ciclo di carico ( $u_a$ ).

A partire da tali valori si può valutare la massima ampiezza di deformazione ( $\varepsilon_a$ ) e la massima differenza di deformazione ( $\Delta\varepsilon$ ).

$$\varepsilon_a = \left(\frac{2 \cdot u_a}{\Omega}\right) \cdot \left[\frac{1 + 3\nu}{4 + \pi \cdot \nu - \pi}\right] \cdot 10^6$$

$$\Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_a$$

Dove:

- $\varepsilon_a$  è la massima ampiezza di deformazione ( $\mu\text{m}/\text{m}$ );
- $u_a$  è lo spostamento orizzontale (mm);
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson = 0.35;
- $\Omega$  è il diametro (mm);
- $\Delta\varepsilon$  è la massima differenza di deformazione ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

Il modulo di rigidezza ( $S_{mix}$ ) è definito a partire dalle grandezze precedentemente valutate e dell'ampiezza della tensione orizzontale di input ( $\sigma_a$ ).

$$S_{mix,n} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot (1 + 3\nu) \cdot 10^6$$

Per l'identificazione di un punto nel piano bi-logaritmico  $\Delta\varepsilon$  -  $N_f$  è necessario definire un valore di  $\varepsilon_a$  iniziale di riferimento a cui associare  $\Delta\varepsilon$ .

Si è optato di ricercare il valore di deformazione iniziale nell'intervallo 90-100 cicli, ricavando un valore  $\varepsilon_{a0}$  medio.

Graficati i 6 punti (rappresentativi dei 6 test) è possibile identificare una retta di interpolazione nel piano bi-logaritmico.

Dai coefficienti di tale retta si può ottenere la formulazione richiesta dalla normativa, ovvero esprimere la  $\Delta\varepsilon$  in funzione del numero di cicli, tramite due parametri caratteristici della miscela  $k_\varepsilon$  e  $n_\varepsilon$ .

$$\lg(N_{f,w}) = \lg(k_\varepsilon) + n_\varepsilon \cdot \lg(\Delta\varepsilon)$$
$$N_{f,w} = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon}\right)^{n_\varepsilon}$$

Sfruttando la formulazione appena proposta, la normativa definisce un ulteriore valore di output da riportare, utile come parametro di confronto.

Esso rappresenta la deformazione ad 1 milione di cicli di carico ( $\varepsilon_6$ ).

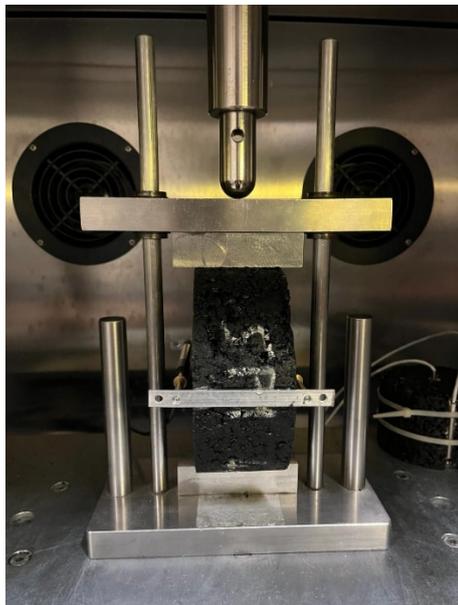
### 3.9.4 Fotografie



*Figura 66: inserimento del campione nel castelletto di prova*



*Figura 67: inserimento sotto il pistone di carico con trasduttori*



*Figura 64: vista frontale della prova*



*Figura 65: rottura del campione*

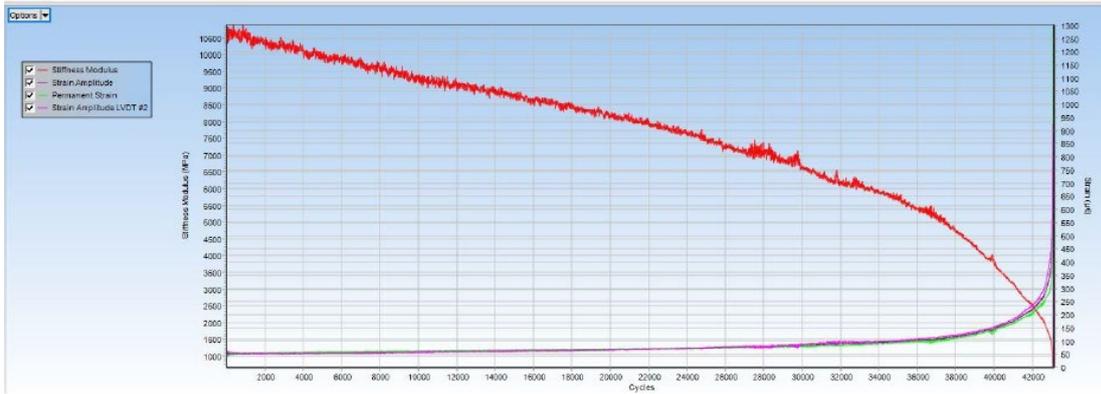


Figura 68: output del software, decrescita del modulo di rigidità con il numero di cicli di carico

## ***4 Analisi dei risultati***

### **4.1 Introduzione**

In questo capitolo saranno descritti quelli che sono i risultati ottenuti dalle prove presentate nel capitolo precedente.

Inizialmente le tre miscele saranno trattate separatamente, valutando, però, la variazione delle grandezze di interesse al modificarsi della percentuale di legante totale. Questa prima analisi permetterà, con l'aiuto delle limitazioni presenti nel CSA dell'autostrada A4, di comprendere la fattibilità in termini prestazionali della creazione di miscele sostenibili ad alto contenuto di fresato e plastiche di riciclo.

Successivamente verranno effettuati dei confronti volti a comprendere l'andamento delle proprietà fisiche e meccaniche in funzione:

- della percentuale di plastica impiegata (SP1 contenente lo 0.3% di polimero ed SP2 lo 0.5%);
- della metodologia di integrazione del materiale polimerico (SP1 ed SP2 realizzate con metodologia ibrida e PMB con processo umido);
- della presenza di materiale fresato a parità di percentuale di plastica e di tipologia di miscelazione di essa (SP1 e RIF presentano lo 0.3% di polimero integrato con processo ibrido, ma la miscela RIF è priva di RAP, mentre SP1 ne è composta al 50%).

Inoltre, sfruttando il contenuto di vuoti (ai vari giri), i moduli di rigidezza (alle varie temperature) e i loro range di accettazione, per ogni miscela verrà identificato un range di bitume vergine d'aggiunta, e, quindi, di legante totale, capace di identificare le miscele ottime.

Essendo un aspetto particolarmente ricorrente in questo capitolo, viene, nuovamente ricordata la differenza tra legante vergine di aggiunta e legante totale.

Quest'ultimo è stato valutato come somma dei contributi leganti di:

- bitume vergine di aggiunta o modificato (PMB);
- strato legante che ricopre gli aggregati di RAP;
- compound polimerico di riciclo;
- rejuvenator.

## 4.2 Dati ottenuti dalle miscele

### 4.2.1 SP1

Le miscele appartenenti alla famiglia SP1 risultano così composte:

- 50% di aggregati vergini;
- 50% di fresato, sul peso degli aggregati;
- 0.15% di rejuvenator, calcolato sul peso della miscela;
- 0.30% di plastiche di riciclo, calcolato sul peso della miscela ed integrate con metodologia ibrida;
- percentuale variabile di legante vergine di aggiunta.

Sono state investigate 5 diverse miscela di tipo SP1 con unica distinzione la percentuale di legante totale, i codici associati sono i seguenti (il numero rappresenta la percentuale di legante totale):

- SP1 4.0 (miscela da 60 kg);
- SP1 4.1 (60 kg);
- SP1 4.6 (9 kg);
- SP1 5.2 (60 kg);
- SP1 5.4 (60 kg).

È opportuno ricordare che i valori riportati di seguito, per le miscele da 60 kg, sono la media su tre provini compattati ad 200 giri (Nmax).

#### 4.2.1.1 Proprietà volumetriche

Nella seguente tabella vengono riportate le proprietà volumetriche verificate:

- contenuto di legante totale (Pb);
- percentuale di vuoti a 10 giri (Niniziale), 120 (Ndesign) e 200 giri (Nmax);
- percentuale dei vuoti dei campioni dopo il taglio;
- massima massa volumica teorica (MMVT).

	Proprietà volumetriche						
	Pb (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	MMVT (g/cm3)
<b>SP1 4.0</b>	4.0	1.2	13.4	5.5	4.3	2.1	2.598
<b>SP1 4.1</b>	4.1	1.3	11.8	3.8	2.7	1.0	2.573
<b>SP1 4.6</b>	4.6	1.8	12.8	4.9	3.6	1.9	2.566
<b>SP1 5.2</b>	5.2	2.4	9.4	1.3	0.6	0.6	2.542
<b>SP1 5.4</b>	5.4	2.5	9.4	1.2	0.4	0.4	2.532

**miscela da 9 kg**

*Tabella 18: proprietà volumetriche miscele SP1*

Il CSA dell'A4, con integrazione di quello SIV, stabilisce le seguenti limitazioni sulla percentuale di vuoti:

- compresi fra 11.0 % e 14.0 % ad Niniziale;
- compresi fra 3.0% e 6.0% ad Ndesign;
- maggiore del 2.0% ad Nmax.

In tabella 18 i vuoti che rispettano il CSA sono evidenziati in verde.

I trend attesi risultano verificati: diminuzione della percentuale di vuoti e della massima massa volumica teorica con l'aumentare della percentuale di legante totale.

L'unico aspetto da segnalare è il confronto per quanto concerne la percentuale di vuoti fra le miscele SP1 4.1 ed SP1 4.6, in quanto il contenuto di vuoti non risulta decrescente. Una possibile giustificazione di questo comportamento potrebbe essere che SP1 4.6 risulta l'unica miscela "piccola" (9 kg al posto di 60 kg), miscela a mano e non tramite miscelatore meccanico, fra la famiglia delle SP1.

La miscelazione a mano della SP1 4.6 potrebbe essere stata meno efficace di quelle del miscelatore, con una conseguente minor chiusura della miscela.

#### **4.2.1.2 Proprietà meccaniche**

Vengono ora descritti i risultati in termini di moduli di rigidezza e resistenza a trazione indiretta (tabella 19).

I limiti del capitolato sono i seguenti:

- moduli a 20°C: compresi fra 8mila e 15mila MPa;
- moduli a 10°C: compresi fra 900 e 6mila MPa;
- ITS: fra 1.2 e 2.2 MPa.

	Proprietà meccaniche			
	S <sub>Nmax_10°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_20°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_40°C</sub> (MPa)	ITS (MPa)
<b>SP1 4.0</b>	28'030	17'338	5'472	2.7
<b>SP1 4.1</b>	25'938	16'821	4'912	2.9
<b>SP1 4.6</b>	23'138	15'153	2'779	2.2
<b>SP1 5.2</b>	18'946	12'263	2'665	2.4
<b>SP1 5.4</b>	18'245	9'849	2'364	2.2

**miscela da 9 kg**

*Tabella 19: proprietà meccaniche miscele SP1*

Gli istogrammi, a seguire, permettono di cogliere al meglio l'andamento delle proprietà meccaniche all'aumentare del legante totale.

In particolare, le figure 63-64-65 evidenziano la diminuzione della rigidità con l'aumentare del legante e della temperatura.

Per quanto riguarda l'ITS (figura 66) non risulta evidente un trend dal confronto dei diversi risultati.

