



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Infrastrutture e Sistemi di Trasporto

A.A. 2025/2026

Sessione di Laurea Ottobre 2025

Miscele sostenibili con RAP e plastiche da riciclo: Mix Design e analisi delle caratteristiche volumetriche e meccaniche

Relatori:

Prof. Dalmazzo Davide
Prof. Tsantilis Lucia
Prof. Baglieri Orazio
Prof. Santagata Ezio
Cimenti Davide

Candidato:

Giordana Marco

ABSTRACT

Il presente lavoro di Tesi è incentrato sullo sviluppo di conglomerati bituminosi sostenibili per la realizzazione di strati di usura. L'obiettivo principale è quello di valutare la possibilità di inserire all'interno dei conglomerati bituminosi plastiche da riciclo (WP) e studiare le proprietà volumetriche e meccaniche, nel rispetto dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) relativi alle temperature di miscelazione e stesa.

La ricerca si è concentrata sulla realizzazione e analisi di miscele sperimentali che prevedono al loro interno due diverse tipologie di plastiche da rifiuto inserite in due diverse percentuali sul peso totale della miscela, e diverso dosaggio di bitume di apporto. L'inserimento delle plastiche nei conglomerati bituminosi è stato fatto seguendo la modalità "dry" e, successivamente, sono state condotte indagini per analizzare le caratteristiche volumetriche e meccaniche dei conglomerati ottenuti, oltre a studiarne le proprietà intrinseche.

I risultati hanno evidenziato che le plastiche possono sia fondere, agendo come sostituto parziale del bitume, sia rimanere allo stato solido, in base alla tipologia e alla granulometria delle particelle, agendo in questo modo come materiale inerte. Inoltre, l'inserimento della plastica influenza le miscele sia da un punto di vista delle caratteristiche volumetriche che meccaniche.

Questo studio conferma la fattibilità tecnica dell'utilizzo di plastiche da rifiuto nei conglomerati bituminosi. L'integrazione di questi materiali non solo rappresenta una soluzione concreta per il riciclo della plastica e per la riduzione dell'impatto ambientale, ma offre anche la possibilità di migliorare le prestazioni del materiale finale, aprendo la strada a nuove applicazioni per un'economia circolare nel settore delle costruzioni stradali.

Parole chiave: conglomerato bituminoso, plastica da riciclo, strato di usura, metodo dry, caratteristiche volumetriche, caratteristiche meccaniche, ITSr.

SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE.....	10
2.	REALIZZAZIONE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI CON PLASTICHE DA RIFIUTO E RAP	15
2.1	Stato dell'arte	15
2.1.1	Realizzazione di miscele con plastiche da rifiuto	15
2.1.2	Utilizzo del RAP nelle miscele.....	21
2.1.3	Criteri Ambientali Minimi (CAM)	23
2.2	Progetto GREENROADS.....	24
2.3	Mix Design.....	30
2.3.1	Marshall Mix Design	34
2.3.2	SuperPAVE Mix Design	39
2.3.3	Volumetric Mix Design.....	43
2.3.4	Balanced Mix Design (BMD).....	44
3.	SPERIMENTAZIONE.....	48
3.1	Obiettivi e programma sperimentale	48
3.2	Materiali.....	51
3.2.1	Aggregati e RAP	51
3.2.2	Plastiche da rifiuto.....	58
3.2.3	Bitume 70/100 e rejuvenator	65
3.3	Confezionamento delle miscele e prove di laboratorio.....	67
3.3.1	Preparazione materiale e miscelazione in laboratorio.....	70
3.3.2	Determinazione della Massima Massa Volumica Teorica.....	71
3.3.3	Determinazione del Contenuto di Bitume tramite Ignizione	72
3.3.4	Curva granulometrica	74
3.3.5	Realizzazione e compattazione dei provini mediante pressa taglio-giratoria.....	75
3.3.6	Bulk Density.....	79
3.3.7	Determinazione delle caratteristiche volumetriche.....	81
3.3.8	Determinazione del Modulo di Rigidezza.....	82
3.3.9	Determinazione della Resistenza a Trazione Indiretta	84
4.	ANALISI DEI RISULTATI.....	87
4.1	Composizione	87
4.1.1	Granulometria	87
4.1.2	Percentuale di bitume	90

4.1.3	Massima Massa Volumica Teorica	91
4.2	Caratteristiche volumetriche.....	93
4.2.1	Percentuale dei vuoti.....	93
4.2.2	VMA e VFB	101
4.2.3	Curve di compattazione.....	105
4.3	Caratteristiche meccaniche.....	108
4.3.1	Modulo di Rigidezza	110
4.3.2	Resistenza a Trazione Indiretta.....	113
4.4	Definizione delle miscele ottimali.....	116
4.5	Suscettibilità all'acqua	120
5.	CONCLUSIONI	126
6.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	128
7.	ALLEGATI	132

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Composizione dei rifiuti nel Globo (a) con (b) Asia orientale e Pacifico; (c) UE e Asia centrale; (d) America Latina e Caraibi; (E) Medio Oriente e Nord Africa; (f) Nord America; (g) Asia meridionale; (h) Africa subsahariana (Shah et al., 2024 [12])	10
Figura 2. Rifiuti di plastica emessi nell'oceano pro capite (Meijer et. al., 2019 [3], processato da Our World in Data)	11
Figura 3. Processi wet e dry di incorporamento delle plastiche in stabilimento (Brasileiro et al., 2019 [9])	13
Figura 4. Risultati del test Marshall delle miscele modificate con HDPE (a) Stability Value, (b) Flow Number, (c) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])	17
Figura 5. Risultati del test Marshall delle miscele modificate con LDPE. (a) Stability Value, (b) Flow Number, (c) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])	18
Figura 6. Effetti di PVC, PET, CR, PTP e PP su (a) Marshall Stability e (b) Flow Number (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])	18
Figura 7. Effetti di PVC, PET, CR, PTP e PP su (a) Marshall Quotient e (b) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])	19
Figura 8. Curva granulometrica dello strato di Usura	28
Figura 9. Curva granulometrica dello strato di Collegamento	28
Figura 10. Curva granulometrica dello strato di Base	29
Figura 11. Dispositivo per test di Marshall stability e flow [27]	36
Figura 12. Marshall Stability Curve [27]	37
Figura 13. Grafici ottenuti da Marshall Mix Design [10]	39
Figura 14. Stima del contenuto di bitume a vuoti pari a 4%	42
Figura 15. Esempio di grafici di v, VMA, VFA e densità per una miscela a diversi contenuti di bitume [10]	43
Figura 16. Balanced Mix Design [29]	46
Figura 17. Curva granulometrica Usura con nuove proporzioni dei costituenti	49
Figura 18. Localizzazione dell'impianto Brillada presso Borgaro Torinese (TO)	51
Figura 19. Stoccaggio aggregati e RAP	52
Figura 20. Impianto Brillada	52
Figura 21. Classe 5/17 (a), 3/8 (b), 0/5 (c), filler (d), RAP 0/6 (e)	52
Figura 22. Deaerazione mediante disaeratore	54
Figura 23. Sedimentazione degli aggregati	54
Figura 24. Lavaggio degli aggregati	56
Figura 25. Pila di setacci su setacciatore meccanico	56
Figura 26. Trattenuto post-setacciatura ai setacci 12.5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm	56
Figura 27. Curve granulometriche aggregati e RAP	57
Figura 28. Plastiche M	59
Figura 29. Plastiche R	59
Figura 30. Curve granulometriche plastiche M e R	60
Figura 31. Trattamento termico M a 200°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	61

Figura 32. Trattamento termico M a 250°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	62
Figura 33. Trattamento termico M a 225°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	62
Figura 34. Trattamento termico R a 200°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	63
Figura 35. Trattamento termico R a 225°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	63
Figura 36. Trattamento termico R a 250°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)	64
Figura 37. Miscelazione R con aggregato	65
Figura 38. Miscelazione M con aggregato	65
Figura 39. Contenitore con bitume 70/100	66
Figura 40. Miscelatore in impianto	68
Figura 41. Schema della procedura adottata per la miscelazione manuale e meccanica	69
Figura 42. Miscelazione manuale di aggregati+RAP+plastica (sx) e del conglomerato finale (dx)	70
Figura 43. Miscelatore in impianto	70
Figura 44. Miscelatore meccanico	70
Figura 45. Quartatura del conglomerato bituminoso	72
Figura 46. Deaerazione del conglomerato bituminoso	72
Figura 47. Carbolite utilizzata per il processo di ignizione	73
Figura 48. Conglomerato nel cestello prima del processo di ignizione	74
Figura 49. Materiale post processo di ignizione	74
Figura 50. Pulizia degli aggregati post-ignizione	75
Figura 51. Movimento giratorio del campione (BS EN 12697-31)	76
Figura 52. Preparazione fustelle in forno a 155°C	77
Figura 53. Provini di conglomerato bituminoso post-compattazione	78
Figura 54. Pressa taglio-giratoria	78
Figura 55. Campioni in acqua per successiva pesatura	80
Figura 56. Configurazione di prova IT-CY e CIT-CY (BS EN 12697-26)	82
Figura 57. Equipaggiamento per prova IT-CY e CIT-CY (BS EN 12697-26)	82
Figura 58. Esempio di curva Haversine (BS EN 12697-26)	83
Figura 59. Disposizione del castelletto con provino durante la prova	84
Figura 60. Macchinario UTM-30	84
Figura 61. Configurazione di prova per RTI (BS EN 12697-23)	85
Figura 62. Configurazione campione prima della prova ITS (sx) e dopo la prova ITS (dx)	85
Figura 63. Curva granulometrica miscele senza WP	88
Figura 64. Curva granulometrica miscele con M pari a 0.4%	88
Figura 65. Curva granulometrica miscele con M pari a 0.8%	88
Figura 66. Curva granulometrica miscele con R pari a 0.4%	89
Figura 67. Curva granulometrica miscele con R pari a 0.8%	89
Figura 68. Percentuale di fase legante	91
Figura 69. MMVT	93
Figura 70. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele M	96