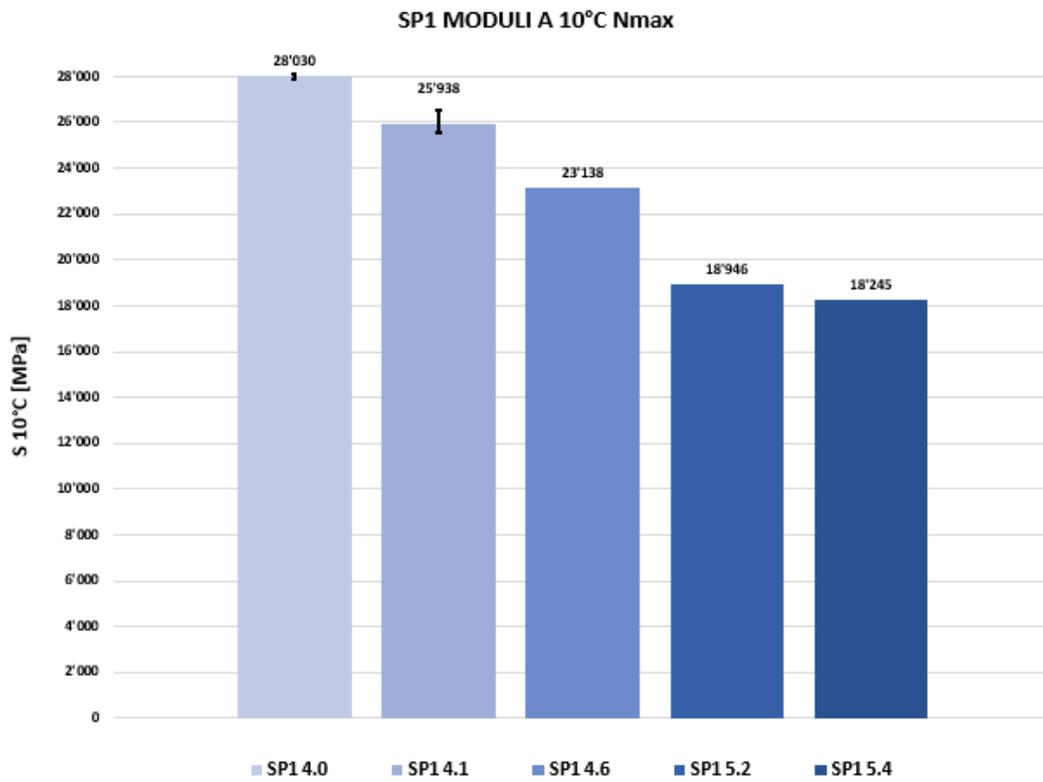


Figura 69: moduli di rigidezza a 10°C miscela SP1

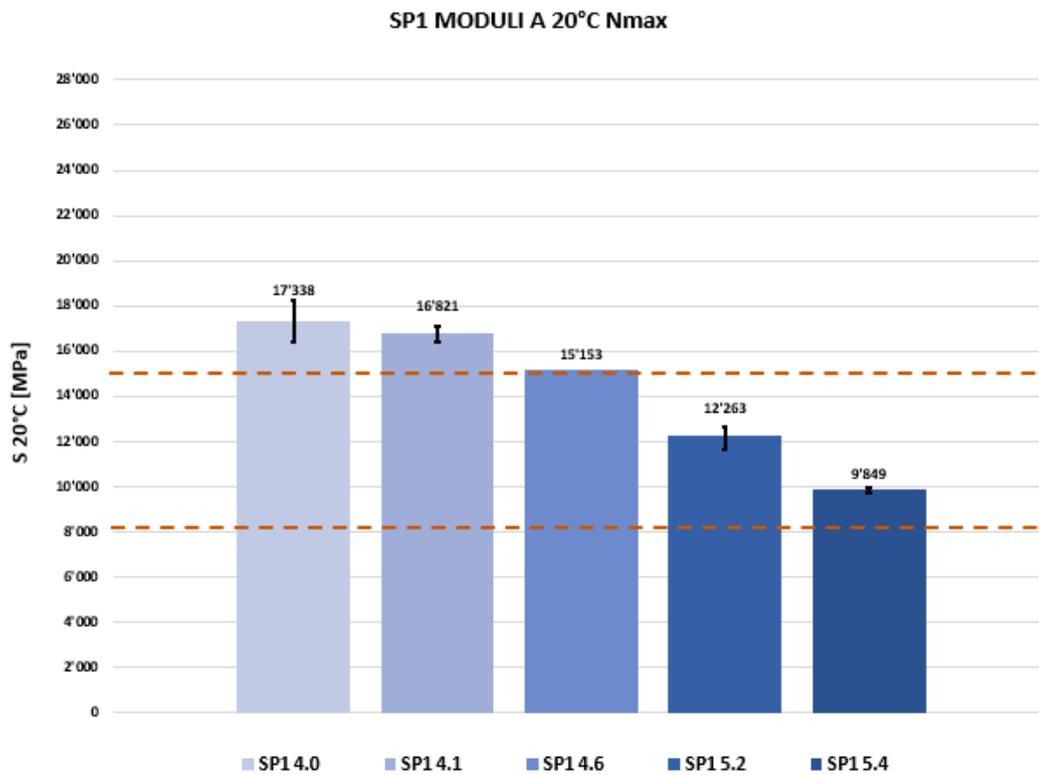


Figura 70: moduli di rigidezza a 20°C miscela SP1

SP1 MODULI A 40°C Nmax

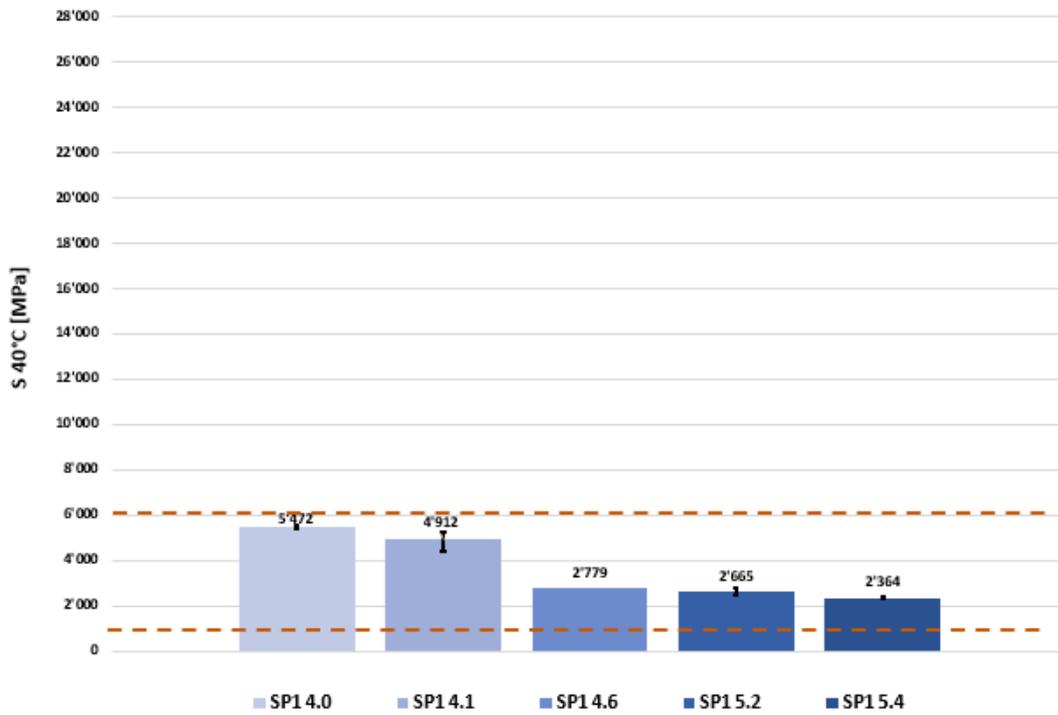


Figura 71: moduli di rigidezza a 40°C miscele SP1

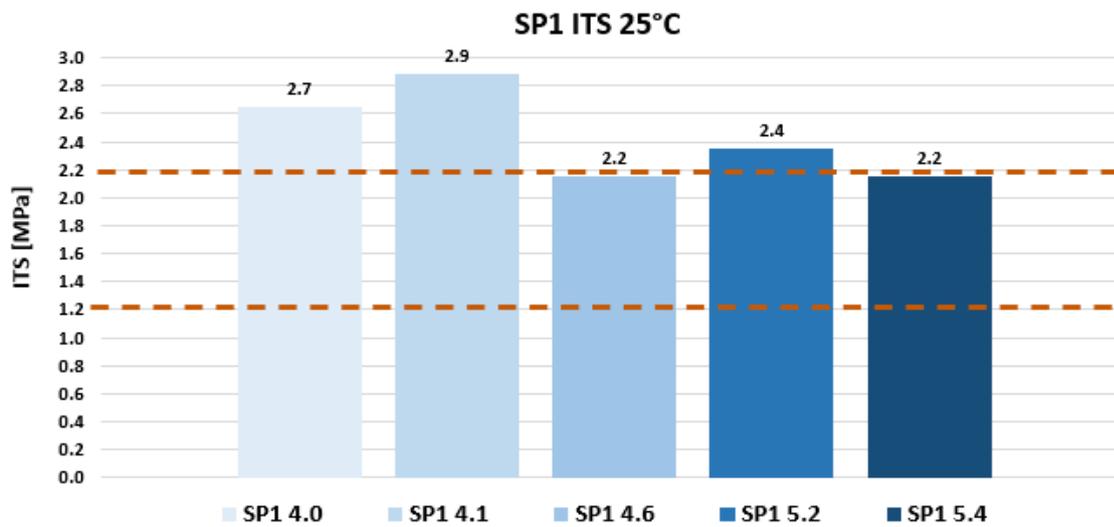


Figura 72: ITS a 25°C miscele SP1

Per 3 miscela della famiglia SP1 sono state ricavate le rette di fatica: SP1 4.0, SP1 4.1, SP1 5.2.

Sono stati testati 6 provini per miscela, tarando l'opportuno valore di stress al fine di far ricadere ogni coppia in 3 intervalli di cicli distinti: 1'000-10'000, 10'000-100'000 e 100'000-1'000'000.

La figura 73 riporta la rappresentazione delle rette con le relative equazioni nel piano bi-logaritmico  $\Delta\varepsilon$ -Nf, mentre le tabelle 20-21-22 contengono le informazioni relative ai provini testati a fatica con il valore di stress in input e gli output della prova, ovvero deformazione e numero di cicli a rottura.

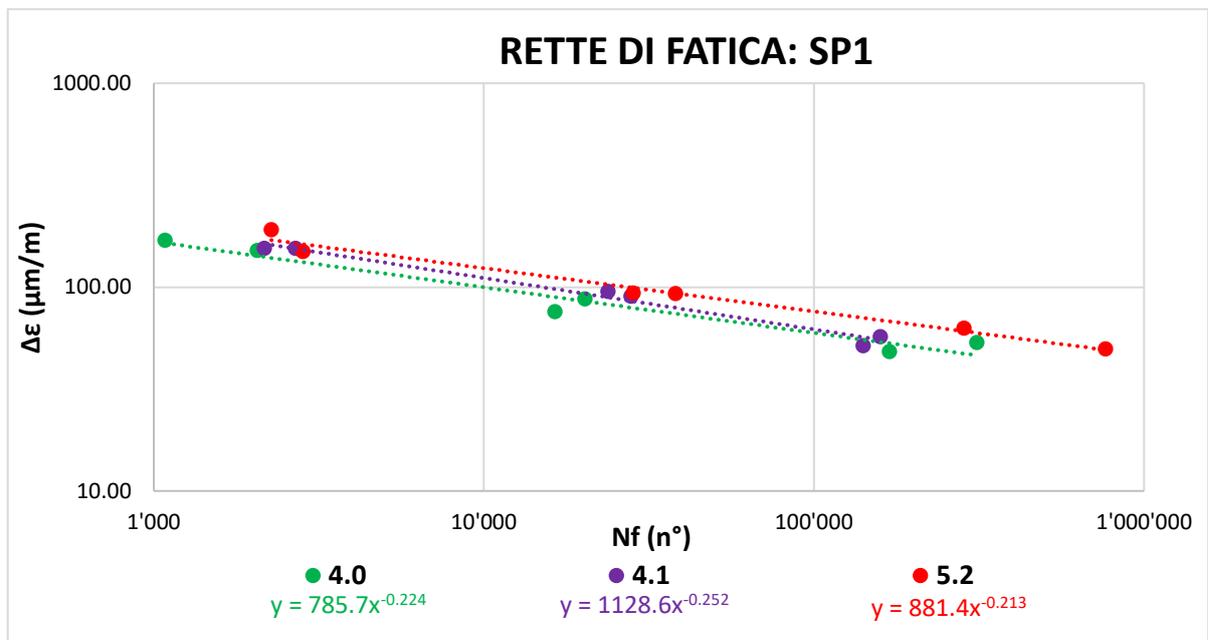


Figura 73: rette di fatica miscele SP1

SP1 4.0					
Campione	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
FAT1	7.5	11'502	310	76	16'420
FAT2	7.3	10'723	510	151	2'057
FAT3	7.4	11'261	310	88	20'249
FAT4	8.9	9'304	192	53	311'600
FAT5	7.2	10'527	510	169	1'086
FAT7	9.3	11'732	194	48	169'140

Tabella 20: provini a fatica SP1 4.0

SP1 4.1					
Campione	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
FAT1	5.9	10'556	310	95	23'820
FAT2	5.6	10'612	515	155	2'690
FAT3	5.8	12'436	515	155	2'160
FAT4	6.0	10'845	310	90	27'881
FAT5	6.5	11'661	205	57	158'830
FAT6	6.3	11'228	205	51	141'220

Tabella 21: provini a fatica SP1 4.1

SP1 5.2					
Campione	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
FAT3	2.2	10'381	300	93	28'400
FAT4	2.3	9'279	520	191	2'270
FAT5	2.2	9'281	300	93	38'100
FAT6	2.9	9'265	180	63	284'830
FAT8	2.2	10'928	480	149	2'830
FAT9	2.2	13'003	180	50	764'530

Tabella 22: provini a fatica SP1 5.2

La normativa delle prove a fatica, BS EN 12697-24, consiglia di riportare come parametro, utile per il confronto, il valore della deformazione relativa ad 1 milione di cicli di carico ( $\varepsilon_6$ ).

La tabella 23 riporta le principali caratteristiche delle 3 miscele oggetto di analisi (media sui 6 provini testati) ed il valore di  $\varepsilon_6$ .

SP1			
Miscela	S_media (MPa)	v_media_120 (%)	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{m/m}$ )
SP1 4.0	10'842	7.9	17.8
SP1 4.1	11'223	6.0	17.4
SP1 5.2	10'356	2.3	23.2

Tabella 23: parametri della fatica miscele SP1

Come era possibile prevedere da letteratura, il valore della deformazione relativa ad 1 milione di cicli risulta crescente al diminuire della rigidezza.

I conglomerati più rigidi offrono prestazioni inferiori in termini di vita a fatica rispetto a quelli più flessibili.

#### 4.2.1.3 Riassunto

Si riporta, infine, una tabella riassuntiva (tabella 24) per sintetizzare quelle che sono le proprietà volumetriche e meccaniche oggetto di interesse.

Grazie all'ausilio delle limitazioni del capitolato (tradotte tramite i colori: verde - verificate, rosso - non verificate, giallo - valore al limite) è possibile osservare come una possibile candidata ad essere una miscela ottima è la SP1 4.6.

	Proprietà volumetriche							Proprietà meccaniche			
	Pb (%)	Pb_RAP (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	S_Nmax_10°C (MPa)	S_Nmax_20°C (MPa)	S_Nmax_40°C (MPa)	ITS (MPa)
SP1 4.0	4.0	2.37	1.2	13.4	5.5	4.3	2.1	28'030	17'338	5'472	2.7
SP1 4.1	4.1	2.36	1.3	11.8	3.8	2.7	1.0	25'938	16'821	4'912	2.9
SP1 4.6	4.6	2.35	1.8	12.8	4.9	3.6	1.9	23'138	15'153	2'779	2.2
SP1 5.2	5.2	2.32	2.4	9.4	1.3	0.6	0.6	18'946	12'263	2'665	2.4
SP1 5.4	5.4	2.51	2.5	9.4	1.2	0.4	0.4	18'245	9'849	2'364	2.2

Tabella 24: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscele SP1

#### 4.2.2 SP2

Le miscele appartenenti alla famiglia SP2 risultano così composte:

- 50% di aggregati vergini;
- 50% di fresato, sul peso degli aggregati;
- 0.15% di rejuvenator, calcolato sul peso della miscela;
- 0.50% di plastiche di riciclo, calcolato sul peso della miscela ed integrate con metodologia ibrida;
- percentuale variabile di legante vergine di aggiunta.

Sono state investigate 3 diverse miscela di tipo SP2 con unica distinzione la percentuale di legante totale, i codici associati sono i seguenti (il numero rappresenta la percentuale di legante totale):

- SP2 4.3 (miscela da 9 kg);
- SP2 4.8 (9 kg);
- SP2 5.2 (9kg).

Le miscele appartenenti alla famiglia SP2, dunque, sono tutte costituite da un campione volumetrico compattato a 200 giri ed uno destinato alla fatica compattato a 120 giri.

La sola differenza con le miscele del tipo SP1 riguarda un maggiore contenuto di plastiche di riciclo (0.20% in più).

##### 4.2.2.1 Proprietà volumetriche

Come fatto per le miscele SP1 vengono riportate la proprietà volumetriche investigate (tabella 25).

	Proprietà volumetriche						
	Pb (%)	Pb <sub>VERG</sub> (%)	v <sub>Ninit</sub> (%)	v <sub>Ndes</sub> (%)	v <sub>Nmax</sub> (%)	v <sub>Nmax</sub> CUT (%)	MMVT (g/cm <sup>3</sup> )
<b>SP2 4.3</b>	4.3	1.3	12.8	5.1	3.9	1.9	2.567
<b>SP2 4.8</b>	4.8	1.8	12.7	4.5	3.3	1.5	2.554
<b>SP2 5.2</b>	5.3	2.3	12.1	4.2	2.8	1.3	2.542

Tabella 25: proprietà volumetriche miscele SP2

#### 4.2.2.2 Proprietà meccaniche

I valori dei moduli di rigidezza e di resistenza a trazione indiretta sono rappresentati prima mediante tabella (tabella 26) e poi istogrammi (figure 74-75-76-77).

	Proprietà meccaniche			
	S <sub>Nmax_10°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_20°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_40°C</sub> (MPa)	ITS (MPa)
<b>SP2 4.3</b>	28'843	19'469	7'056	2.7
<b>SP2 4.8</b>	23'630	15'316	3'054	2.7
<b>SP2 5.2</b>	23'107	13'587	3'137	2.4

Tabella 26: proprietà meccaniche miscele SP2

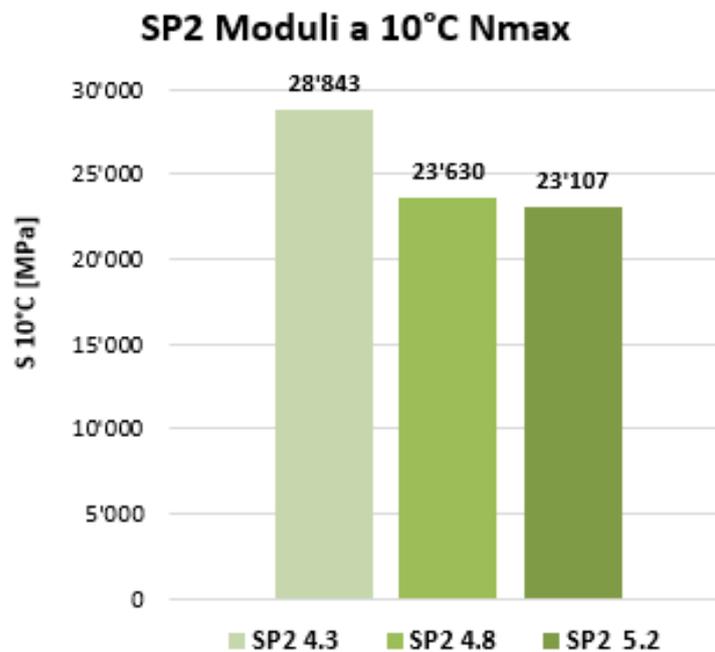


Figura 74: moduli di rigidezza a 10°C miscele SP2

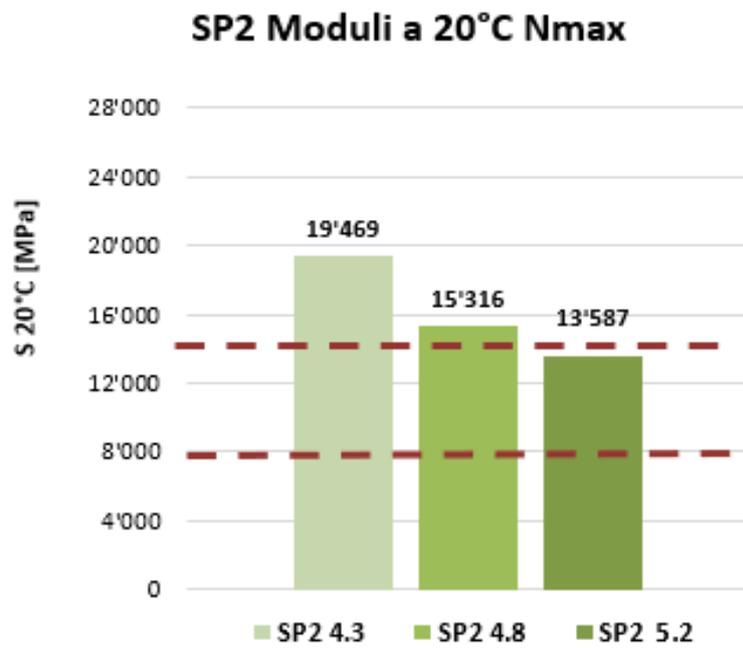


Figura 75: moduli di rigidezza a 20°C miscele SP2

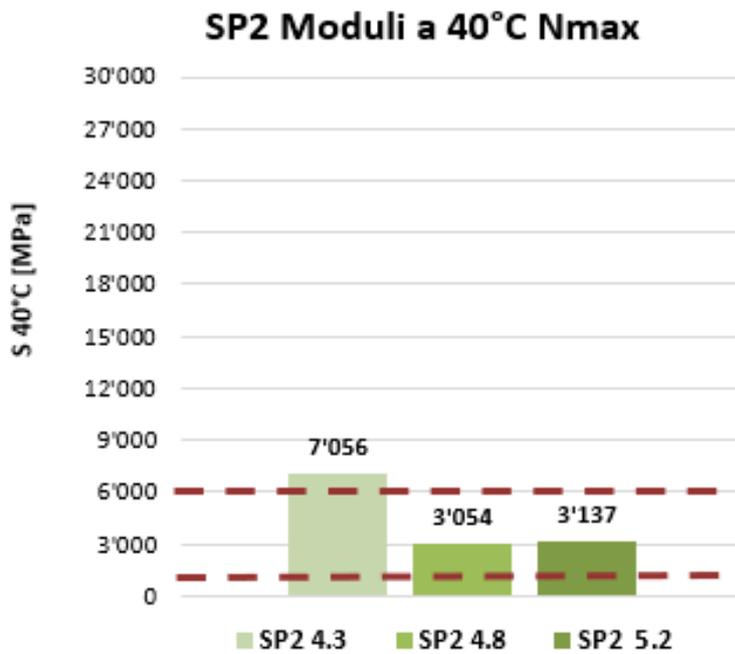


Figura 76: moduli di rigidezza a 40°C miscele SP2

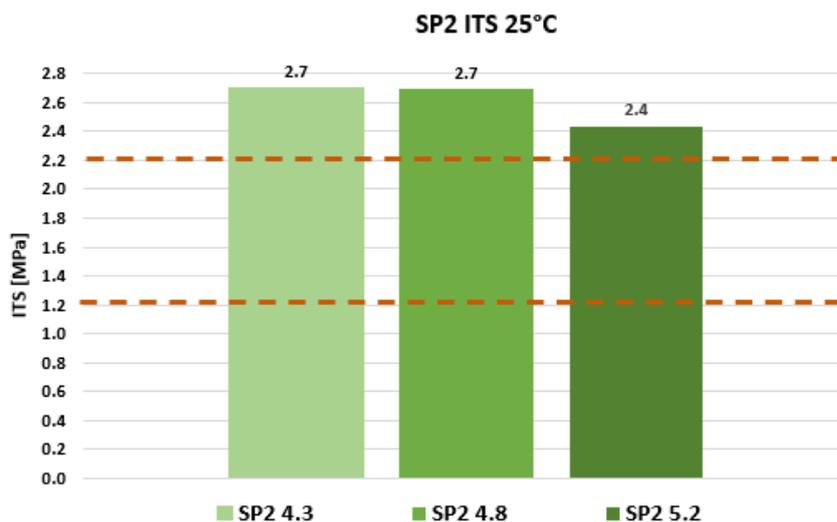


Figura 77: ITS a 25°C miscele SP2

Così come per le miscele SP1 l'andamento dei moduli risulta decrescente con la quantità di legante totale e con la temperatura.

#### 4.2.2.3 Riassunto

A seguire la tabella riassuntiva con le proprietà volumetriche e meccaniche oggetto di interesse.

Risulta evidente come l'aumento di rigidità determinato dalla plastica necessaria, per essere compensato e rientrare nei limiti, di una maggiore quantità di legante rispetto alle miscele SP1.

	Proprietà volumetriche							Proprietà meccaniche			
	Pb (%)	Pb_RAP (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	S_Nmax_10°C (MPa)	S_Nmax_20°C (MPa)	S_Nmax_40°C (MPa)	ITS (MPa)
SP2 4.3	4.3	2.36	1.3	12.8	5.1	3.9	1.9	28'843	19'469	7'056	2.7
SP2 4.8	4.8	2.35	1.8	12.7	4.5	3.3	1.5	23'630	15'316	3'054	2.7
SP2 5.2	5.3	2.34	2.3	12.1	4.2	2.8	1.3	23'107	13'587	3'137	2.4

Tabella 27: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscele SP2

### 4.2.3 PMB

Le miscele appartenenti alla famiglia PMB risultano così composte:

- 50% di aggregati vergini;
- 50% di fresato, sul peso degli aggregati;
- 0.15% di rejuvenator, calcolato sul peso della miscela;
- percentuale variabile di legante modificato hard tramite polimero.

Sono state investigate 4 diverse miscele di tipo PMB con unica distinzione la percentuale di legante totale, i codici associati sono i seguenti (il numero rappresenta la percentuale di legante totale):

- PMB 3.7 (miscela da 9kg);
- PMB 4.3 (9kg);
- PMB 4.6 (9kg);
- PMB 5.0 (9kg).

Le miscele appartenenti alla famiglia PMB, dunque, sono tutte costituite da un campione volumetrico compattato a 200 giri ed uno destinato alla fatica compattato a 120 giri.

La sostanziale differenza con le miscele precedenti (SP1 ed SP2) risulta essere la metodologia di integrazione del materiale polimerico, che, in questa famiglia di miscele, è di tipo umido.

#### 4.2.3.1 Proprietà volumetriche

In tabella 28 vengono riportate le principali caratteristiche volumetriche.

	Proprietà volumetriche					
	Pb (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	MMVT (g/cm <sup>3</sup> )
<b>PMB 3.7</b>	3.6	14.4	6.9	5.4	3.6	2.615
<b>PMB 4.3</b>	4.3	15.3	7.5	6.2	6.2	2.594
<b>PMB 4.6</b>	4.6	12.2	3.9	2.4	1.8	2.566
<b>PMB 5.0</b>	5.0	10.8	2.4	1.3	1.3	2.555

Tabella 28: proprietà volumetriche miscele PMB

#### 4.2.3.2 Proprietà meccaniche

I valori dei moduli di rigidezza e di resistenza a trazione indiretta sono rappresentati prima mediante tabella (tabella 29) e poi istogrammi (figure 78-79-80-81).

	Proprietà meccaniche			
	S <sub>Nmax_10°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_20°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_40°C</sub> (MPa)	ITS (MPa)
<b>PMB 3.7</b>	21'348	15'499	2'290	2.1
<b>PMB 4.3</b>	19'358	12'911	2'181	1.9
<b>PMB 4.6</b>	18'402	10'900	1'115	2.2
<b>PMB 5.0</b>	19'248	10'333	1'867	2.1

Tabella 29: proprietà meccaniche miscele PMB

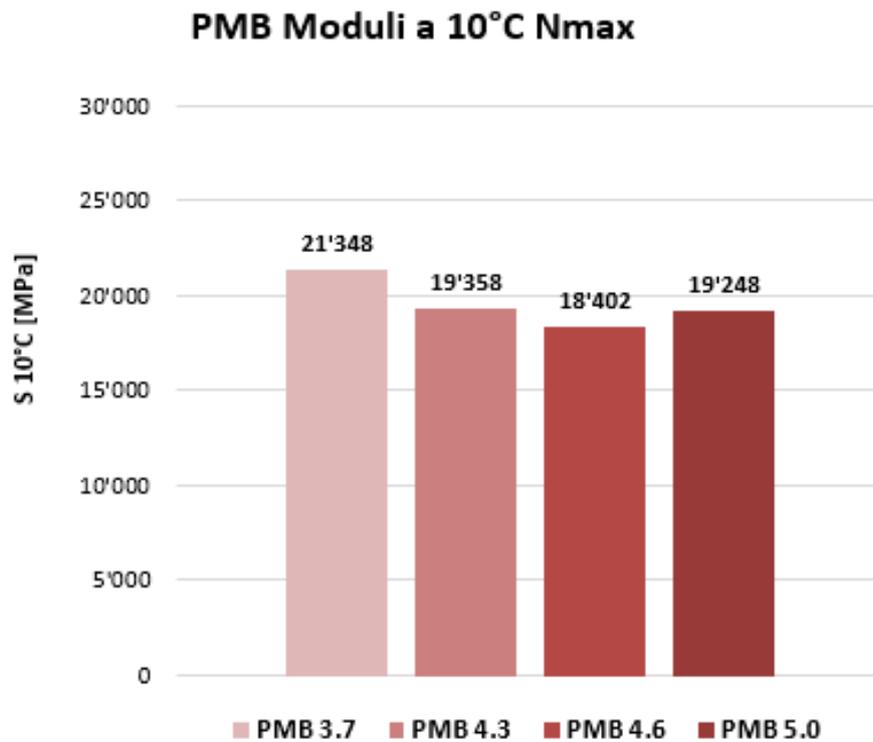


Figura 78: moduli di rigidezza a 10°C miscele PMB

### PMB Moduli a 20°C Nmax

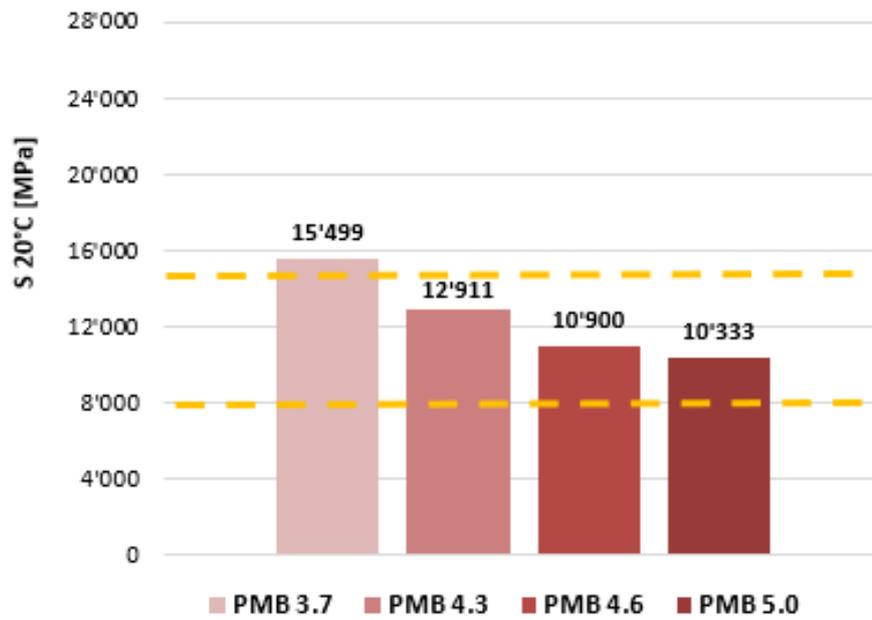


Figura 79: moduli di rigidità a 20°C miscela PMB

### PMB Moduli a 40°C Nmax

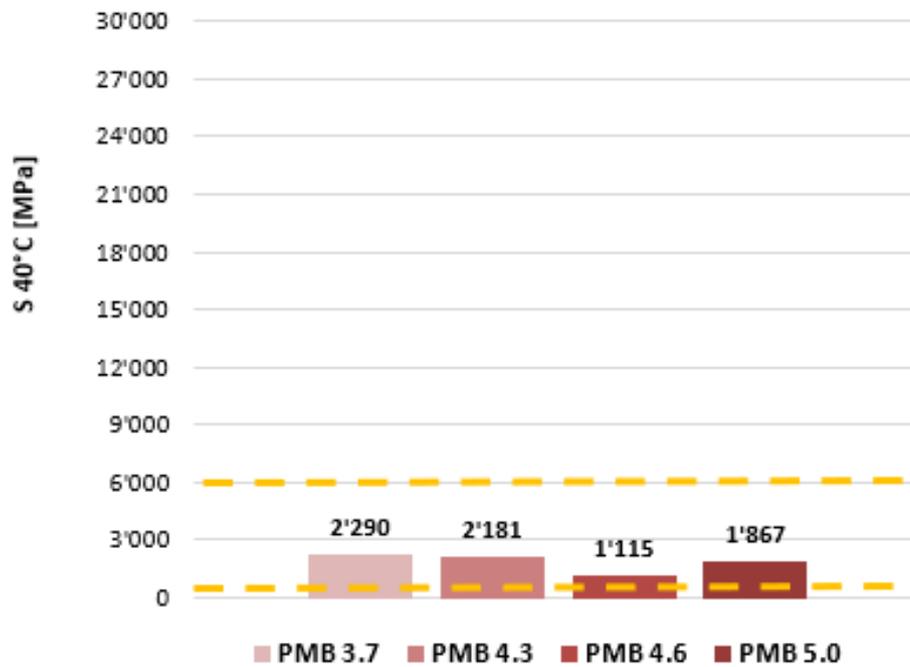
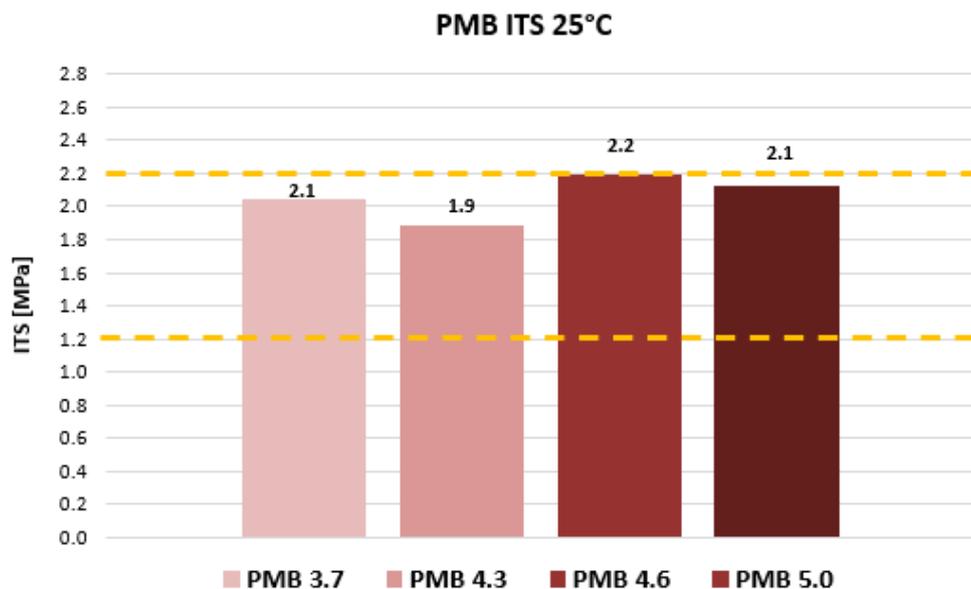


Figura 80: moduli di rigidità a 40°C miscela PMB



*Figura 81: ITS a 25°C miscela SP2*

#### 4.2.3.3 Riassunto

A seguire la tabella riassuntiva con le proprietà volumetriche e meccaniche oggetto di interesse.

Risalta agli occhi come l'unica miscela capace di soddisfare i vincoli del CSA risulta quella caratterizzata da un contenuto di legante totale del 4.6%.