Figura 71. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele M	97
Figura 72. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele M	97
Figura 73. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele R	98
Figura 74. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele R	98
Figura 75. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele R	99
Figura 76. Confronto percentuale di vuoti a 120 rotazioni	99
Figura 77. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele R	100
Figura 78. Confronto percentuale di vuoti a 210 rotazioni	100
Figura 79. VMA e VFB delle miscele contenenti M	104
Figura 80. VMA e VFB delle miscele contenenti R	105
Figura 81. Effetto dell'introduzione delle plastiche M sulla miscela in termini di percentuali di vuoti e pendenza della curva di compattazione	106
Figura 82. Effetto dell'introduzione delle plastiche R sulla miscela in termini di percentuali di vuoti e pendenza della curva di compattazione	106
Figura 83. Curve di compattazione sovrapposte per diverse miscele con M	108
Figura 84. Curve di compattazione sovrapposte per diverse miscele con R	108
Figura 85. Modulo di Rigidezza delle miscele contenenti M	111
Figura 86. Modulo di Rigidezza delle miscele contenenti R	112
Figura 87. Confronto Modulo di Rigidezza	113
Figura 88. ITS delle miscele contenenti M	114
Figura 89. ITS delle miscele contenenti R	115
Figura 90. Confronto ITS	116
Figura 91. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele M con valori limite da Capitolato ANAS (>2%)	117
Figura 92. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele M con valori limite da Capitolato ANAS (3%-6%)	117
Figura 93. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele M con valori limite da Capitolato ANAS (11%-15%)	117
Figura 94. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (>2%)	118
Figura 95. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (3%-6%)	118
Figura 96. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (11%-15%)	119
Figura 97. Panoramica dei campioni realizzati per le 3 miscele ottimali	120
Figura 98. Sistema di deaerazione per campioni wet	123
Figura 99. Campione inserito nel contenitore con acqua prima della deaerazione	124
Figura 100. Condizionamento dei campioni in acqua alla temperatura di prova	124
Figura 101. Campioni su piano dopo il condizionamento di 72 ore	124

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi dei processi wet e dry (Xu et al., 2022 [4])	13
Tabella 2. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Base	25
Tabella 3. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Collegamento/Binder	26
Tabella 4. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Usura	26
Tabella 5. Valori di riferimento per N1, N2, N3 e percentuale dei vuoti	26
Tabella 6. Valori di riferimento di Rt e CTI per strato di Base	27
Tabella 7. Valori di riferimento di Rt e CTI per strato di Collegamento/Binder	27
Tabella 8. Valori di riferimento di Rt e CTI per strato di Usura	27
Tabella 9. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Usura	27
Tabella 10. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Collegamento	28
Tabella 11. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Base	29
Tabella 12. Valori di Massima Massa Volumica Teorica delle miscele prodotte in impianto	29
Tabella 13. Valori di Contenuto di Bitume delle miscele prodotte in impianto	29
Tabella 14. Aggregati per strato di Collegamento/Binder.....	31
Tabella 15. Specifiche di progetto per Marshall Mix Design - 1 [10]	37
Tabella 16. Specifiche di progetto per Marshall Mix Design - 2 [10]	38
Tabella 17. Requisiti di accettazione per gli aggregati con SuperPAVE - 1 [10]	40
Tabella 18. Requisiti di accettazione per gli aggregati con SuperPAVE - 2 [10]	40
Tabella 19. Requisiti di gradazione per gli aggregati con SuperPAVE.....	41
Tabella 20. Requisiti dei numeri di giri per la SuperPAVE gyratory compactor [10]	42
Tabella 21. Requisiti per Volumetric Mix Design.....	44
Tabella 22. Valori ottenuti dalle prove per le 4 miscele [26]	47
Tabella 23. Elenco delle miscele realizzate e analizzate.....	50
Tabella 24. Valori di Densità di aggregati e RAP.....	55
Tabella 25. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Usura	55
Tabella 26. Valori passante progressivo aggregati e RAP	57
Tabella 27. Valori di passante progressivo plastiche M e R.....	60
Tabella 28. Proprietà del bitume 70/100	65
Tabella 29. Proprietà del rejuvenator	66
Tabella 30. Temperature di riferimento per la compattazione in funzione del bitume (BS EN 12697-35)	75
Tabella 31. Deformazione massima orizzontale in funzione della temperatura di prova (BS EN 12697-26)	83
Tabella 32. Valori di passante progressivo delle miscele realizzate	87
Tabella 33. Valori percentuali di scostamento e valore medio delle curve granulometriche.....	90
Tabella 34. Percentuali di bitume su miscela e aggregati	91
Tabella 35. MMVT delle miscele realizzate	92
Tabella 36. Percentuali di vuoti a 10, 120 e 210 giri delle miscele contenenti M	95
Tabella 37. Percentuali di vuoti a 10, 120 e 210 giri delle miscele contenenti R	95
Tabella 38. Elenco dei campioni contenenti M selezionati per VMA e VFB	102
Tabella 39. Elenco dei campioni contenenti R selezionati per VMA e VFB.....	103
Tabella 40. Elenco dei campioni contenenti M selezionati per Proprietà Meccaniche	109

Tabella 41. Elenco dei campioni contenenti R selezionati per Proprietà Meccaniche	110
Tabella 42. Elenco dei campioni per determinazione ITSr e percentuale di vuoti.....	122
Tabella 43. VMA e VFB dei campioni realizzati.....	122
Tabella 44. Temperatura di prova per determinazione ITSr	122
Tabella 45. Proprietà meccaniche delle miscele ottimali	125

1. INTRODUZIONE

Da qualche decennio a questa parte il consumo di plastica nel mondo è aumentato notevolmente, frutto della crescita esponenziale della popolazione umana e, conseguentemente, dei suoi fabbisogni; in seguito all'aumento del consumo di plastica, è cresciuta in modo esponenziale anche la sua produzione come materiale da rifiuto. Secondo quanto riportato da Ritchie et al., 2025 [1], il quantitativo di plastica generato in tutto il mondo è raddoppiato negli ultimi due decenni, arrivando a una produzione di 460 milioni di tonnellate nel 2019. In quell'anno, meno del 10% di tutta la plastica generata è stata riciclata, mentre il 19% è stato incenerito, il 49% è stato smaltito in discarica e il resto è stato considerato "Waste Plastic" (WP) gestito in modo scorretto, compresi tutti i rifiuti bruciati in fosse aperte, scaricati nell'oceano o smaltiti in discariche [2]. Nelle due figure successive sono riportate le percentuali di rifiuto nel mondo e nei vari continenti, e i quantitativi di WP gestiti in modo scorretto nel mondo nel 2019.