	Proprietà volumetriche							Proprietà meccaniche			
	Pb (%)	Pb_RAP (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	S_Nmax_10°C (MPa)	S_Nmax_20°C (MPa)	S_Nmax_40°C (MPa)	ITS (MPa)
<b>PMB 3.7</b>	3.6	2.38	1.1	14.4	6.9	5.4	3.6	21'348	15'499	2'290	2.1
<b>PMB 4.3</b>	4.3	2.36	1.9	15.3	7.5	6.2	6.2	19'358	12'911	2'181	1.9
<b>PMB 4.6</b>	4.6	2.35	2.0	12.2	3.9	2.4	1.8	18'402	10'900	1'115	2.2
<b>PMB 5.0</b>	5.0	2.34	2.4	10.8	2.4	1.3	1.3	19'248	10'333	1'867	2.1

*Tabella 30: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscela PMB*

#### 4.2.4 RIF

Come già detto precedentemente, è stata realizzata una miscela di riferimento da 9 kg (1 provino volumetrico ed 1 destinato alla fatica) priva di RAP per poter effettuare dei confronti a parità di percentuale e tecnica di integrazione delle plastiche di riciclo. Così facendo è stato possibile isolare il contributo del fresato rispetto alla componente polimerica.

Sono stati compattati 2 provini con un contenuto di legante totale del 4.0%.

La loro composizione è la seguente:

- 100% di aggregati vergini;
- 0.15% di rejuvenator, calcolato sul peso della miscela;
- 0.30% di plastiche di riciclo, calcolato sul peso della miscela ed integrate con metodologia ibrida;
- 3.7 % di legante vergine di aggiunta.

La “ricetta” risulta, quindi, identica a quella delle miscele SP1, ma con una fase litica determinata totalmente da aggregati vergini.

#### 4.2.4.1 Riassunto

La tabella 31 riporta tutte le proprietà per l’unico contenuto di legante investigato della miscela di riferimento.

	Proprietà volumetriche					Proprietà meccaniche				
	Pb (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	v_Nmax CUT (%)	S_Nmax_10°C (MPa)	S_Nmax_20°C (MPa)	S_Nmax_40°C (MPa)	ITS (MPa)
RIF 4.0	4.0	3.7	11.5	4.5	3.3	2.2	14'888	7'320	1'187	1.2

Tabella 31: riassunto delle proprietà volumetriche e meccaniche miscela RIF

### 4.3 Confronti fra le miscele

La composizione delle miscele è stata concepita per effettuare diversi confronti e comprendere gli impatti sulle proprietà volumetriche e meccaniche al variare di diversi elementi.

In particolare:

- il confronto fra le miscela SP1 ed SP2 consente di valutare le conseguenze dell’aumento del tenore di polimero (integrato tramite metodologia ibrida) dallo 0.3% allo 0.5% (sul peso della miscela);
- l’analisi delle miscele SP1 ed SP2, realizzate con metodologia ibrida, con le PMB, frutto del processo umido, permette di comprendere l’impatto della tecnica di integrazione del polimero sulle caratteristiche finali della miscela;
- il contributo offerto dal RAP rigenerato è valutabile dallo studio delle miscele SP1 (50% di aggregati vergini e 50% di fresato) e RIF (100% aggregati

vergini), che in questa maniera viene completamente scisso dalla componente polimerica, la quale è la stessa (0.3%) ed è implementata nello stesso modo (ibrido).

#### 4.3.1 *Contenuto di vuoti*

Al fine di valutare la capacità da parte delle 3 miscele principali di “chiudersi”, ovvero ridurre il quantitativo di vuoti d’aria, sono state graficate le percentuali di vuoti al variare sia della percentuale di bitume vergine di aggiunta, sia del legante totale. Il tutto è stato implementato per i 3 quantitativi di giri oggetto di analisi dal capitolato (10, 120, 200 giri). Le aeree in rosso delimitano i campi di accettazione da capitolato della percentuale di vuoti ai vari giri.

Le figure 82-83 riguardano quello che è il quantitativo di vuoti ad Niniziale ovvero 10 giri.

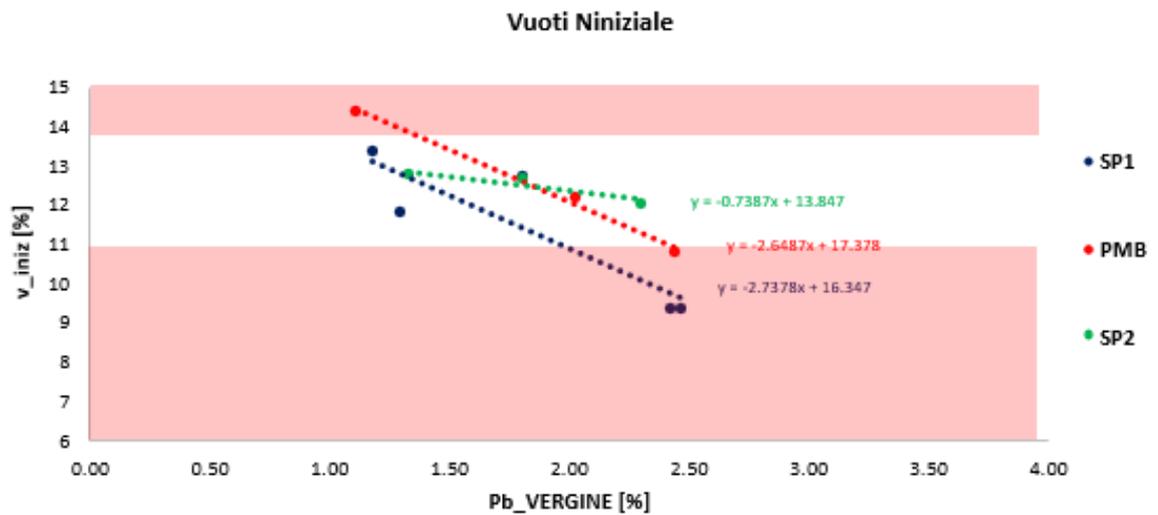


Figura 82: vuoti a 10 giri in funzione della percentuale di bitume vergine

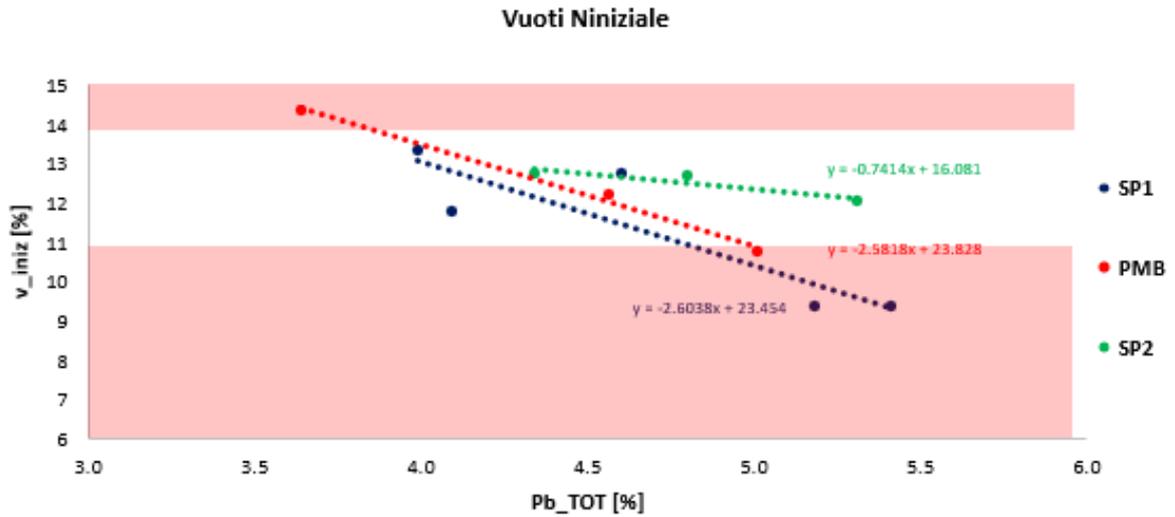


Figura 83: vuoti a 10 giri in funzione della percentuale di legante totale

Le figure 84-85 riportano la diminuzione della percentuale di vuoti per le 3 miscele a 120 giri (Ndesign).

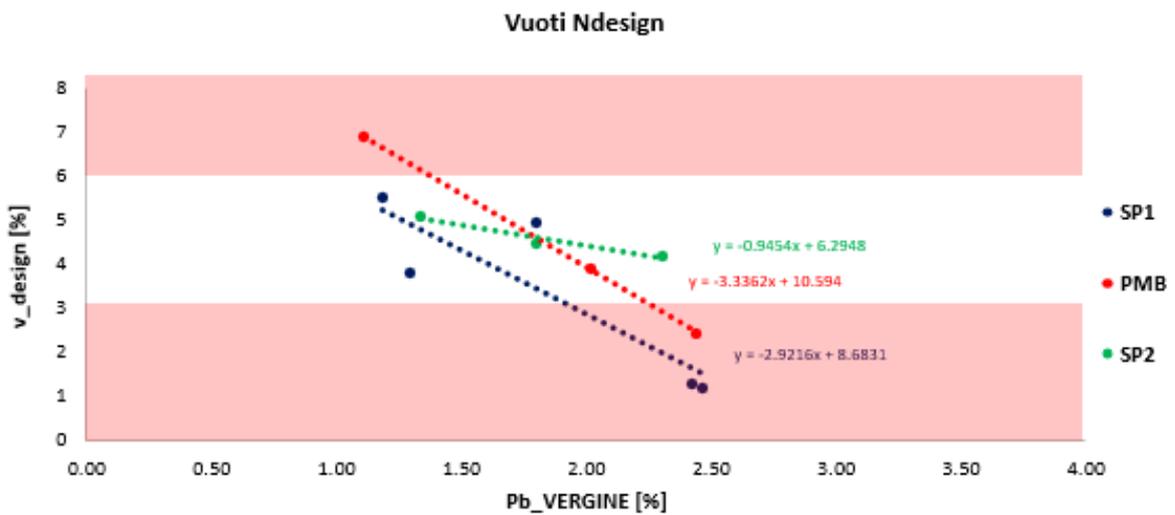


Figura 84: vuoti a 120 giri in funzione della percentuale di bitume vergine

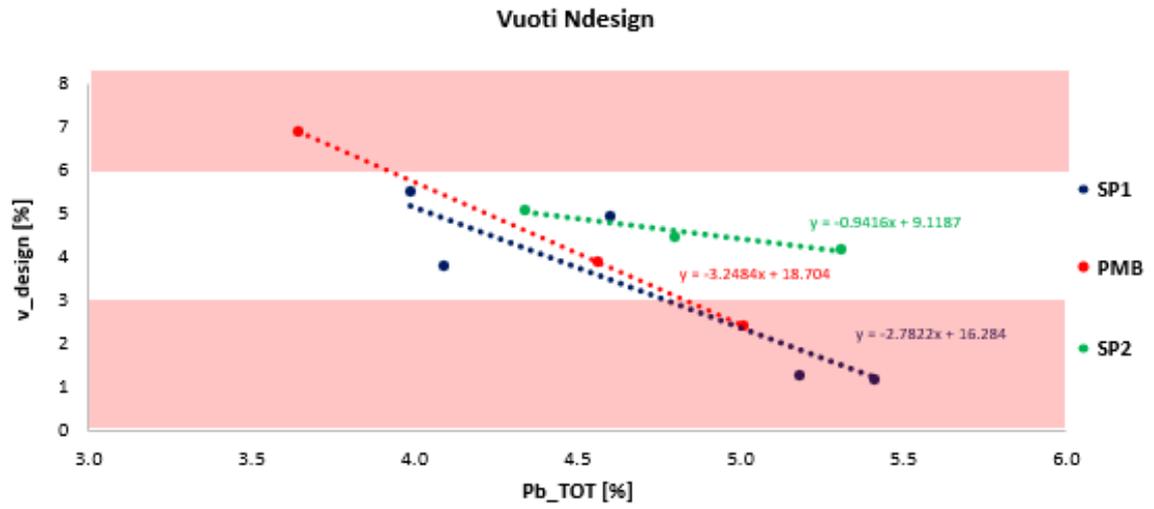


Figura 85: vuoti a 120 giri in funzione della percentuale di legante totale

Infine, i grafici sottostanti (figure 86-87) caratterizzano le proprietà volumetriche delle miscele ad Nmax, ovvero 200 giri.

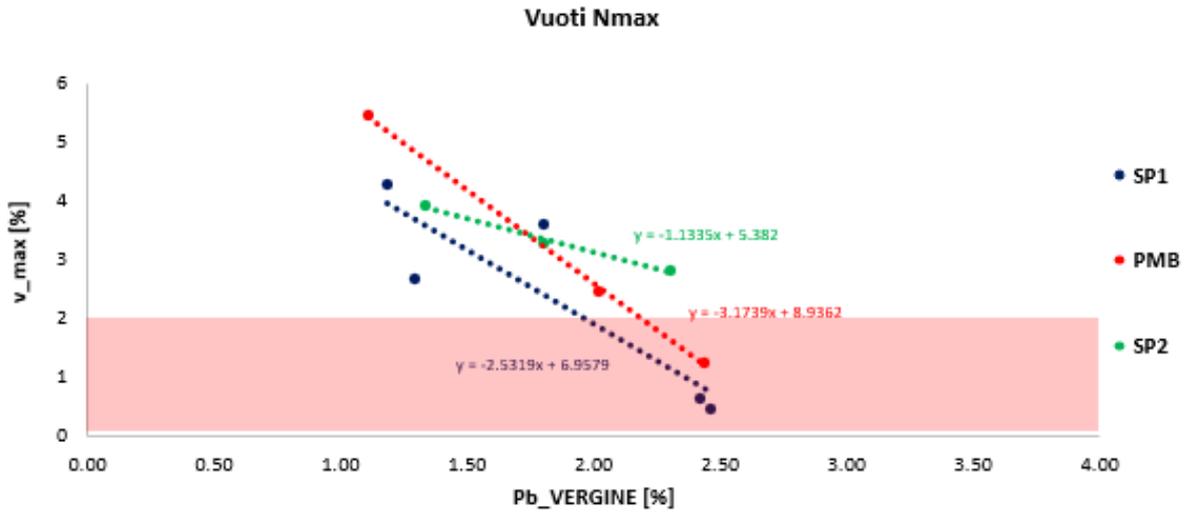


Figura 86: vuoti a 200 giri in funzione della percentuale di bitume vergine

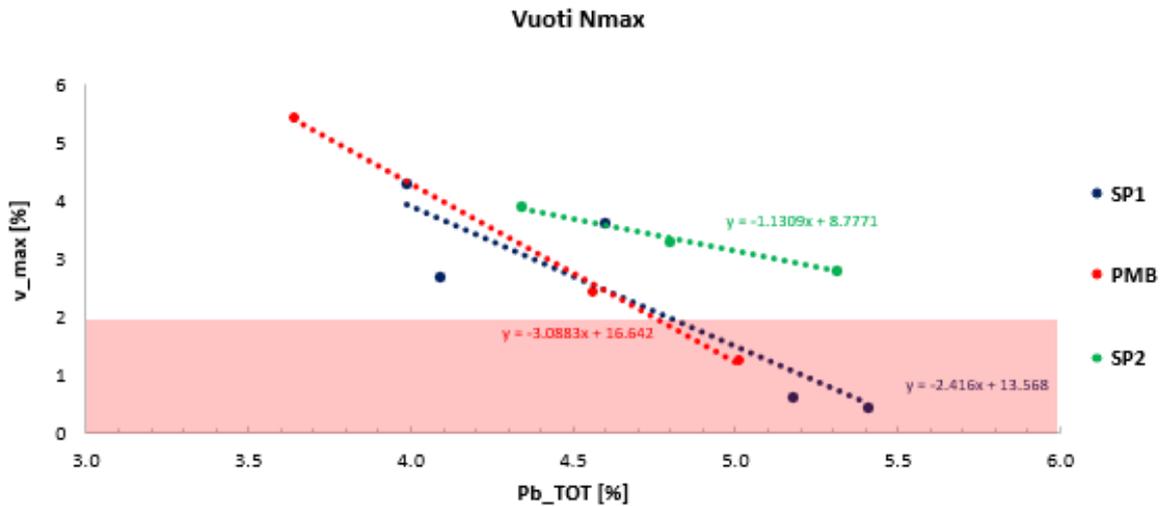


Figura 87: vuoti a 200 giri in funzione della percentuale di legante totale

A partire dai punti, rappresentanti o della media dei vuoti di 3 provini volumetrici (miscele da 60 kg) o dei vuoti di un singolo campione (miscele da 9 kg), sono state ricavate delle linee di tendenza.