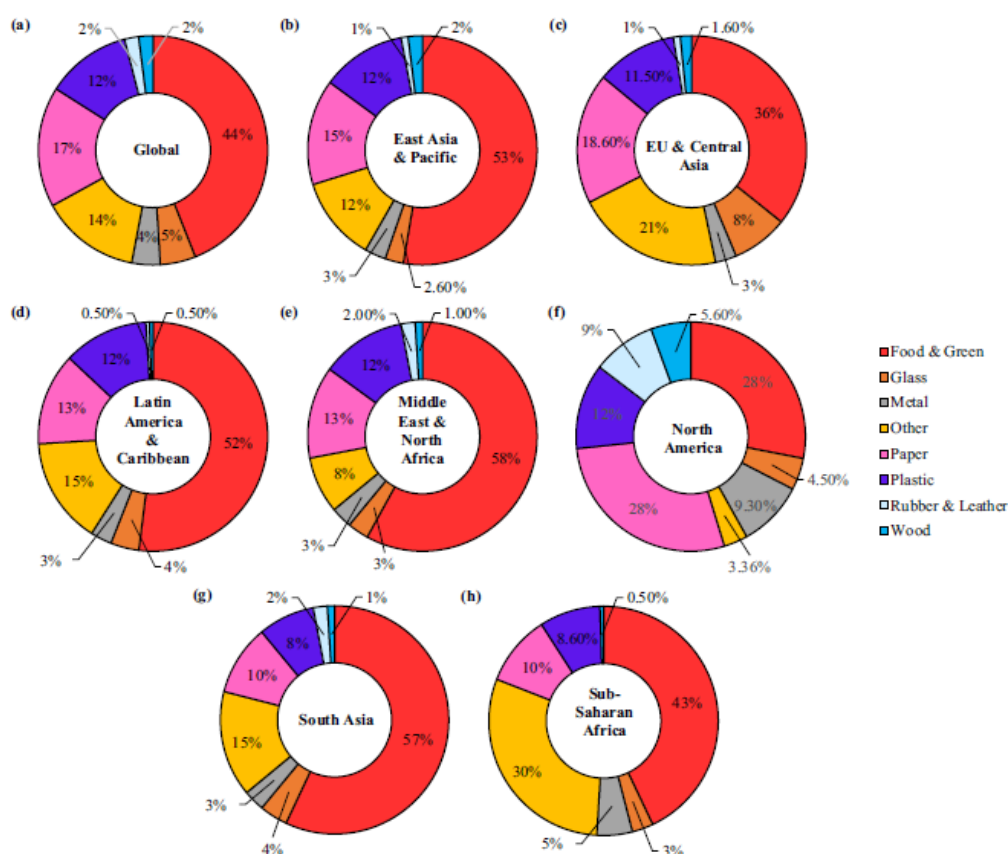


Figura 1. Composizione dei rifiuti nel Globo (a) con (b) Asia orientale e Pacifico; (c) UE e Asia centrale; (d) America Latina e Caraibi; (E) Medio Oriente e Nord Africa; (f) Nord America; (g) Asia meridionale; (h) Africa subsahariana (Shah et al., 2024 [12])

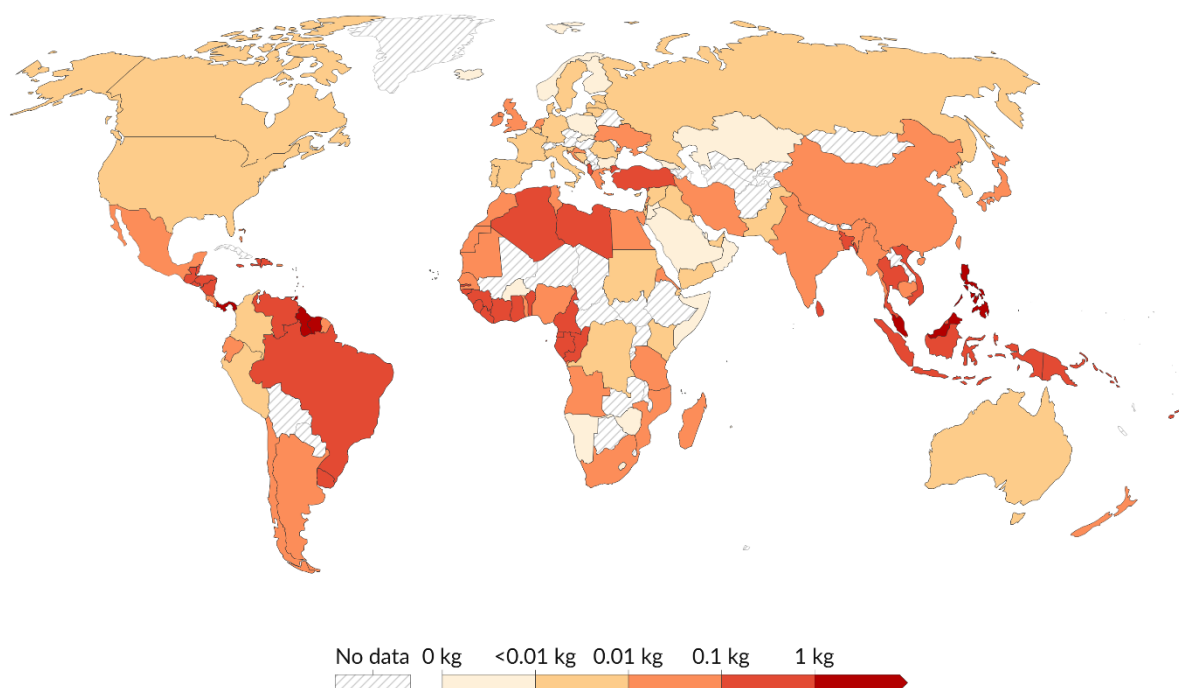


Figura 2. Rifiuti di plastica emessi nell'oceano pro capite (Meijer et. al., 2019 [3], processato da Our World in Data)

A causa del notevole volume di plastica prodotta, di rifiuti gestiti in modo inadeguato e del successo dell'industria della pavimentazione nel riutilizzo di questi materiali di scarto nella realizzazione di strade, l'utilizzo di WP nelle pavimentazioni stradali rappresenta una valida soluzione alternativa. Il conglomerato bituminoso è un materiale termoplastico che dimostra proprietà viscoelastiche nella maggior parte delle condizioni operative della pavimentazione, svolgendo così un ruolo importante nelle prestazioni. [8]. Per migliorare la durabilità e l'affidabilità delle pavimentazioni per soddisfare i requisiti climatici, di traffico e di altro tipo, l'uso di miscele modificate al posto di quelle grezze è stato a lungo raccomandato come un approccio efficace. I polimeri vergini possono migliorare le prestazioni del conglomerato bituminoso, soprattutto per quanto riguarda la stabilità alle alte temperature; tuttavia, i materiali polimerici vergini sono difficili da reperire e sono antieconomici se utilizzati come modificatori. Gli alti costi di costruzione, combinati con la consapevolezza di riguardo alla gestione ambientale, hanno incoraggiato l'uso di rifiuti plastici nella modifica dell'asfalto.

Secondo quanto riportato in numerosi articoli di letteratura, l'utilizzo di rifiuti plastici nella produzione di conglomerato bituminoso porta alla produzione di un materiale con proprietà simili a quelle dei polimeri vergini, riducendo sostanzialmente i costi di costruzione e proteggendo l'ambiente da ulteriori contaminazioni [9].

Come citato da Bueno et al., 2024 [2], le plastiche più raccomandate per l'utilizzo in ambito stradale sono per lo più quelle di tipo termoplastico, caratterizzate da una struttura chimica che permette loro di fondere quando vengono riscaldate e di solidificare quando vengono raffreddate. Tra esse rientrano il *polietilene tereftalato* (PET), il *polivinilcloruro* (PVC), il *polipropilene* (PP), il *polistirene* (PS), l'*acrilonitrile butadiene stirene* (ABS) e il *polietilene* (PE); quest'ultimo, a sua volta, è suddiviso in *polietilene ad alta densità* (HDPE) e *polietilene a bassa*

densità (LDPE), caratterizzati da diversa cristallinità e ramificazione nella loro catena polimerica, che portano a differenze nella densità del materiale.

Ci sono due approcci per incorporare le plastiche nei conglomerati bituminosi: “*wet process*” e “*dry process*”; la Figura 3 mostra i processi wet e dry di incorporamento delle plastiche negli stabilimenti di produzione.

Nel processo wet i polimeri vengono miscelati con il bitume ad alte temperature per produrre leganti bituminosi prima di procedere alla miscelazione con gli aggregati (Ghuzlan et al., 2013b [5], Kalantar et al., 2012 [6]). Nel processo dry le plastiche riciclate vengono aggiunte direttamente alla miscela come sostituti degli aggregati o modificatori della miscela (Movilla-Quesada et al., 2019 [7]).

Quando l'aggiunta di rifiuti plastici viene effettuata con processo wet, essi vengono aggiunti al bitume per modificarne le proprietà prima di entrare in contatto con gli aggregati; viceversa, incorporando i polimeri con processo dry, essi vengono mescolati agli aggregati in modo che agiscano effettivamente come materiali di rinforzo [9].

Ambedue i processi presentano vantaggi e svantaggi: nel processo wet le plastiche vengono mescolate al legante in un mulino ad alta velocità, per cui questo approccio richiede strutture specializzate per la miscelazione e lo stoccaggio, ma risulta essere migliore per il controllo delle proprietà del bitume modificato; questo è probabilmente il motivo per cui il metodo wet è attualmente il più utilizzato nella modifica del bitume. Il processo dry, invece, non richiede attrezzature professionali e può essere applicato in qualsiasi impianto senza grandi modifiche [9].

Dai risultati ottenuti in vari articoli di letteratura si è potuto dimostrare che il bitume modificato con il processo wet ha una viscosità più elevata, che consente di rivestire meglio le particelle di aggregato, senza problemi di essudazione o drenaggio, mentre il processo dry porta alla realizzazione di miscele con una water stability relativamente scarsa. In termini di costi, i conglomerati che vengono prodotti con aggiunta di plastica secondo metodo dry risultano essere più economici rispetto a quelli con incorporamento delle plastiche con metodo wet [9].

Nella Tabella 1 sono riportati i vantaggi e svantaggi dei processi wet e dry elencati precedentemente.