Si è osservato, sperimentalmente, che la miglior regressione dei dati è ottenibile tramite una retta in un grafico con assi lineare e non logaritmici.

Dalla rappresentazione grafica delle caratteristiche volumetriche delle miscele è possibile osservare che:

- le miscele SP1 presentano un quantitativo di vuoti inferiore alle miscele PMB, particolarmente evidente a parità di bitume vergine di aggiunta. Ciò significa che l'implementazione ibrida (con percentuale di plastica dello 0.3% rispetto alla miscela) "chiude" maggiormente il conglomerato rispetto ad un processo umido con legante modificato hard;
- il confronto fra le miscele SP1 ed SP2, invece, denota come un aumento della componente polimerica (dallo 0.3% allo 0.5%) comporta un ostacolo alla compattazione della miscela e, dunque, alla diminuzione del contenuto di vuoti.

### ***4.3.2 Moduli di rigidità***

Il primo capitolo del presente elaborato ha riportato come sia il fresato sia le plastiche, a prescindere dal tipo di miscelazione, offrono un contributo irrigidente alla miscela.

Per tali ragioni quella che, probabilmente, risulta la sfida ingegneristica più rilevante per la diffusione su vasta scala delle miscele sostenibili di conglomerato bituminoso è la gestione di questi due contributi irrigidenti.

Ricordiamo come conglomerati con moduli molto alti offrono prestazioni deficitarie in termini di fessurazione termica da basse temperature.

#### **4.3.2.1 Confronto a parità di bitume vergine di aggiunta**

Al fine di analizzare l'andamento dei moduli rigidità delle varie miscele, così come fatto per i vuoti, essi sono stati graficati in funzione del bitume vergine di aggiunta (figure 88-89-90).

Questa metodologia rappresentativa permetterà di effettuare confronti a parità di legante di aggiunta, escludendo così una variabile fortemente impattante.

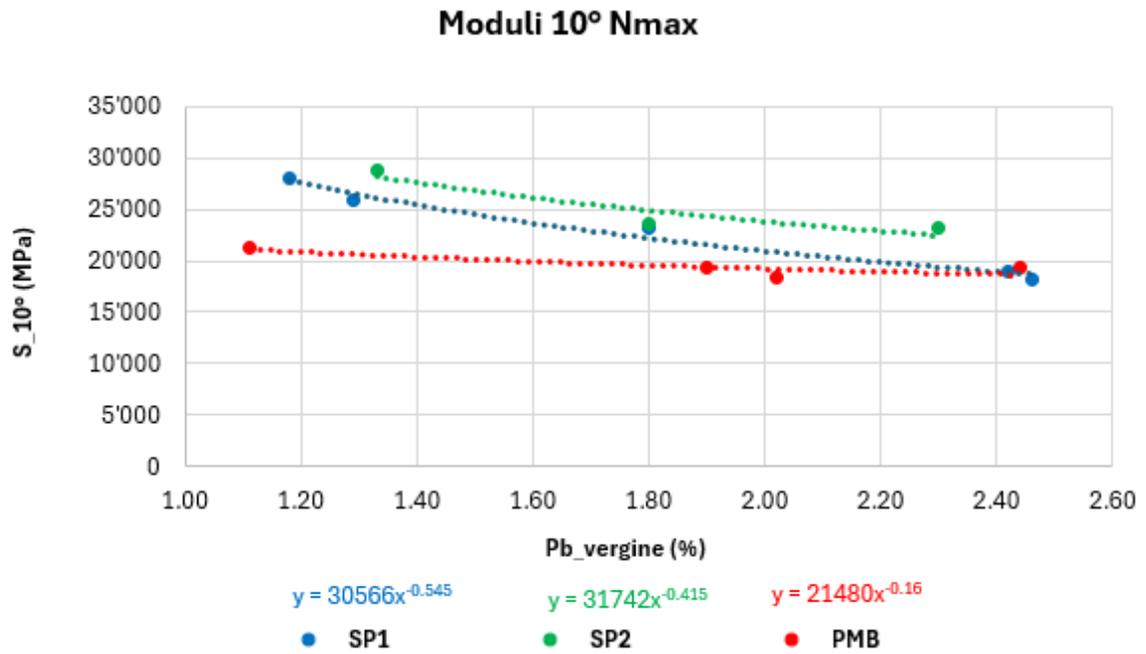


Figura 88: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 10°C

### Moduli 20° Nmax

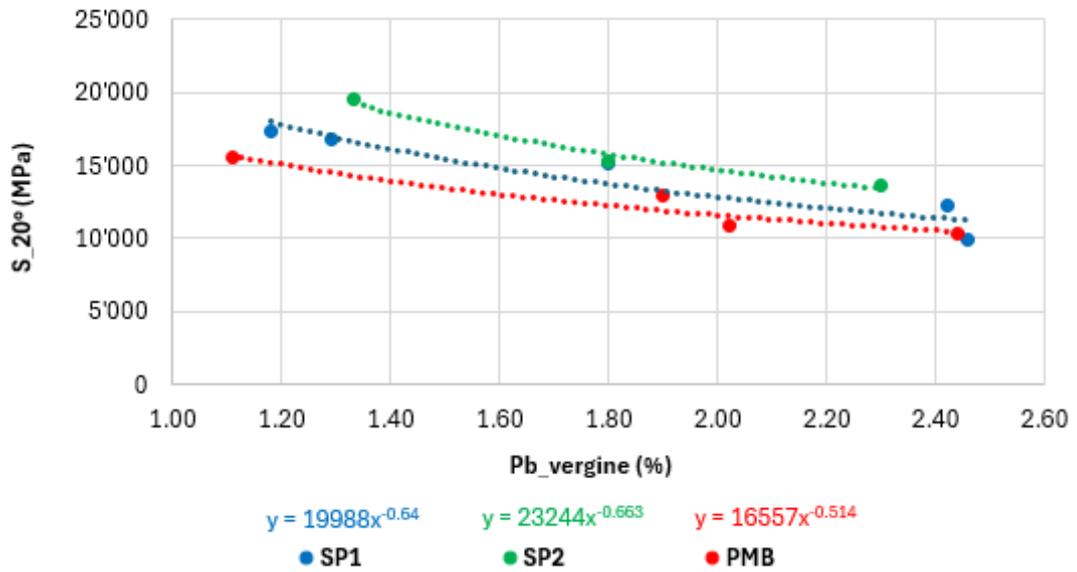


Figura 89: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 20°C

### Moduli 40° Nmax

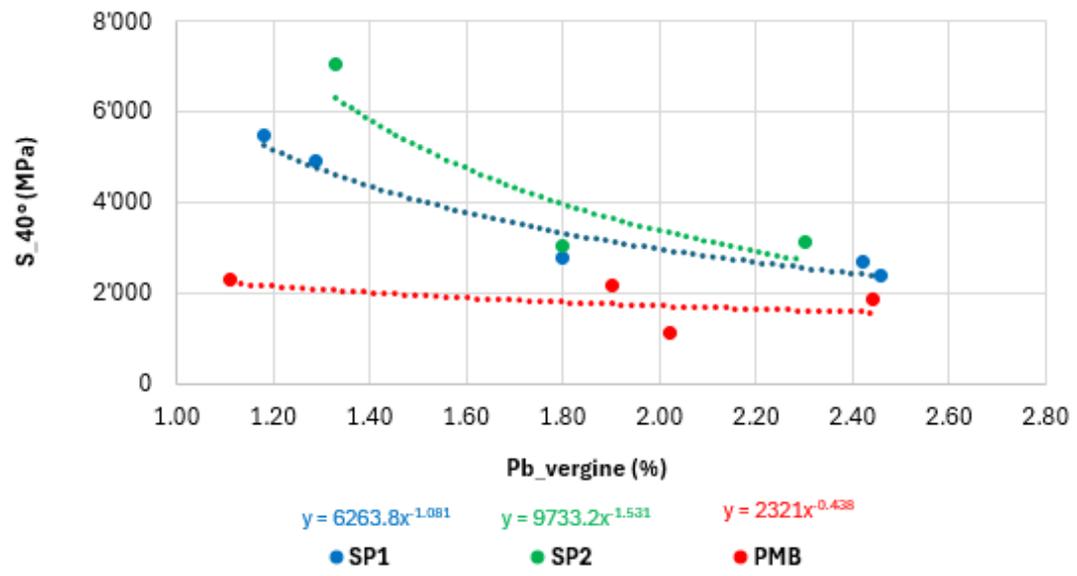


Figura 90: andamento dei moduli di rigidezza in funzione del bitume vergine di aggiunta a 40°C

Da considerazioni sperimentali e confronti di letteratura si è osservato come il miglior modo per interpolare i dati di rigidezza ottenuti, sia mediante legge di potenza.

Osservando i grafici appena riportati è possibile constatare:

- la rigidezza della miscela cresce all'aumentare del contenuto di plastica a tutte e 3 le temperature investigate, a parità di vergine. In particolar modo, le miscele PMB risultano essere quelle meno rigide, il che era prevedibile in quanto il processo umido, seppur con legante modificato hard, consente un impiego di plastiche inferiore rispetto alla metodologia ibrida;
- al crescere della percentuale di bitume vergine di aggiunta le 3 famiglie di miscele denotano un calo di rigidezza con valori che tendono ad avvicinarsi quasi asintoticamente;
- le miscele PMB risultano essere quelle meno sensibili alla percentuale di bitume di aggiunta, in quanto, alle varie temperature, le curve di regressione risultano più orizzontali.

A partire dalle equazioni di potenza, impiegate per la regressione dei dati, è stato possibile calibrare un calcolatore.

Esso, variando il contenuto di legante di aggiunta, entra all'interno dei grafici precedenti, con un valore fisso di ascissa, riporta i valori dei moduli alle 3 temperature investigate, gli incrementi percentuali ed indica anche la percentuale di legante totale.

Le figure seguenti 91-92-93 riportano 3 esempi di utilizzo del calcolatore con percentuali di bitume vergine di: 1.60%, 1.80% e 2.00%.

<b>Pbvergine (%) 1.60</b>	
Miscela	Pb <sub>TOT</sub> (%)
PMB	4.12
SP1	4.42
SP2	4.62

Miscela	S <sub>Nmax_10°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_20°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_40°C</sub> (MPa)
PMB	19'924	13'004	1'889
SP1	23'659	14'796	3'769
SP2	26'117	17'021	4'740

INCREMENTI (%)		
10°	20°	40°
19%	14%	99%
10%	15%	26%

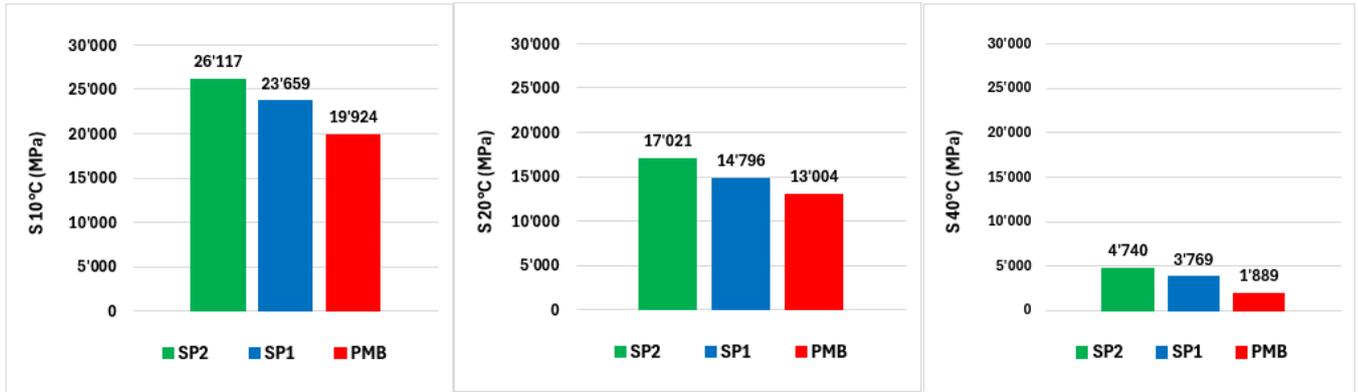


Figura 91: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta dell'1.60%

<b>Pbvergine (%) 1.80</b>	
Miscela	Pb <sub>TOT</sub> (%)
PMB	4.32
SP1	4.62
SP2	4.82

Miscela	S <sub>Nmax_10°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_20°C</sub> (MPa)	S <sub>Nmax_40°C</sub> (MPa)
PMB	19'552	12'240	1'794
SP1	22'188	13'721	3'318
SP2	24'871	15'742	3'958

INCREMENTI (%)		
10°	20°	40°
13%	12%	85%
12%	15%	19%

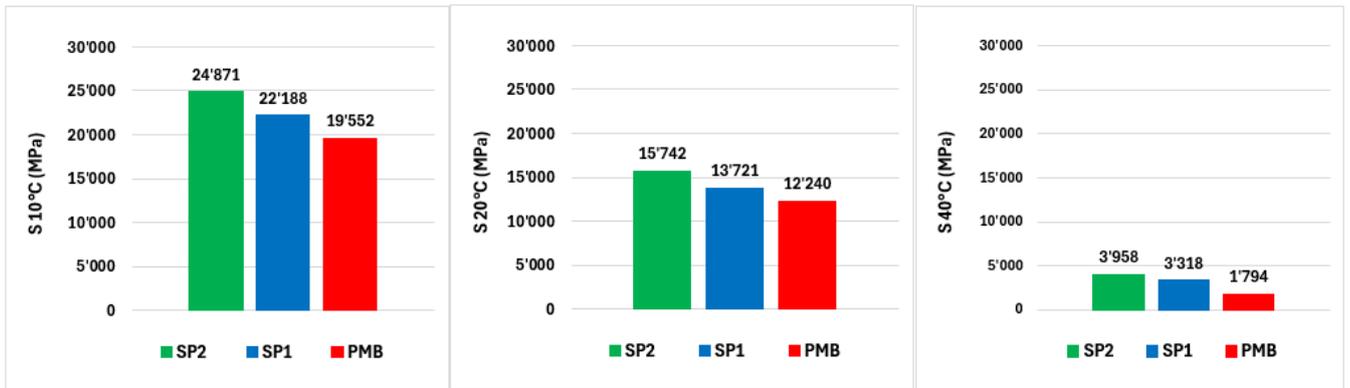


Figura 92: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta dell'1.80%

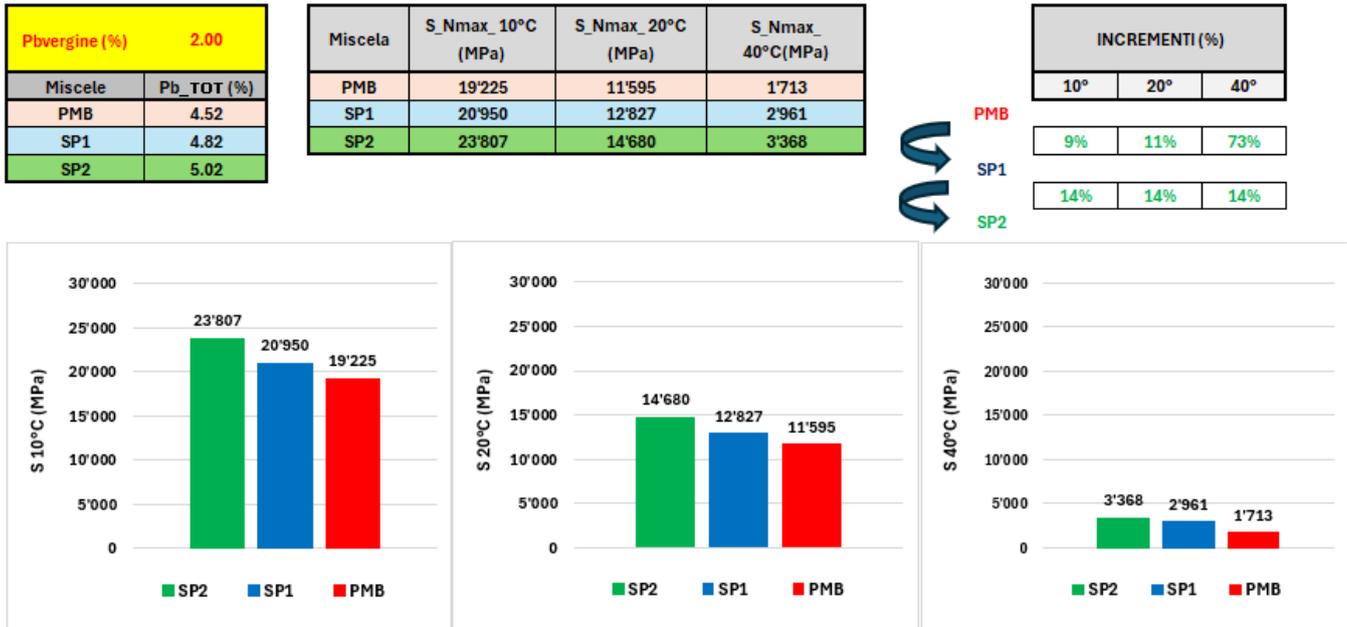


Figura 93: andamento dei moduli di rigidezza a parità di bitume vergine di aggiunta del 2.00%

Gli output dell’algoritmo denotano come:

- nel passaggio fra implementazione con processo umido ed ibrido (confronto PMB-SP1) si registra un forte aumento percentuale alla temperatura di 40°C. Questo aspetto era già evidente dalla figura 83;
- l’incremento dei moduli al crescere della componente polimerica (SP1-SP2) risulta pressoché costante alla 3 temperature di analisi.