Oltre a questi due approcci, esiste un altro metodo di incorporamento delle plastiche detto “semi-wet”, in cui il bitume viene riscaldato a una temperatura di 150°C-160°C e poi si procede all'aggiunta del polimero. Il tempo di indurimento del materiale plastico all'interno del bitume è di 3-5 minuti. Durante questo periodo, i granuli di polimero subiscono processi di modifica della loro struttura e consentono una migliore adesione alla superficie dell'aggregato, migliorando l'adesione e la sovrapposizione tra i granuli dell'aggregato. A differenza del processo wet, per evitare che in condizioni di stoccaggio a freddo il materiale plastico si stacchi dal bitume, il bitume modificato deve essere miscelato immediatamente con l'aggregato e il filler per impedire la formazione di dispersioni grossolane osservate in condizioni di raffreddamento, che influenzano negativamente le proprietà della miscela bituminosa [13].

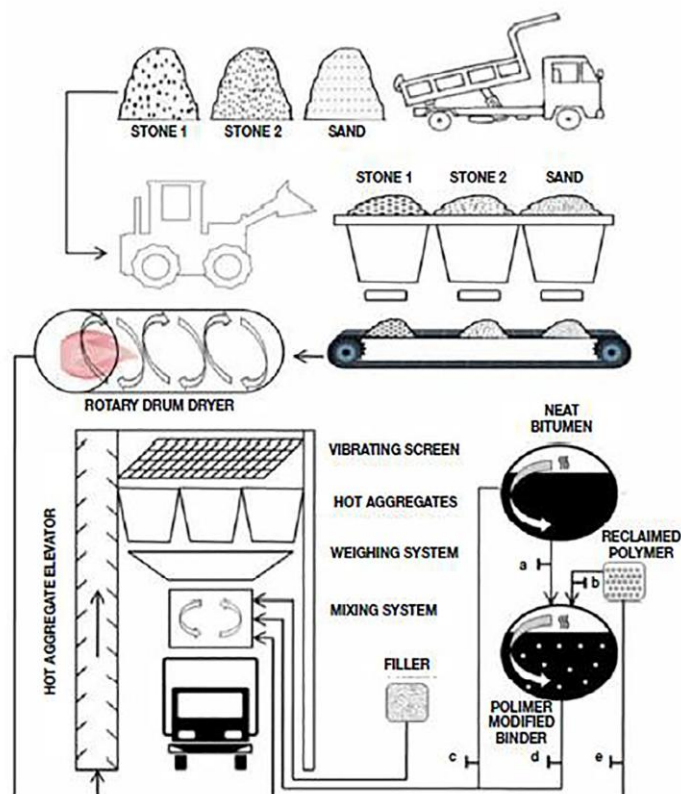


Figura 3. Processi wet e dry di incorporamento delle plastiche in stabilimento (Brasileiro et al., 2019 [9])

Method	Production Cost	Technological Problem		Performance of Mixture	
		Advantage	Drawback	Advantage	Drawback
Wet process	Expensive (AC-16)	Normative guidance and engineering experience	Complex production process (specialized mixing and storage facilities)	Higher viscosity	Poor storage stability
Dry process	Cheap (AC-16)	Lack of normative guidance	Simple production process (no need of professional facility)	-	Poor water stability

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi dei processi wet e dry (Xu et al., 2022 [4])

Nella scelta della tipologia di plastica da adottare nelle pavimentazioni stradali vi sono una serie di fattori che possono andare a incidere sul risultato finale e sulla procedura da adottare per l'incorporamento delle plastiche: tra essi rientrano la temperatura di fusione, la quale cambia per le varie tipologie di polimero, e la forma delle plastiche.

Partendo dalla temperatura di fusione, le plastiche con punti di fusione più elevati (ovvero superiori a 160°C), come il PET e il PP, sono generalmente utilizzate nel processo dry; questo perché il punto di fusione è solitamente più alto della temperatura di miscelazione del bitume, il che renderebbe difficile la miscelazione delle WP con il legante se incorporare con processo wet [2]. I rifiuti plastici come LDPE, HDPE, PP ed EVA, che hanno temperature di fusione inferiori alle temperature di miscelazione del bitume, sono preferibili per l'uso nei processi wet come modificatori (o potenziali modificatori) delle proprietà del bitume.

Analizzando l'influenza della forma delle plastiche, esse possono essere aggiunte alla miscela in molte forme e con dimensioni diverse, come polvere (0,035-0,25 mm), pellets (5-10 mm), fibre (6,5-30 mm), fiocchi (0,63-10 mm), o granuli (0,3-0,6 mm). Le WP possono anche essere sottoposte a processi di riduzione dimensionale, come la triturazione, la macinazione, la frantumazione e il taglio. In particolare, più le dimensioni delle particelle sono ridotte, più le

miscele risulteranno essere omogenee sia utilizzando metodi wet che dry; per il metodo wet, la migliore soluzione consiste nell'utilizzare il polimero sottoforma di polvere, perché offre una maggiore superficie per unità di massa di plastica, facilitando la fusione della WP. Con il processo dry si possono utilizzare WP di dimensioni maggiori e anche con forme diverse, ma minore è la dimensione delle particelle, migliore è la distribuzione degli aggregati e del legante durante il processo di miscelazione [2]. Dallo studio condotto da Movilla-Quesada et al., 2019 [7], per ottenere un migliore rivestimento degli aggregati con WP e migliori prestazioni in presenza di acqua, la dimensione ideale delle particelle nel metodo a secco dovrebbe essere inferiore a 2 mm.

Come già accennato all'inizio del capitolo, l'utilizzo di plastiche da rifiuto all'interno dei conglomerati bituminosi rappresenta una valida soluzione sia dal punto di vista ambientale, perché permette di riutilizzare materiale di scarto che sarebbe destinato agli inceneritori, sia da un punto di vista della produzione del materiale, perché permette di utilizzare meno materiale vergine (sia aggregati che bitume) andando a influenzare notevolmente anche il costo di produzione.

Diventa interessante capire qual è il ruolo delle plastiche all'interno della miscela: una volta che vengono inserite all'interno del conglomerato, esse possono agire come sostituto del bitume (ovvero si sciolgono completamente andando a fungere da legante tra gli aggregati) o in sostituzione degli aggregati (le plastiche non si sciolgono completamente e vanno a modificare la struttura litica della miscela, in funzione anche delle dimensioni); infatti, come riportato da Ma et al., 2021 [11], i materiali polimerici svolgono diverse funzioni, quali modificatori del bitume, rivestimento degli aggregati o sostituti degli aggregati, a seconda delle dimensioni e delle proprietà delle materie plastiche. Le materie plastiche con alte temperature di fusione vengono solitamente utilizzate come sostituti degli aggregati, mentre quelle con basso punto di fusione possono formare una pellicola sottile che avvolge gli aggregati.

A seguito di queste due ipotesi, in funzione anche della temperatura di fusione e delle dimensioni, la fusione delle plastiche potrebbe essere totale (agire come legante) oppure parziale (agire come aggregato), influenzando anche sulle proprietà della miscela.

In seguito al diverso comportamento delle plastiche all'interno della miscela, anche le caratteristiche volumetriche e meccaniche possono essere influenzate.

In questo contesto si colloca il lavoro di Tesi avente l'obiettivo di indagare il possibile riutilizzo delle plastiche da rifiuto all'interno dei conglomerati bituminosi, cercando di analizzare il comportamento dei materiali plastici all'interno di queste miscele e la variazione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche.

2. REALIZZAZIONE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI CON PLASTICHE DA RIFIUTO E RAP

2.1 Stato dell'arte

2.1.1 Realizzazione di miscele con plastiche da rifiuto

Come già accennato nel capitolo introduttivo, uno dei possibili utilizzi del materiale plastico da rifiuto è quello di essere incorporato all'interno delle pavimentazioni stradali; in letteratura sono presenti numerosi documenti e paper in cui si sono analizzati gli effetti dell'aggiunta di materiale plastico e le proprietà della miscela ottenuta.

Come riportato da Heydari et al., 2021 [16], i rifiuti plastici possono essere utilizzati in sostituzione dei polimeri vergini per ridurre il costo finale della modifica del bitume e del conglomerato bituminoso, con vantaggi dell'utilizzo dei rifiuti plastici che non si limitano soltanto agli aspetti economici. In questo documento, conducendo test Marshall, si analizza l'influenza dell'aggiunta di diverse tipologie di plastiche nella miscela sulle sue proprietà, misurate tramite Marshall Stability, Marshall Flow Number, Vuoti d'Aria, Vuoti negli Aggregati (VMA), Vuoti Riempiti da Bitume (VFB), e Marshall Quotient; i risultati ottenuti sono i seguenti.

- Il polietilene a bassa densità LDPE aumenta il valore di Marshall Quotient e di Stability e diminuisce il numero di Flow Number e il contenuto di Vuoti d'Aria.
- Con il suo basso punto di fusione, questo polimero è molto suscettibile di fondersi durante il processo di miscelazione.
- Il polietilene ad alta densità HDPE aumenta il valore di Marshall Stability fino a un certo contenuto di polimero e riduce il contenuto di Vuoti d'Aria.
- Il polivinilcloruro PVC e il polietilene tereftalato PET tendono ad aumentare la Marshall Stability e il Marshall Quotient e a diminuire leggermente il Flow Number fino a un certo contenuto.
- Quando la plastica si scioglie e ricopre la superficie dell'aggregato, potrebbe ridurre il contenuto ottimale di bitume della miscela perché la plastica tende a riempire alcuni vuoti nella miscela.