#### 4.3.2.2 Confronto a parità di vuoti

Un secondo parametro che influenza la rigidezza della miscela, comunque correlato alla percentuale di bitume vergine di aggiunta, è la percentuale di vuoti.

Valori bassi di quest’ultimo parametro, associati ad alti contenuti di legante, portano a miscele meno rigide.

Essendo i provini testati, compattati a 200 giri, a partire dal grafico 86 (contenuto di vuoti ad Nmax in funzione del vergine di aggiunta) fissando la percentuale di vuoti al 2% (minimo valore ammissibile da capitolato), sono stati individuati 3 diversi contenuti di legante vergine, capaci di conferire tale volumetria alle 3 miscele.

Sfruttando il calcolatore, inserendo come input le percentuali di vergine, per ogni miscela sono stati ricavati i moduli di rigidezza a 10°C, 20°C e 40°C a parità di vuoti a 200 giri del 2%.

I risultati ottenuti sono riportati in tabella 32 e in figura 94-95-96.

	<b>v_Nmax (%)</b>	<b>Pb_VERG (%)</b>	<b>Pb_TOT (%)</b>	<b>S_10° (MPa)</b>	<b>S_20° (MPa)</b>	<b>S_40° (MPa)</b>
<b>PMB</b>	2.0	2.2	4.7	18'498	11'066	1'646
<b>SP1</b>	2.0	2.0	4.8	21'182	12'993	3'026
<b>SP2</b>	2.0	3.0	6.0	20'176	11'270	1'829

Tabella 32: moduli di rigidezza a parità di vuoti

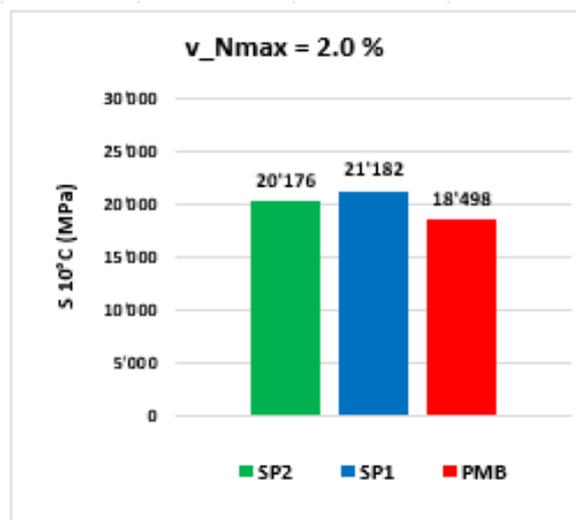


Figura 94: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 10°C

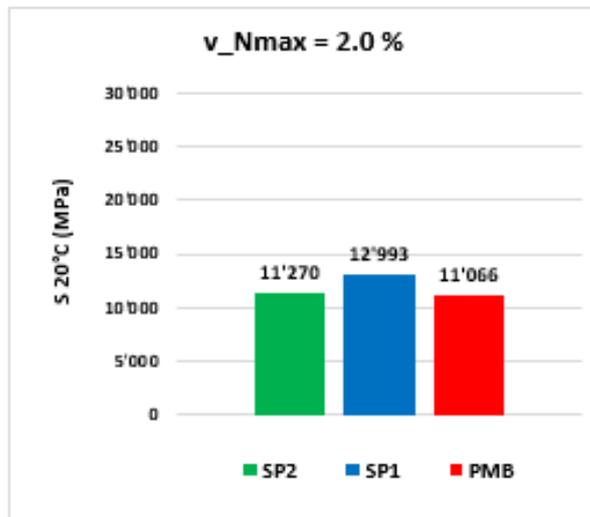


Figura 95: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 20°C

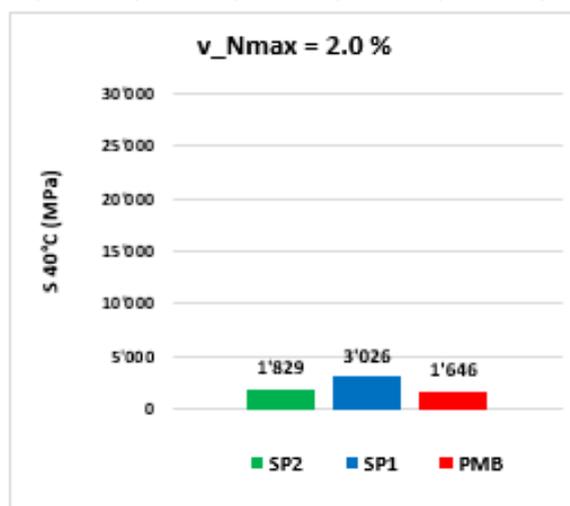


Figura 96: moduli di rigidezza a parità di vuoti a 40°C

Gli output evidenziano come a parità di vuoti a 200 giri la miscela SP1, non solo risulta più rigida della PMB, ma anche della miscela SP2 caratterizzata da una maggior tenerezza di plastica.

Questo aspetto è giustificato dalla difficoltà alla “chiusura” dei vuoti della miscela SP2; essa, infatti, per registrare un contenuto di vuoti a 200 giri del 2%, necessita di un contenuto di legante totale del 6.0% contro il 4.8% della SP1.

Questa discrepanza di bitume ampia, del 1.2%, dunque, potrebbe determinare il calo della rigidità del conglomerato più ricco in polimero.

#### 4.3.2.3 Confronto a parità di legante totale, il ruolo del fresato

Come già dichiarato uno degli obiettivi del presente elaborato è valutare il contributo irrigidente determinato da grandi percentuali di fresato (50%).

Per valutare questo aspetto è importante scindere il contributo della componente polimerica, anch'essa irrigidente.

Le miscele SP1 e RIF presentano la stessa percentuale di plastica di riciclo (0.3%) implementata nel medesimo modo (ibrido) e differiscono solo per la struttura litica: SP1 composta al 50% da aggregati vergini e al 50% da RAP, mentre la miscela di riferimento è stata prodotta con il 100% di materiale vergine.

Il confronto avviene a parità di legante totale, del 4.0%, poiché nella miscela RIF, non essendo presente RAP, il contenuto di vergine risulta essere molto elevato.

Per avere un quadro generale, vengono prima confrontate tutte le miscele a parità di legante totale (tabella 33-34 e figura 97-98-99), per poi proporre un focus specifico su SP1 e RIF (tabella 35 e figura 100-101-102).

Miscela	Pb vergine [%]	S 10°C [MPa]	S 20°C [MPa]	S 40°C [MPa]
SP2 4.0	1.0	31'942	23'478	9'961
SP1 4.0	1.2	28'030	17'338	5'472
PMB 4.0	1.5	20'163	13'512	1'952
RIF 4.0	3.7	14'888	7'320	1'187

Tabella 33: valori dei moduli a parità di legante totale

		INCREMENTI (%)		
		10°	20°	40°
	RIF	35%	85%	64%
	PMB	39%	28%	180%
	SP1	14%	35%	82%
	SP2			

Tabella 34: incrementi percentuali di rigidità fra le 4 miscele

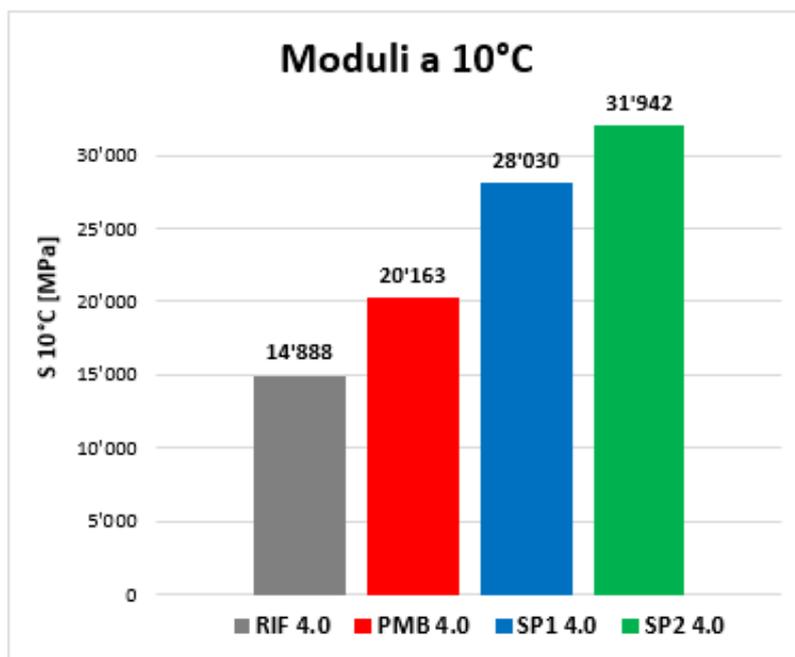


Figura 97: moduli a 10°C a parità di legante totale

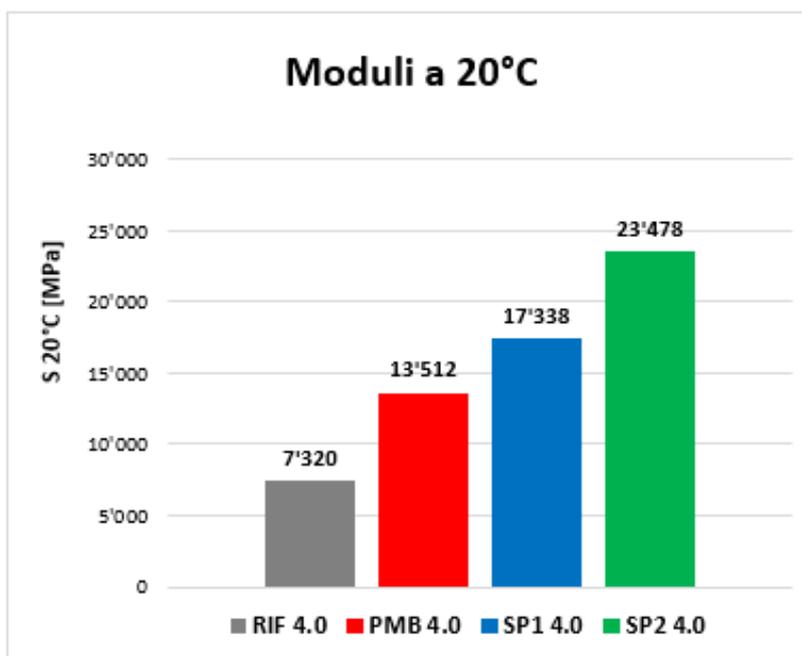


Figura 98: moduli a 20°C a parità di legante totale

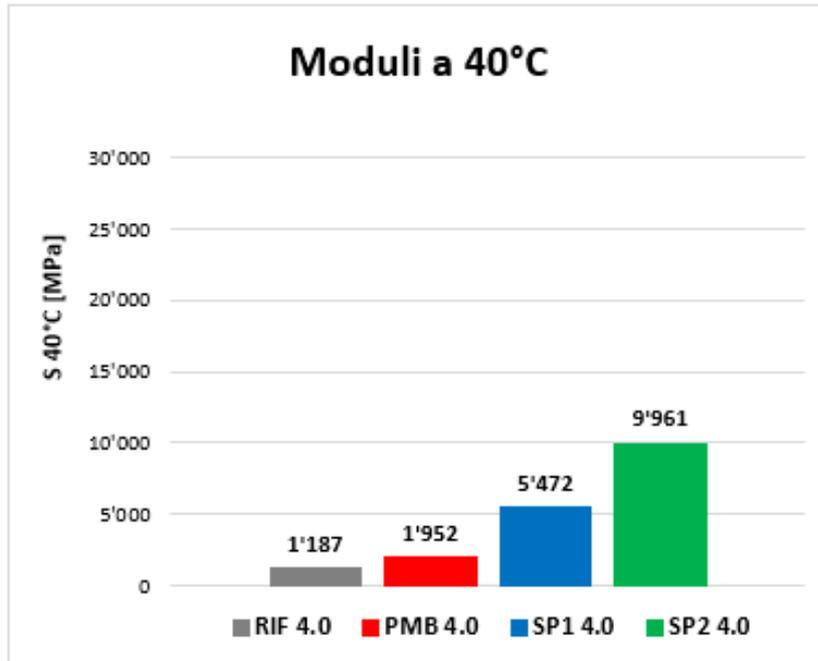


Figura 99: moduli a 40°C a parità di legante totale

Il confronto generale fra le 4 miscele permette di evidenziare come, mentre a parità di percentuale di RAP, la miscela SP1 (implementazione ibrida della plastica) risulta più rigida di quella PMB (processo umido), in assenza di fresato la miscela PMB risulta più rigida di quella di riferimento (implementazione ibrida).

Questo comportamento dimostra che il fresato conferisce alla miscela un contributo irrigidente molto rilevante, superiore a quello offerto dalla modifica della tecnica di miscelazione del compound polimerico.

Il tutto è evidente tramite i grafici seguenti.