Anche Pasetto et al., 2022 [17], nel documento *"Dry Addition of Recycled Waste Polyethylene in Asphalt Mixtures: A Laboratory Study"*, propone uno studio comparativo in laboratorio su miscele di conglomerato bituminoso contenenti diverse quantità di plastica di scarto (ovvero 0%, 0,25% e 1,5% in peso della miscela), andando a studiare le diverse miscele in termini di lavorabilità, caratteristiche viscoelastiche lineari, rigidità, resistenza, resistenza alle deformazioni permanenti e sensibilità all'umidità. Dalle prove di laboratorio sono state ottenute le seguenti conclusioni.

- L'aggiunta di PE di scarto fino all'1,5% in peso della miscela non ha influito sulla lavorabilità della miscela nelle condizioni di produzione esaminate.
- I rifiuti di PE con il tasso di riciclaggio più alto utilizzati in questa indagine hanno influenzato in modo significativo le proprietà reologiche della miscela di conglomerato bituminoso, con un chiaro spostamento verso una risposta più elastica nell'intero intervallo di tempo-

temperatura studiato, insieme a un considerevole effetto di irrigidimento nell'intervallo di alta temperatura/bassa frequenza.

- Sono state ottenute, nel caso delle miscele contenenti plastica riciclata, una rigidità e una resistenza alla deformazione permanente significativamente maggiori; anche in questo caso, maggiore è il dosaggio di PE, migliore è la risposta del materiale.
- È stato osservato nelle prove di trazione indiretta un aumento proporzionale della resistenza e della resistenza alle fratture in seguito all'aggiunta di rifiuti plastici, molto probabilmente dovuto al rafforzamento del mastice in seguito all'interazione chimico-fisica tra il legante bituminoso e le particelle di plastica.
- La resistenza all'umidità della miscela bituminosa studiata non è stata influenzata negativamente dalla presenza di rifiuti di PE.

Tutte queste considerazioni suggeriscono che l'aggiunta di rifiuti plastici nelle miscele di conglomerato bituminoso forniscono risultati promettenti per un loro possibile utilizzo nelle pavimentazioni stradali.

La variazione di proprietà e di performance delle miscele in seguito all'aggiunta di materiale plastico è confermata anche da Cardoso et al., 2023 [30], il quale mostra che, inserendo diverse tipologie di plastiche come HDPE, LDPE, PET, PE, PP, PVC e ABS con forme diverse (polvere, pellets, fibre, fiocchi o granuli) e valutando la resistenza a fatica e ormaiamento delle miscele ottenute, si ha una variazione delle prestazioni e proprietà dei materiali finali. In particolare, si hanno i seguenti risultati.

- L'incorporazione di rifiuti plastici migliora le prestazioni in termini di resistenza a ormaiamento e fatica.
- L'aggiunta di PET tende a migliorare le prestazioni di fatica e ormaiamento.
- L'aggiunta di HDPE tende a migliorare le prestazioni in termini di deformazione permanenti.
- L'aggiunta di LDPE tende a migliorare la resistenza all'ormaiamento e a peggiorare la resistenza a fatica.
- L'aggiunta di PP e PVC è associata a miglioramenti sia nelle prestazioni in termini di deformazione permanente che in quelle in termini di fatica.
- In generale, la quantità ottimale di plastica aggiunta è piccola, circa l'1% del peso della miscela.

L'aggiunta di materiale polimerico da rifiuto permette di ottenere prestazioni migliori andando a considerare anche la regione in cui ci si trova; come riportato nel documento *"Production of Polypropylene-reinforced Asphalt Concrete Mixtures Based on Dry Procedure and Superpave Gyrotory Compactor"* [18], l'aggiunta di materiale come fibre di polipropilene PP in diverse percentuali rispetto al peso della miscela permette un aumento della Marshall Stability e della percentuale di vuoti d'aria, diminuendo però il Flow Number. Sempre come riportato nel documento sopra citato, i campioni di conglomerato bituminoso modificato con PP possono essere considerati miscele di ad alte prestazioni. Aumentando la percentuale di vuoti d'aria, questi conglomerati risultano essere utili per le regioni ad alte temperature dove il bleeding e il flushing sono problemi critici.

Come già riportato nel capitolo introduttivo, esistono diversi metodi di implementazione delle plastiche nelle miscele di conglomerato bituminoso (dry e wet), e questi due approcci portano a risultati che possono essere diversi tra loro.

Heydari et al., 2021 [16] mostra che, in vari esperimenti condotti in molteplici ricerche, si può osservare che l'aggiunta delle plastiche con modo wet o dry influisce in maniera differente sulle prestazioni della miscela, a seconda anche della temperatura di fusione e delle proprietà intrinseche del polimero. In particolare:

- Il polietilene a bassa densità LDPE aumenta il valore di Marshall Quotient e di Stability e diminuisce il numero di Flow Number e il contenuto di Vuoti d'Aria, sia con processo wet che dry, e tende a fondere. L'approccio wet, rispetto a quello dry, porta ad avere miscele con LDPE più resistenti.
- Anche il polietilene ad alta densità HDPE aumenta i valori delle prove Marshall e porta a una diminuzione del contenuto di Vuoti d'Aria, sia con processo wet che dry.

Nei grafici riportati di seguito si mostrano gli effetti delle varie plastiche aggiunte con processi dry e wet sulle prestazioni delle miscele.

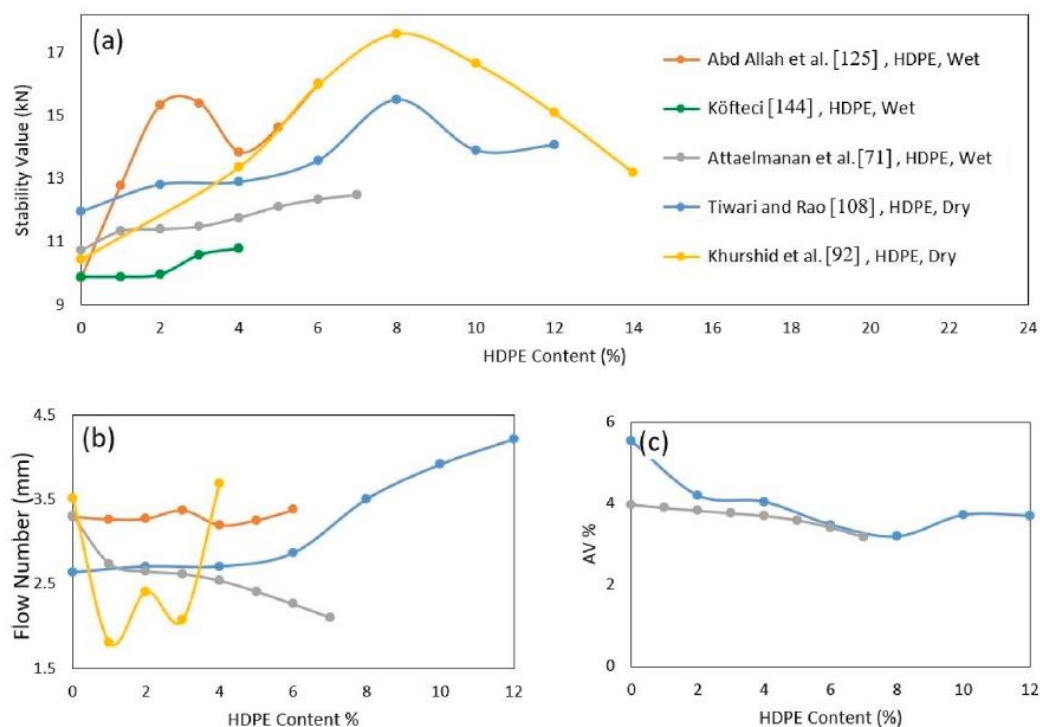


Figura 4. Risultati del test Marshall delle miscele modificate con HDPE (a) Stability Value, (b) Flow Number, (c) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])