		INCREMENTI (%)		
		10°	20°	40°
	RIF			
	SP1	88%	137%	361%

Tabella 35: incrementi percentuali di rigidezza fra le miscele RIF ed SP1

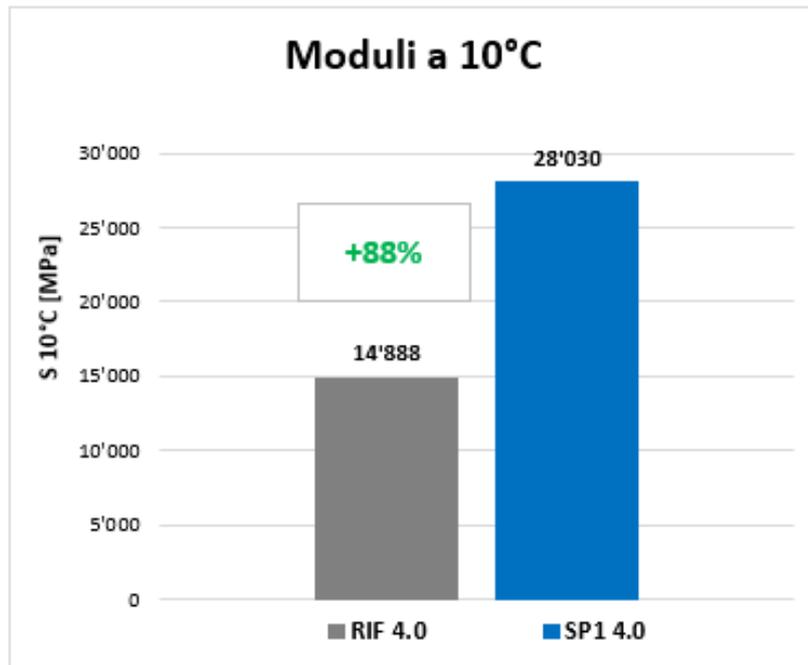


Figura 100: moduli a 10°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1

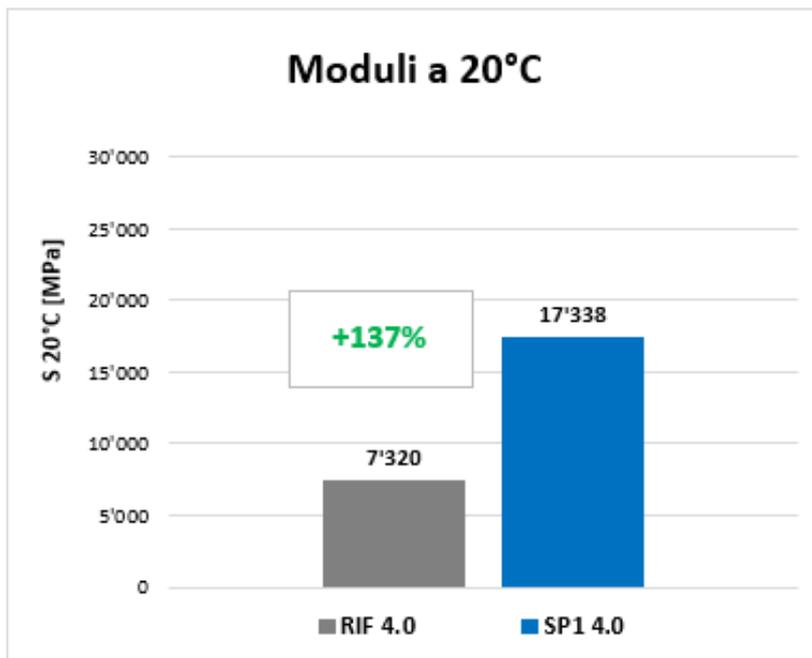


Figura 101: moduli a 20°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1

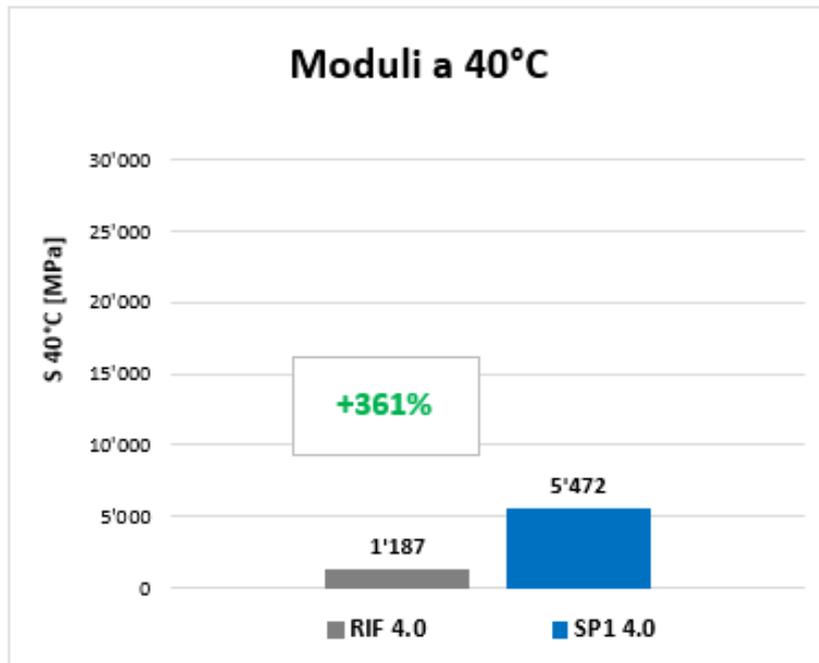


Figura 102: moduli a 40°C a parità di legante totale fra RIF ed SP1

A parità di percentuale di plastica integrata nello stesso modo, una miscela contenente il 50% di RAP (SP1) mostra valori di rigidezza enormemente maggiori e meno sensibili all'aumento di temperatura: a 40°C l'aumento percentuale è superiore al 360%. Questo dato è figlio della minor sensibilità del bitume invecchiato del RAP alle variazioni di temperatura.

La tabella 36 permette di concludere che la sostituzione con il 50% di aggregati fresati produce incrementi di moduli ben superiori rispetto a quelli dettati dall'aumento della componente polimerica dallo 0.3% allo 0.5%, il tutto a parità di legante totale.

		INCREMENTI (%)		
		10°	20°	40°
	RIF	88%	137%	361%
	SP1	14%	35%	82%
	SP2			

Tabella 36: incrementi percentuali di rigidezza fra le miscele RIF, SP1 ed SP2

### 4.3.3 Comportamento a fatica

Nel paragrafo 4.2.1 sono state riportate le rette di fatica relative alle miscele SP1.

Per quanto concerne le altre famiglie oggetto di analisi, essendo delle miscele “piccole” caratterizzate da un solo provino a fatica, non è stato possibile costruire una retta.

Sono, comunque, stati condotti dei test per le miscele SP2, PMB e RIF che possono essere considerati delle prove pilota esplorative.

Avendo a disposizione solo un provino per miscela si è cercato di tarare lo sforzo in input in modo tale da ottenere dei valori di deformazione vicini e prossimi a 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

La figura 103 riporta graficamente i risultati delle prove pilota, mentre le tabelle successive riassumono le caratteristiche dei provini e gli output dei test.

Per le miscele da 60 kg della SP1 (4.0-4.1-5.2) è stato graficato 1 punto appartenente alle rette descritte nel paragrafo 4.2.1.

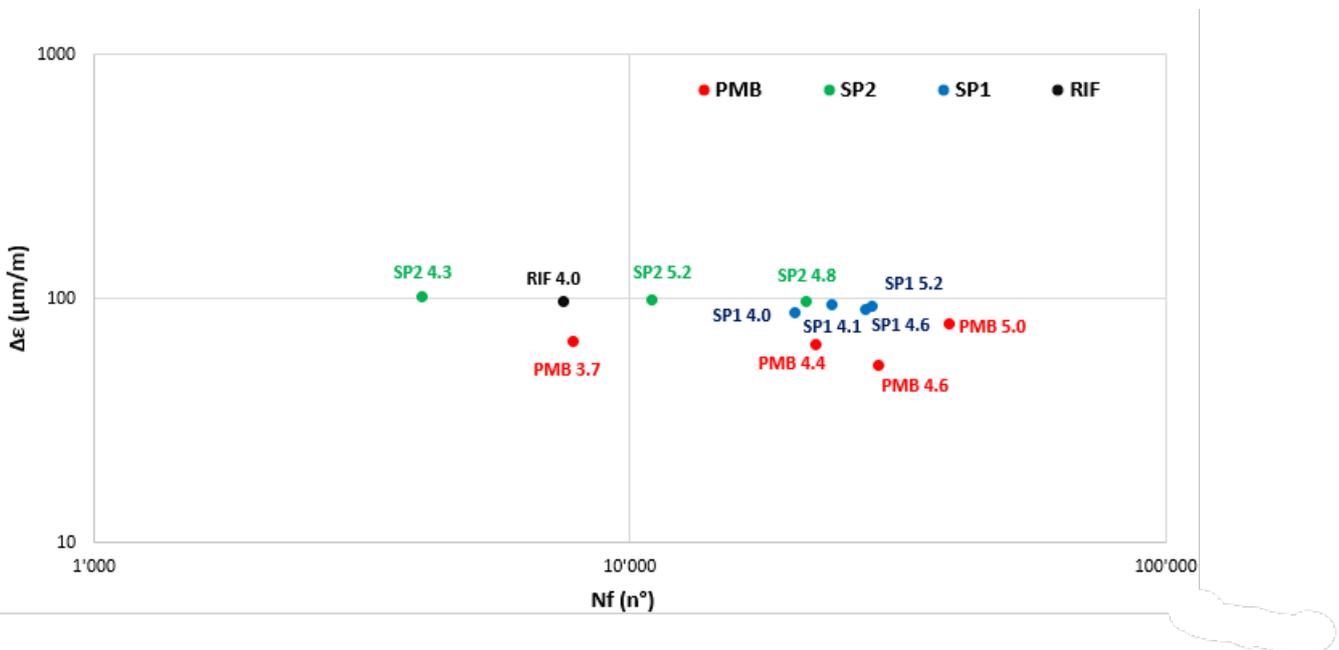


Figura 103: prove pilota a fatica

SP1					
Miscela	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
SP1 4.0	7.4	11'261	310	88	20'249
SP1 4.1	5.9	10'556	310	95	23'820
SP1 4.6	5.6	10'455	300	90	27'537
SP1 5.2	2.2	10'381	300	93	28'400

Tabella 37: risultati fatica SP1

SP2					
Miscela	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
SP2 4.3	7.4	14'873	400	101	4'100
SP2 4.8	7.2	7'044	221	97	21'390
SP2 5.2	4.5	12'454	346	99	10'966

Tabella 38: risultati fatica SP2

PMB					
Miscela	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
PMB 3.7	10.2	6'147	200	67	7'840
PMB 4.4	8.4	6'482	200	65	22'180
PMB 4.6	8.0	6'842	208	53	29'040
PMB 5.0	4.9	8'204	240	79	39'400

Tabella 39: risultati fatica PMB

RIF					
Miscela	vuoti (%)	S (MPa)	$\sigma_h$ (KPa)	$\Delta\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Nf (n°)
RIF 4.0	7.9	7'311	227	97	7'540

Tabella 40: risultati fatica RIF

Dal tipo di visualizzazione in figura 103 risulta complesso effettuare dei confronti. Per tale ragione, essendo nota l'equazione della retta a fatica della miscela SP1 5.2 e potendo ottenere quella della SP1 4.6 (noto un punto ed applicando un coefficiente angolare medio fra le 3 miscele SP1), sono stati effettuati confronti a parità di deformazione e con percentuali vicine di legante totale.

	Nf (n°)	$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
SP1 5.2	21'234	99
SP2 5.2	10'966	99

Tabella 41: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione

	Nf (n°)	$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
SP1 5.2	23'401	97
SP2 4.8	21'390	97

Tabella 42: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione

	Nf (n°)	$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
SP1 4.6	19'511	97
SP2 4.8	21'390	97

Tabella 43: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione

	Nf (n°)	$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
SP1 4.6	271'158	53
PMB 4.6	29'040	53

Tabella 44: confronti del comportamento a fatica a parità di deformazione

La tabella 41 consente di sottolineare come le miscele SP1 (caratterizzate da una minore rigidità, avendo un tenore di polimero minore) presentano una vita a fatica più duratura a parità di deformazione e legante totale.

La tabella 42 ripropone lo stesso confronto ma con la SP2 4.8 ovvero la miscela sperimentalmente più performante a fatica tra quelle con lo 0.5% di plastiche di riciclo.

Per quanto concerne la tipologia di implementazione della plastica tramite tabella 44, si nota come le miscele prodotte con tecnologia ibrida sembrano essere molto più durature.

È opportuno ricordare che le prove pilota non possono fornire delle informazioni complete riguardo il comportamento a fatica e, dunque, risulta necessario approfondire tale tematica testando un numero sufficiente di provini da creare delle rette di fatica.

#### 4.4 Definizione delle miscele ottime

Riportati i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale ed effettuati i confronti di interesse, vengono, ora, definiti quelli che sono i range di bitume vergine d'aggiunta e, dunque, anche di legante totale, tali da generare le miscele ottime per le tre famiglie di conglomerato oggetto di studio.

Le miscele ottime sono state concepite sulla base del CSA dell'autostrada A4 e, dunque, sulla base di proprietà volumetriche (contenuto di vuoti a 10,120 e 200 giri) e proprietà meccaniche (moduli di rigidezza al 20°C e 40°C).

Le limitazioni del capitolato sono state applicate sulle proprietà delle miscele sia in funzione del bitume vergine di aggiunta sia in funzione del legante totale, così da verificare che i range ottimali siano pressoché uguali.

Di seguito viene descritta la procedura implementata per la definizione delle miscele ottime per le famiglie SP1, SP2 e PMB.

La base di partenza sono stati i grafici contenenti la percentuale di vuoti in funzione del vergine di aggiunta (figure 82-84-86). Dalle rette di regressione, fissando il contenuto dei vuoti ai valori limite di capitolato sono stati individuati dei range di bitume vergine di aggiunta tali da garantire la volumetria voluta.

Per ogni miscela sono stati individuati 3 range, uno ad Niniziale (tabella 45), uno ad Ndesign (tabella 46) ed uno ad Nmax (tabella 47).

	<b>Pb_verg_14 (%)</b>	<b>Pb_verg_11 (%)</b>
<b>SP2</b>	0	3.9
<b>PMB</b>	1.3	2.4
<b>SP1</b>	0.9	2.0

*Tabella 45: range di legante vergine per i vuoti a 10 giri*

	<b>Pb_verg_6 (%)</b>	<b>Pb_verg_3 (%)</b>
<b>SP2</b>	0	3.5
<b>PMB</b>	1.4	2.3
<b>SP1</b>	0.9	1.9

*Tabella 46: range di legante vergine per i vuoti a 120 giri*

	-	Pb_verg_2 (%)
<b>SP2</b>		3.0
<b>PMB</b>		2.2
<b>SP1</b>		2.0

*Tabella 47: range di legante vergine per i vuoti a 200 giri*

Individuati i 3 range, per identificare un intervallo coerente con tutte le limitazioni volumetriche, per ogni miscela è stato assunto come limite inferiore del contenuto di vergine d'aggiunta il più alto fra i 3 e come limite superiore il valore di bitume più basso (tabella 48).

	Pb_verg- (%)	Pb_verg+ (%)
<b>SP2</b>	0	3.0
<b>PMB</b>	1.4	2.2
<b>SP1</b>	0.9	2.0

*Tabella 48: range di legante vergine sulla base della volumetria*

I range individuati, per come ottenuti, consentono di rispettare le limitazioni volumetriche del capitolato, ma non è detto che verifichino anche quelle meccaniche. Per effettuare tale verifica e, restringere ancora, se necessario, il range, i valori estremi ottenuti sono stati caricati sul calcolatore, presentato nel paragrafo 4.3.2.1, così da ottenere i moduli di rigidezza alle 2 temperature oggetto di limitazioni, 20°C e 40°C (tabella 49).

	Pbverg- (%)	Pbverg+ (%)	$\Delta$ Pbverg (%)	S_Pb-_20° (MPa)	S_Pb-_40° (MPa)	S_Pb+_20° (MPa)	S_Pb+_40° (MPa)
<b>SP2</b>	0	3.0	3.0	-	-	11'270	1'829
<b>PMB</b>	1.4	2.2	0.8	14'031	2'016	11'066	1'646
<b>SP1</b>	0.9	2.0	1.0	22'014	7'373	13'036	3'043

*Tabella 49: moduli di rigidezza per i range volumetrici*

La tabella denota come i limiti superiori, dettati dalla volumetria, verifichino anche le limitazioni di rigidezza, mentre come sia necessario aumentare i limiti inferiori per diminuire i valori di rigidezza (per le miscele SP2 ed SP1).

Per far ciò, si è aumentato il valore di bitume vergine fino a quando non portasse a valori di rigidezza a 20°C inferiori a 15mila MPa e, contemporaneamente, inferiori a 9mila MPa a 40°C (tabella 50).

	Pbverg- (%)	Pbverg+ (%)	$\Delta$ Pbverg (%)	S_Pb-_20° (MPa)	S_Pb-_40° (MPa)	S_Pb+_20° (MPa)	S_Pb+_40° (MPa)
<b>SP2</b>	2.0	3.0	1.1	14'980	3'529	11'270	1'829
<b>PMB</b>	1.4	2.2	0.8	14'031	2'016	11'066	1'646
<b>SP1</b>	1.6	2.0	0.3	14'976	3'847	13'036	3'043

*Tabella 50: moduli di rigidezza per i range volumetrici e meccanici*

Così facendo sono stati ottenuti i range di bitume vergine di aggiunta capaci, per ogni miscela, di rispettare le limitazioni del capitolato sia sulle proprietà volumetriche che meccaniche (tabella 51).

	Pbverg- (%)	Pbverg+ (%)
<b>SP1</b>	1.6	2.0
<b>SP2</b>	2.0	3.0
<b>PMB</b>	1.4	2.2

*Tabella 51: range ottimi di bitume vergine di aggiunta*

Lo stesso identico procedimento è stato implementato nuovamente, ma in funzione del legante totale.

Così come prevedibile i risultati ottenuti sono gli stessi.

La tabella 52 mostra i range ottenuti ed i relativi valori di rigidezza per soddisfare le percentuali di vuoti da capitolato, mentre la tabella 53 riporta gli intervalli di legante totale capaci di definire le miscele ottime sia dal punto di vista volumetrico che meccanico.

	Pbtot- (%)	Pbtot+ (%)	$\Delta$ Pbtot (%)	S_Pb- <sub>20°</sub> (MPa)	S_Pb- <sub>40°</sub> (MPa)	S_Pb+ <sub>20°</sub> (MPa)	S_Pb+ <sub>40°</sub> (MPa)
<b>SP2</b>	3.3	6.0	2.7	-	-	11'270	1'829
<b>PMB</b>	3.9	4.7	0.8	13'927	2'003	10'989	1'637
<b>SP1</b>	3.7	4.8	1.1	21'692	7'192	12'993	3'026

*Tabella 52: moduli di rigidezza per i range volumetrici in funzione del legante totale*

	Pbtot- (%)	Pbtot+ (%)	$\Delta$ Pbtot (%)	S_Pb- <sub>20°</sub> (MPa)	S_Pb- <sub>40°</sub> (MPa)	S_Pb+ <sub>20°</sub> (MPa)	S_Pb+ <sub>40°</sub> (MPa)
<b>SP2</b>	5.0	6.0	1.0	14'980	3'529	11'270	1'829
<b>PMB</b>	3.9	4.7	0.8	13'927	2'003	10'989	1'637
<b>SP1</b>	4.4	4.8	0.4	14'976	3'847	12'993	3'026

*Tabella 53: moduli di rigidezza per i range volumetrici e meccanici in funzione del legante totale*

Trasformando i contenuti di legante totale in vergine di aggiunta, semplicemente sottraendo i contributi di RAP, plastiche e rejuvenator, è possibile confrontare gli intervalli con quelli calcolati precedentemente sulla base del solo bitume vergine.

La tabella 54 permette di evidenziare come i range ricavati siano i medesimi.

	da calcolo del Pb di aggiunta		da calcolo del Pb TOT	
	Pbverg- (%)	Pbverg+ (%)	Pbverg- (%)	Pbverg+ (%)
<b>PMB</b>	1.4	2.2	1.4	2.2
<b>SP1</b>	1.6	2.0	1.6	2.0
<b>SP2</b>	2.0	3.0	2.0	3.0

*Tabella 54: confronto fra i risultati ottenuti sulla base del vergine di aggiunta e del legante totale*

Vengono ora riportati gli intervalli per la definizione delle miscele ottime in funzione del vergine di aggiunta e del legante totale (tabella 55).

	Pb_verg- (%)	Pb_verg+ (%)	Pb_TOT- (%)	Pb_TOT+ (%)
<b>PMB</b>	1.4	2.2	3.9	4.7
<b>SP1</b>	1.6	2.0	4.4	4.8
<b>SP2</b>	2.0	3.0	5.0	6.0

*Tabella 55: range di definizione delle miscele ottime*

Definiti i range delle miscele ottime, è opportuno confrontarli con i risultati della campagna sperimentale realizzata in laboratorio (tabella 56).

	Proprietà volumetriche					Proprietà meccaniche	
	Pb (%)	Pb_VERG (%)	v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	S_Nmax_20°C (MPa)	S_Nmax_40°C (MPa)
<b>SP1 4.0</b>	4.0	1.2	13.4	5.5	4.3	17'338	5'472
<b>SP1 4.1</b>	4.1	1.3	11.8	3.8	2.7	16'821	4'912
<b>SP1 4.6</b>	4.6	1.8	12.8	4.9	3.6	15'153	2'779
<b>SP1 5.2</b>	5.2	2.4	9.4	1.3	0.6	12'263	2'665
<b>SP1 5.4</b>	5.4	2.5	9.4	1.2	0.4	9'849	2'364
<b>PMB 3.7</b>	3.6	1.1	14.4	6.9	5.4	15'499	2'290
<b>PMB 4.6</b>	4.6	2.1	12.2	3.9	2.4	10'900	1'115
<b>PMB 5.0</b>	5.0	2.5	10.8	2.4	1.3	10'333	1'867
<b>SP2 4.3</b>	4.3	1.3	12.8	5.1	3.9	19'469	7'056
<b>SP2 4.8</b>	4.8	1.8	12.7	4.5	3.3	15'316	3'054
<b>SP2 5.2</b>	5.3	2.3	12.1	4.2	2.8	13'587	3'137

*Tabella 56: risultati della campagna sperimentale*

Dal confronto delle tabelle 55 e 56 è possibile osservare:

- per la miscela SP1 il range ottenuto matematicamente indica un intervallo di legante totale fra 4.4% e 4.8% e, infatti, la miscela realizzata al 4.6% verifica le limitazioni del capitolato;
- per la miscela SP2 l'intervallo ottenuto è fra il 5.0% e 6.0%, interno a questo range è la miscela SP2 5.2 la quale soddisfa a pieno tutti i requisiti;
- la gamma di valori accettabili per le miscele PMB è fra 3.9% e 4.7%, la miscela realizzata con un legante totale del 4.6%, infatti, è da considerarsi ottima dal punto di vista volumetrico e meccanico.

## ***5 Conclusioni e sviluppi futuri***

Le miscele sostenibili rappresentano la chiave per la transizione ad una mobilità più ecologica e ad un futuro più verde.

Il fresato e le plastiche di riciclo sono materiali non solo capaci di ridurre l'impatto ambientale delle attività di costruzione e manutenzione stradale, ma contribuiscono, anche, a promuovere un'economia circolare in cui i rifiuti sono trasformati in risorse preziose, garantendo al contempo la sicurezza e la qualità delle nostre strade.

Il presente elaborato di tesi aveva come scopo principali dimostrare e verificare la fattibilità di realizzazione di miscele sostenibili, ad alto contenuto di fresato e plastiche di riciclo, capaci di traguardare i principali requisiti tecnici proposti dai capitolati.

Dall'analisi della letteratura e, successivamente, dai risultati sperimentali è emerso come il RAP e le plastiche di riciclo concorrano, entrambi, ad irrigidire le miscele bituminose. Tali contributi irrigidenti devono essere, correttamente, gestiti e calibrati al fine di conferire durabilità nei confronti di tutti i possibili degradi.

Dopo avere descritto ed analizzato le caratteristiche dei materiali implementati, sono state presentate le miscele bituminose realizzate.

Esse sono state concepite affinché consentissero di traguardare determinati obiettivi:

- verificare che miscele ad alto contenuto di fresato e plastiche possano soddisfare i requisiti volumetrici e meccanici proposti dai capitolati;
- confrontare i risultati sperimentali di miscele con una diversa metodologia di implementazione e tenore della componente polimerica;
- isolare il contributo irrigidente del fresato, scindendolo da quello offerto dalle plastiche;
- proporre delle linee guida per la realizzazione dello studio di mix-design di miscele sostenibili, individuando i range di legante per la determinazione di miscele sostenibili ottime.

Le miscele bituminose realizzate e testate presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino sono:

- SP1: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator, 0.3% (sul peso della miscela) del compound polimerico di riciclo implementato tramite metodologia ibrida e, infine, una percentuale variabile di legante vergine tal quale;
- SP2: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator, 0.5% (sul peso della miscela) del compound polimerico di riciclo implementato tramite metodologia ibrida e, infine, una percentuale variabile di legante vergine tal quale;
- PMB: costituita dal 50% da aggregati vergini, 50% (sul peso degli aggregati) da fresato, 0.3% (sul peso del fresato) di rejuvenator e, infine, una percentuale variabile di bitume modificato hard con processo umido;
- RIF: 100% di aggregati vergini, 0.3% di polimero con metodologia ibrida ed un solo dosaggio di legante tal quale. Non è da considerare una vera e propria miscela, ma come dei provini di riferimento utili per scindere il contributo del RAP, essendone privi, dal ruolo delle plastiche.

L'elaborazione dei dati, ottenuti dalla campagna sperimentale condotta, ha permesso di concludere:

- per tutte e 3 le miscele sostenibili è stato possibile identificare un range di legante capace soddisfare i principali requisiti in termini di proprietà volumetriche e meccaniche;
- dal punto di vista volumetrico si è osservato come, a parità di legante vergine di aggiunta, l'implementazione ibrida dello 0.3% di plastiche di riciclo conferisce una maggior capacità di chiusura dei vuoti d'aria rispetto ad un processo umido con legante modificato hard. Tuttavia, l'incremento della componente polimerica dallo 0.3% allo 0.5% ha ostacolato la compattazione della miscela e la diminuzione dei vuoti;
- la rigidità della miscela risulta crescente all'aumentare del contenuto di plastica a tutte e 3 le temperature investigate (10°C, 20°C, 40°C), a parità di

bitume vergine di aggiunta. In particolar modo, le miscele PMB risultano essere quelle meno rigide, il processo umido, infatti, seppur con legante modificato hard, consente un impiego di plastiche inferiore rispetto alla metodologia ibrida;

- al crescere della percentuale di bitume vergine di aggiunta le 3 famiglie di miscele denotano un calo di rigidità con valori che tendono ad avvicinarsi quasi asintoticamente;
- le miscele PMB risultano essere quelle meno sensibili alla percentuale di bitume di aggiunta, in quanto, alle varie temperature, le curve di regressione del modulo di rigidità risultano più orizzontali rispetto alle miscele con implementazione ibrida del polimero;
- dal confronto delle rigidità, a parità di legante totale, delle miscele, compresa quella di riferimento, priva di fresato, si denota come il RAP conferisca un contributo irrigidente molto rilevante, superiore a quello offerto dalla modifica della tecnica di miscelazione del compound polimerico;
- a parità di percentuale di plastica, integrata nello stesso modo, una miscela contenente il 50% di RAP (SP1) mostra valori di rigidità enormemente maggiori e meno sensibili all'aumento di temperatura. Quest'ultimo aspetto è figlio della minor sensibilità del bitume invecchiato del fresato alle variazioni di temperatura;
- la sostituzione del 50% di aggregati vergini con il 50% di fresato produce incrementi di moduli ben superiori rispetto a quelli dettati dall'aumento della componente polimerica dallo 0.3% allo 0.5%, il tutto a parità di legante totale.

Per quanto i risultati ottenuti evidenziano la fattibilità di realizzazione di miscele sostenibili, ad alto contenuto di fresato e plastiche di riciclo, è doveroso sottolineare come siano necessari ulteriori approfondimenti ed analisi per garantirne la possibilità di produzione su larga scala.

In particolare:

- nonostante le tecniche di miscelazione siano state tarate e concepite per essere il più possibile simulative di un impianto di miscelazione discontinuo, le ovvie differenze in termini di attrezzature, tempi e temperature in gioco fra un laboratorio ed un impianto, costringe a confrontare ed analizzare l'effettiva congruenza prestazionale dei conglomerati prodotti nelle due sedi;
- è necessario approfondire il comportamento a fatica delle miscele sostenibili, così da comprendere se l'aumento di rigidità, causato da alti contenuti di fresato e plastiche, risulti compromettente per la durata a lungo termine di tali conglomerati.

## ***Bibliografia***

1. Southern African Bitumen Association – SABITA (2019). Use of Reclaimed Asphalt in the Production of Asphalt.
2. West, C.R.; Copeland, A. (2015). High RAP Asphalt Pavements - Japan Practice - Lessons Learned - NAPA, Information Series 139; National Asphalt Pavement Association (NAPA).
1. Newcomb, D.E.; Brown, E.R.; Epps, J.A. (2015). Designing HMA Mixtures with High RAP Content: A Practical Guide; Quality Improvement Series 124; NAPA.
2. Rosa, L. (2010). Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali.
3. Copeland, A. (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (No. FHWA-HRT-11-021). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology.
4. Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (1998). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant's Reference Book* (No. FHWA-SA-98-042)
5. Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230-245.
6. West, R. C., Willis, J. R., & Marasteanu, M. O. (2013). *Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content* (Vol. 752). Transportation Research Board.
7. Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13(18), 4052.
8. Lo Presti, D., Vasconcelos, K., Orešković, M., Pires, G. M., & Bressi, S. (2020). On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2071-2090.
9. Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement—a literature review.
10. Vidal, R.; Moliner, E.; Martínez, G.; Rubio, M.C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement.
11. Brett, A.W.; Willis, J.R.; Ross, T.C. (2018). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage.
12. United States Environmental Protection Agency (2023). Plastics: Material-Specific Data.
13. Chin, C., & Damen, P. (2019). *Viability of using recycled plastics in asphalt and sprayed sealing applications* (No. AP-T351-19).
14. Chen, Y.; Cui, Z.; Cui, X.; Liu, W.; Wang, X.; Li, X.; Li, S. (2019). Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China.

15. Leal Filho, W., Saari, U., Fedoruk, M., Iital, A., Moora, H., Klöga, M., & Voronova, V. (2019). An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. *Journal of cleaner production*, 214, 550-558.
16. Elnaml, I., Liu, J., Mohammad, L. N., Wasiuddin, N., Cooper III, S. B., & Cooper Jr, S. B. (2023). Developing Sustainable Asphalt Mixtures Using High-Density Polyethylene Plastic Waste Material. *Sustainability*, 15(13), 9897.
17. Mehta, D., Saboo, N., Abraham, S. M., & Diwaker, U. (2023). A review on the use of waste plastics in hot mix asphalt. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 1-44.
18. Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials*, 2, 100031.
19. Liang, M., Xin, X., Fan, W., Zhang, J., Jiang, H., & Yao, Z. (2021). Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(1), 11-20.
20. Audy, R., Enfrin, M., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2022). Selection of recycled waste plastic for incorporation in sustainable asphalt pavements: A novel multi-criteria screening tool based on 31 sources of plastic. *Science of the Total Environment*, 829, 154604.
21. Willis, R., Yin, F., & Moraes, R. (2020). Recycled plastics in asphalt part A: state of the knowledge.
22. Patil, P., Stankevich, N., Tsydenova, N., & Diana, Z. (2023). Plastic Waste in Road Construction-A Path Worth Paving?: Application of Dry Process in South Asia.
23. Boom, Y. J., Enfrin, M., Swaney, M., Masood, H., Pramanik, B. K., Robert, D., & Giustozzi, F. (2023). Engineering properties, microplastics and emissions assessment of recycled plastic modified asphalt mixtures. *Science of The Total Environment*, 164869.
24. Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European polymer journal*, 41(12), 2831-2844.
25. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. D. C. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646.
26. Yu, R., Fang, C., Liu, P., Liu, X., & Li, Y. (2015). Storage stability and rheological properties of asphalt modified with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite. *Applied Clay Science*, 104, 1-7.
27. Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., & Indacochea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt

concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, 112, 1133-1140.

28. Pasetto, M., Baliello, A., Pasquini, E., & Poulikakos, L. (2022). Dry addition of recycled waste polyethylene in asphalt mixtures: A laboratory study. *Materials*, 15(14), 4739.
29. Boom, Y. J., Enfrin, M., Grist, S., Robert, D., & Giustozzi, F. (2022). Laboratory evaluation of PAH and VOC emission from plastic-modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134489.
30. Assaf, H., & Abdo, A. A. (2022). Life cycle assessment of incorporating recycled materials in pavement design. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.
31. Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R., & Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130405.
32. Vasudevan, R., Sekar, A. R. C., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way—Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28(1), 311-320.
33. Pyrig, Y., Galkin, A., Oksak, S., Ilin, I., & Shyika, Y. (2022). Influence of Rejuvenator on the Properties of Bitumen and Asphalt Concrete. *Key Engineering Materials*, 938, 225-233.
34. BS EN 12697-5.
35. BS EN 12697-6.
36. BS EN 12697-23.
37. BS EN 12697-24.
38. BS EN 12697-26.
39. BS EN 12697-31.
40. BS EN 12697-35.
41. BS EN 12697-38.
42. BS EN 12697-39.

Desidero concludere ringraziando coloro che, con il loro aiuto, mi hanno supportato e consentito di traguardare questo importante obiettivo.

In primis ringrazio il prof. Baglieri ed il prof. Dalmazzo per il loro supporto costante e la loro attenta e stimolante supervisione.

Una figura indispensabile per la mia attività di laboratorio è stata Joseph, ti ringrazio per la pazienza e la dedizione con la quale mi hai sempre seguito e, soprattutto, per la fiducia che hai riposto in me.

Buon viaggio...