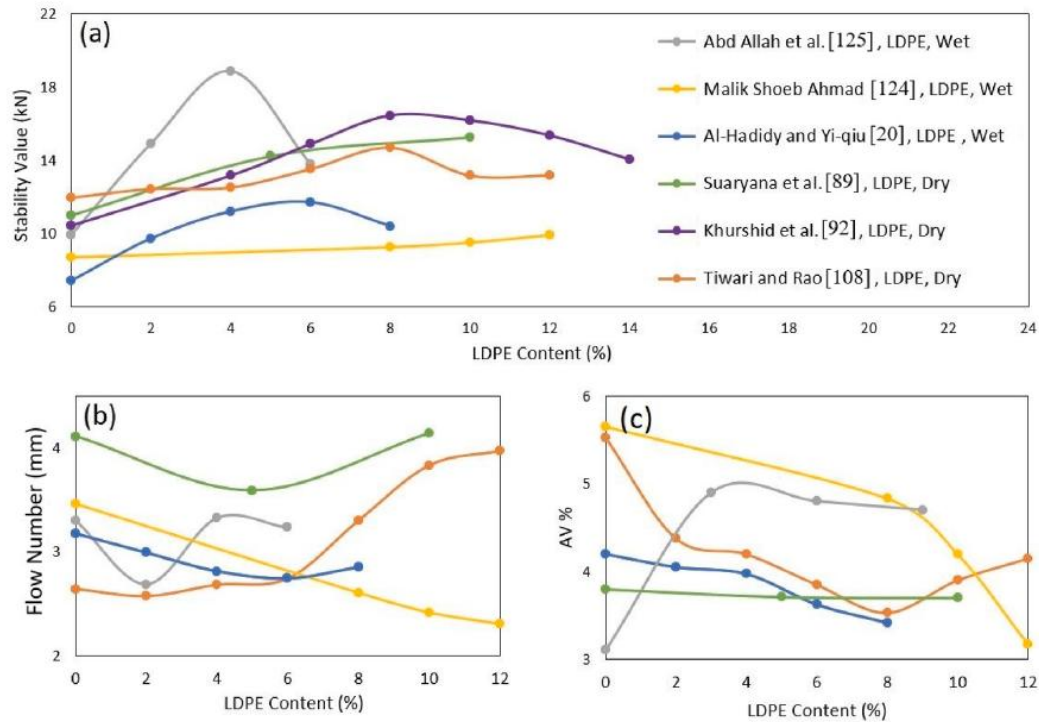


Figura 5. Risultati del test Marshall delle miscele modificate con LDPE. (a) Stability Value, (b) Flow Number, (c) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])

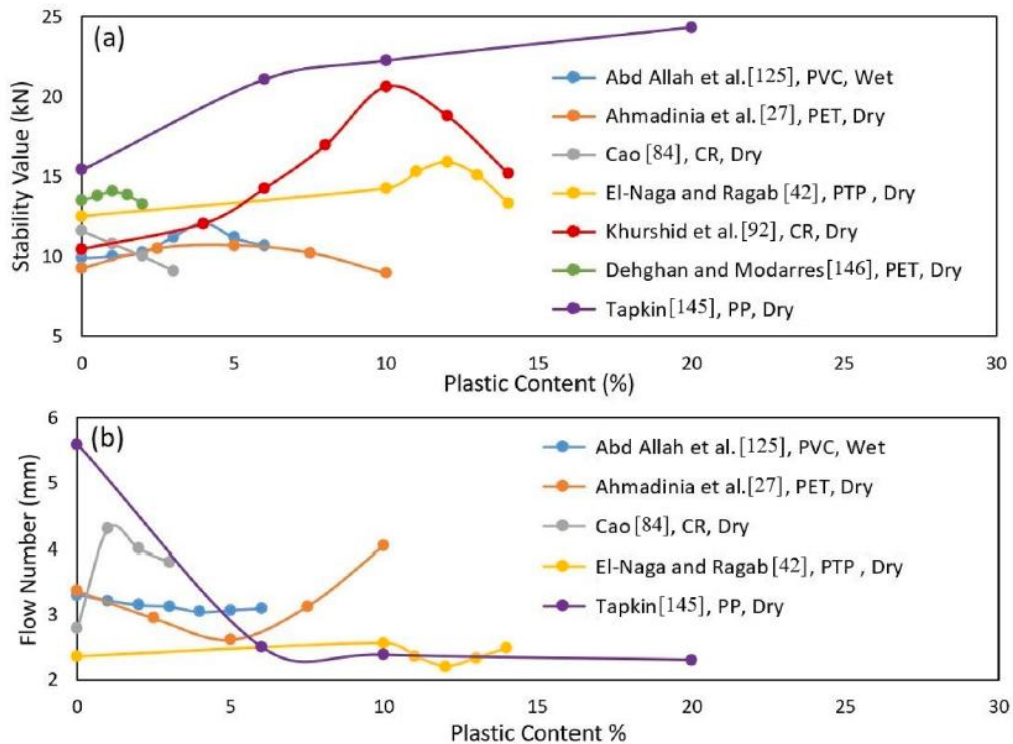


Figura 6. Effetti di PVC, PET, CR, PTP e PP su (a) Marshall Stability e (b) Flow Number (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])

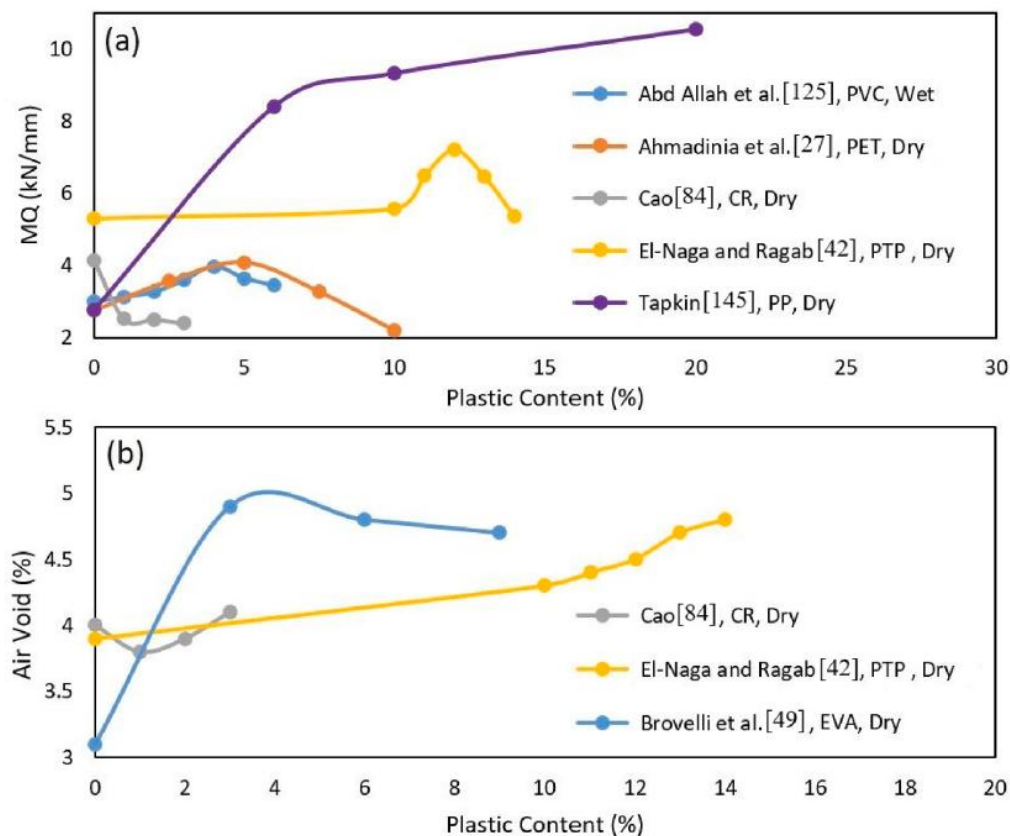


Figura 7. Effetti di PVC, PET, CR, PTP e PP su (a) Marshall Quotient e (b) Contenuto di Vuoti d'Aria (Dry = processo dry, Wet = processo wet) (Heydari et al., 2021 [16])

Tra i vari metodi di incorporazione delle plastiche, esiste anche quello "semi-wet" che, come mostrato da Basheet et al., 2025 [13], porta anch'esso a un incremento delle proprietà e delle prestazioni della miscela con aggiunta di polietilene PE (sia come LDPE che HDPE); in particolare, realizzando miscele con processo semi-wet e dry, e comparandole a quelle convenzionali senza l'utilizzo di polimeri, si osserva che:

- Si ha un aumento del valore di Marshall Stability nelle miscele semi-wet e dry rispetto a quella convenzionale, con un incremento di tale valore del 90.86% con semi-wet rispetto al 68.15% del dry.
- Si ha una diminuzione del Flow Number nelle miscele modificate rispetto a quella base.
- Si ha un aumento del Marshall Quotient nelle miscele con PE, e l'incremento è maggiore con metodo semi-wet rispetto a dry.
- Per quanto concerne il valore di Resistenza a Trazione Indiretta RTI (o ITS), con l'utilizzo di plastiche all'interno della miscela si denota un aumento del suo valore evidenziando, a parità di contenuto e di tipologia di plastica, un incremento più spiccato utilizzando l'approccio semi-wet.

Questi risultati portano alla conclusione che l'aggiunta di materiale plastico permette di avere benefici in termini di prestazioni e proprietà, oltre che ambientali; come sempre riportato nel documento, però, l'aggiunta di polimero è accettabile fino a un certo valore percentuale sul peso della miscela, altrimenti si avrebbe un'influenza negativa sulla lavorabilità del conglomerato.

Come già riportato nel capitolo introduttivo, le materie plastiche possono essere introdotte nelle miscele con forme e dimensioni diverse (sottoforma di granuli, polvere, ...), e tutto ciò va a influire

sulle caratteristiche e prestazioni del materiale finale, con la possibilità anche di andare a sostituire una frazione degli aggregati vergini.

Come riportato nello studio condotto da Lastra-González et al., 2016 [19], sono state realizzate 4 diverse tipologie di miscele inserendo 4 diverse tipologie di plastiche (PE, PP, PS, ELT) con metodo dry; nonostante le plastiche avessero forme e dimensioni differenti (PE dimensione massima di 2 mm, PP e PS dimensione massima rispettivamente 6,3 mm e 5,6 mm, ELT dimensione massima 1 mm), esse sono state utilizzate andando a sostituire la frazione di filler usata nella preparazione della miscela pari a 1%. I risultati ottenuti dalle varie prove condotte in laboratorio mostrano che:

- Le miscele con PE, PP ed ELT aumentano la resistenza alla deformazione plastica rispetto alla miscela di riferimento, con possibilità di utilizzo su qualsiasi strada senza limitazioni relative al livello di traffico o alle condizioni climatiche.
- Con l'aggiunta di PE e PP si denota un miglioramento della coesione della miscela, probabilmente dovuto ai legami che queste due plastiche creano con gli aggregati, mentre l'aggiunta di ELT aumenta le prestazioni elastiche e, di conseguenza, la resistenza della miscela alla deformazione plastica.
- L'aggiunta di plastiche porta a un incremento della rigidezza della miscela, con un aumento più marcato utilizzando PE, PP ed ELT rispetto a PS.
- L'aumento del dynamic modulus implica che queste miscele modificate avranno effettivamente una maggiore capacità portante e trasmetteranno meno carichi agli strati sottostanti.

In sintesi si può concludere che:

- Le miscele contenenti ELT aumentano del 30% la resistenza alla deformazione plastica e del 50% la rigidezza rispetto alle miscele di riferimento; si hanno inoltre prestazioni più elastiche con un angolo di fase inferiore.
- Il PP ha prestazioni molto simili alla gomma, essendo il rifiuto polimerico quello che aumenta maggiormente la rigidezza della miscela di riferimento (60%) e mostrando anche il comportamento più elastico; tuttavia, l'aumento della sua resistenza alla deformazione plastica non è statisticamente significativo.
- Il PE è il polimero che aumenta maggiormente la resistenza alla deformazione plastica del prodotto ottenuto, oltre che incrementare la rigidezza della miscela bituminosa e le sue prestazioni elastiche rispetto a quella di riferimento.
- Per quanto riguarda il PS, il caso è diverso perché sono state ottenute differenze significative nei risultati, con notevole variabilità, causata probabilmente da una mancanza di omogeneità nella sua composizione dovuta a una contaminazione nel processo di riciclaggio.

Anche nello studio condotto da Movilla-Quesada et al., 2019 [7] si ha l'introduzione di materiale plastico composto da PET, HDPE e PVC sottoforma di scaglie di forma irregolare con divisione del materiale in due frazioni. Nel caso della frazione grossolana, si hanno scaglie di 10-5 mm, mentre per la frazione fine si hanno scaglie tra 2 e 0,25 mm. La realizzazione di 6 diverse tipologie di miscele (2 di riferimento, 2 che prevedono 10% di bitume sostituito da 10% di plastica, 2 che prevedono 10% di bitume sostituito da 20% di plastica) e le conseguenti prove fatte su provini hanno portato ai seguenti risultati:

- Per una migliore interazione tra plastica e aggregato, le particelle dei polimeri devono avere una dimensione inferiore a 2 mm in modo da avvolgere più facilmente gli aggregati e funzionare bene in presenza di acqua. L'indice dei vuoti d'aria nelle miscele aumenta

quando i rifiuti plastici vengono utilizzati come sostituti del legante, poiché il materiale non riempie i vuoti rilasciati dalla riduzione del legante, né nell'aggregato né nella miscela, ma aderisce solo all'aggregato.

- Le miscele con scarti di plastica resistono meglio alla compressione, mostrando una maggiore dissipazione di energia e una riduzione delle deformazioni permanenti. Questo perché questo materiale ha una rigidità maggiore rispetto al legante che sostituisce, aumentando la rigidità complessiva della miscela.
- Il rapporto tra scarti plastici e legante sostituito non deve superare 1:1, poiché questa proporzione produce il miglior comportamento complessivo nelle miscele, migliorandone le proprietà plastiche senza comprometterne la resistenza o la rigidità.

Si può concludere che l'uso di scarti di plastica come sostituto dei leganti può essere considerato fattibile, modificando anche le proprietà della miscela.

Un ruolo importante nella realizzazione dei conglomerati bituminosi con plastiche è giocato anche dalla temperatura e dai tempi di miscelazione.

Come riportato nello studio condotto da Hınıslioğlu et al., 2004 [20], il bitume è stato modificato con HDPE in percentuali diverse (4%, 6%, 8%) e, per ciascuna delle 3 tipologie di legante modificato, è stato miscelato a temperature diverse (rispettivamente 145°C, 155°C e 165°C) e mescolato per periodi di tempo differenti tra loro (5, 15 e 30 minuti). Dopo l'applicazione di test Marshall, si è concluso che le miscele preparate con una temperatura di miscelazione di 165 °C e un tempo di miscelazione di 30 minuti con HDPE al 4% presentano la massima Stability e il minimo Flow Number, ergo Marshall Quotient più elevato. Le miscele modificate con HDPE sono molto più resistenti rispetto alla miscela di controllo, in particolare rispetto alle deformazioni permanenti come ormaio. I conglomerati bituminosi con valori di Marshall Quotient più elevati indicano miscele ad alta rigidità e maggiore capacità di distribuire il carico applicato, ottenendo pavimentazioni più resistenti alle deformazioni permanenti e risolvendo in parte il problema dello smaltimento dei rifiuti solidi.

2.1.2 Utilizzo del RAP nelle miscele

Ancor prima dell'utilizzo delle plastiche, all'interno dei conglomerati bituminosi è stato promosso l'utilizzo del *fresato* o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), il quale rappresenta quel materiale di pavimentazione rimosso e/o ritrattato contenente bitume e aggregati. Questo materiale viene generato quando le pavimentazioni in conglomerato bituminoso vengono rimosse mediante fresatura o rimozione completa per il rifacimento o ricostruzione; se adeguatamente frantumato e vagliato, il RAP è costituito da aggregati di alta qualità, ben classificati e rivestiti da bitume.

Il fresato viene riciclato nella struttura stradale come:

- materiale di riempimento per terrapieni;
- materiale granulare per strati di sottofondo o base (solitamente stabilizzati con cemento, anche se però è non raccomandato);
- aggregati per il riciclaggio a caldo o a freddo di miscele bituminose.

A causa della mancanza di frazioni fini e scarsa capacità di sviluppare attrito tra i granuli (parzialmente ricoperti di bitume), quando viene utilizzato negli strati di sottofondo e di base, è buona norma miscelare il RAP con altri materiali o di stabilizzarlo con cemento.

L'aggiunta di RAP nel conglomerato di solito porta a miscele più rigide e probabilmente più resistenti alla deformazione permanente (dovuto al bitume invecchiato presente nel RAP), oltre che a un abbassamento dei costi, risparmiando sull'utilizzo di aggregati vergini.

Anche in questo caso, in letteratura, sono presenti numerosi documenti in cui si sono analizzati gli effetti dell'aggiunta di fresato RAP e le proprietà della miscela ottenuta, con o senza aggiunta di materiale plastico.

Nello studio condotto da Beghetto et al., 2021 [21], si ha la realizzazione di diverse tipologie di miscele con aggregati, bitume, RAP e poliolefine (aggiunte come polvere o scaglie), ottenendo i seguenti risultati volumetrici e meccanici.

- La densità diminuisce all'aumentare del contenuto di poliolefine fino a un contenuto pari a 2% e poi tende ad aumentare, con valori di densità per contenuto di poliolefine pari a 4% paragonabile a quelli delle miscele senza polimero.
- I vuoti risultano essere ottimali per le miscele con 4% di poliolefine in polvere, mentre i valori peggiori si hanno per le miscele con plastiche sottoforma di scaglie.
- Le miscele con poliolefine in scaglie mostrano valori di ITS, ITC e Marshall Quotient maggiori rispetto alle miscele tradizionali (attribuibile molto probabilmente sia alla natura grossolana dell'additivo polimerico sia a un carico eccessivo di additivo plastico).
- Le miscele con poliolefine in polvere denotano valori di ITS, ITC e Marshall Quotient maggiori rispetto alle miscele tradizionali, ma questa volta conformi agli standard dei capitolati.

Questo documento mostra come la dimensione dell'additivo plastico (<4 mm) sia fondamentale per garantire elevate prestazioni della miscela bituminosa finale e dimostra anche che l'aggiunta di RAP nelle miscele permette di incrementare le prestazioni meccaniche.

Nella realizzazione di miscele che prevedono l'utilizzo RAP è possibile anche fare uso di *agenti riciclatori* (AR) che, introdotti nel conglomerato, permettono di ammorbidire il bitume presente nel RAP e migliorare di conseguenza le proprietà meccaniche delle miscele. Questo è quello che succede nello studio condotto da Ziari et al., 2023 [22], in cui si utilizzano, oltre a bitume, aggregati e RAP, anche tre diversi AR, di cui un olio aromatico, un olio paraffinico e un olio vegetale, per ripristinare le proprietà del legante del RAP. In seguito all'utilizzo di due tipologie di Mix Design per stabilire il contenuto ottimale di bitume e al compimento di alcune prove sui campioni delle varie miscele realizzate, si sono ottenuti i seguenti risultati.

- Tutte le miscele preparate utilizzando il contenuto ottimale di bitume hanno superato la prova relativa a ormaiamento e alla suscettibilità all'umidità, mentre non hanno soddisfatto il requisito di resistenza alla fessurazione.
- Con l'aumento del RAP dal 25% al 50% si ha una riduzione importante delle prestazioni delle miscele nei confronti della resistenza alle fessurazioni. Sebbene l'introduzione degli AR nelle miscele con RAP abbia migliorato la loro resistenza alla fessurazione, è comunque necessario aumentare il contenuto di bitume nelle miscele con RAP per soddisfare i requisiti di resistenza alla fessurazione.
- L'olio aromatico ha avuto la maggiore influenza sulla resistenza all'ormaiamento e sulla resistenza alla fessurazione, seguito dagli oli vegetali e paraffinici.

Questo studio conferma che l'utilizzo di agenti sul RAP permette di restaurare le proprietà del RAP e di influire anche sulle prestazioni del conglomerato prodotto.

Tra le varie tipologie di agenti riciclatori esiste anche un elemento chiamato *agente ringiovanente* o *rejuvenator*, anch'esso in grado di restaurare le proprietà originali dei bitumi invecchiati del RAP; in particolare, è stato dimostrato che i meccanismi di interazione tra il rigenerante e il bitume invecchiato comportano una fase iniziale in cui il rejuvenator riveste l'aggregato nero e una fase successiva caratterizzata dalla graduale infiltrazione del rigenerante all'interno dello spessore del legante [24].

Inoltre, la ricerca ha anche dimostrato che la combinazione di un rigenerante con il polimero di scarto può migliorare le prestazioni delle miscele di asfalto con un alto contenuto di RAP, in particolare in termini di suscettibilità all'umidità e resistenza alla fatica, rispetto all'HMA [25].

Gli effetti del rejuvenator sul RAP sono stati analizzati anche da La Macchia et al., 2024 [23], il quale utilizza un agente a base biologica per restaurare le proprietà del fresato all'interno di conglomerati bituminosi che prevedono la presenza di aggregati, bitume, elevate quantità di RAP e plastica da riciclo.

2.1.3 Criteri Ambientali Minimi (CAM)

I *Criteri Ambientali Minimi* sono requisiti ambientali stabiliti dal Ministero della Transizione Ecologica che vengono definiti per le varie fasi del processo di realizzazione di un'opera, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore dal punto di vista ambientale lungo il ciclo di vita intero dell'opera, tenendo conto della disponibilità di mercato. Essi sono definiti nell'ambito di quanto stabilito dal Piano per la sostenibilità ambientale dei consumi del settore della pubblica amministrazione (edizione 2023) e sono adottati con Decreto del Ministro. Negli appalti pubblici sono stati resi obbligatori dall'art. 34 del D. Lgs. 50/2016 e, tra essi, è possibile trovare il CAM strade, ovvero il documento che definisce i Criteri Ambientali Minimi per la progettazione e i lavori inerenti a costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali. Nella documentazione di gara e in quella progettuale è obbligatorio inserire, da parte della Pubblica Amministrazione, le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei CAM, i quali permettono alle PA di contribuire agli obiettivi nazionali di sviluppo sostenibile, riducendo spese e integrando gli aspetti ambientali basati sulla valutazione del ciclo di vita dei prodotti, attraverso il raggiungimento di obiettivi tra cui:

- sviluppare infrastrutture di qualità, affidabili, sostenibili e resilienti;
- aggiornare le infrastrutture per renderle sostenibili, con maggiore efficienza delle risorse da utilizzare e una maggiore adozione di tecnologie pulite;
- aggiungere la gestione sostenibile e l'uso efficiente delle risorse naturali;
- ridurre, in modo sostanziale, la produzione di rifiuti attraverso la prevenzione, la riduzione, il riciclaggio e il riutilizzo.

Tra le varie specifiche presenti nel documento dei Criteri Ambientali Minimi, di particolare importanza e di notevole impatto risultano essere le temperature di miscelazione e di posa degli strati di conglomerato bituminoso.

Per quanto riguarda la temperatura di miscelazione, è riportato che la massima temperatura nell'impianto di produzione con bitume tal quale deve essere inferiore di 20°C rispetto a quella massima imposta dalle normative della serie UNI EN 13108 in base al grado del bitume utilizzato. Nel caso di conglomerato bituminoso con bitumi duri secondo la norma UNI EN 13305, o bitumi modificati secondo la norma UNI EN 14023 o conglomerati bituminosi additivati con compound

polimerici e, in generale, ad alta viscosità, la temperatura di miscelazione deve essere inferiore o uguale a 175°C.

La temperatura effettiva di miscelazione viene scelta sulla base delle temperature esterne, delle caratteristiche dei materiali costituenti la miscela e loro modalità di stoccaggio, della distanza del cantiere dall'impianto, in modo da avere la corretta temperatura di posa.

Passando alla temperatura di posa, i CAM impongono che per strade urbane e per le strade extraurbane poste a distanze inferiori a 1000 m dai centri abitati, delimitati così come previsto dall'articolo 5 del decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992 n.495, "Regolamento di esecuzione e attuazione del Codice della strada", la temperatura massima di posa delle miscele bituminose deve essere pari a 120°C. In altri casi, invece, la temperatura massima di posa è di 140°C, come quelli riportati di seguito:

- a) strati della pavimentazione per i quali siano richiesti particolari prestazioni acustiche sulla base del criterio obbligatorio "2.2.4 Emissione acustica delle pavimentazioni" e del criterio premiante "3.2.8 Emissione acustica delle pavimentazioni";
- b) strati della pavimentazione per i quali è previsto l'utilizzo di conglomerati bituminosi preparati con bitumi modificati oppure di conglomerati bituminosi additivati con compound polimerici.

Oltre i 1000 metri dai centri abitati è consentita una temperatura di posa massima di 150°C per conglomerati bituminosi con bitume normale, e di 165°C per conglomerati bituminosi prodotti con bitumi modificati ad alta viscosità. Il capitolato speciale d'appalto descrive le caratteristiche dei materiali da utilizzare, le specifiche tecniche per la corretta posa dei conglomerati bituminosi in conformità al presente criterio e riferimenti dettagliati alle modalità e alla frequenza dei controlli rispetto alla temperatura di posa in fase di esecuzione.

2.2 Progetto GREENROADS

Il *Progetto GREENROADS* è un progetto finanziato dalla Regione Piemonte che vede la collaborazione tra l'azienda Brillada Vittorio S.r.l. e il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, e ha come scopo principale quello di realizzare pacchetti stradali con caratteristiche "green" in grado di utilizzare plastiche riciclate nella miscelazione (attualmente non riciclate in altri contesti produttivi) e fresato.

Uno studio di fattibilità del 2023 ha dimostrato che con una semilavorazione di questa tipologia di plastiche (diventano Materia Prima Secondaria) si può ottenere un prodotto che può essere impiegato in maniera simile al compound polimerico standard.

Questa particolare lavorazione consentirebbe di:

- avere un impatto ambientale positivo riutilizzando tonnellate di rifiuti plastici;
- diminuire i costi di produzione (plastiche riciclate a 10 euro a tonnellata sostituiscono in parte il bitume a 600 euro a tonnellata);
- migliorare la durabilità e la resistenza dei conglomerati bituminosi (parziale modifica del bitume stesso che ne migliora le caratteristiche).

Il progetto intende sviluppare un innovativo metodo di produzione di nuove miscele per asfalti, in grado di inserire plastiche derivanti da riciclo, migliorandone la durabilità e la resistenza.

Entrando più nello specifico, il Progetto GREENROADS prevede la progettazione e definizione delle ricette per la produzione di conglomerati bituminosi green (contenenti plastiche da recupero e

fresato RAP) da impiegare nei diversi strati delle pavimentazioni stradali (strato di base, di binder e di usura) in correlazione ai diversi impieghi (es. pavimentazione di aree di sosta, pavimentazioni di strade con differenti livelli di traffico).

Per ogni tipologia di miscela da progettare (strato di base, binder/collegamento e usura) verrà ricercata la migliore distribuzione granulometrica dello scheletro litico e si confezioneranno in laboratorio conglomerati a diversi dosaggi di bitume e plastica. Verranno quindi prodotti dei campioni da sottoporre a caratterizzazione volumetrica e meccanica per definire le ricette ottimali delle nuove miscele.

In particolare, le attività principali saranno le seguenti.

- Costituenti partendo dalle ricette Brillada.
 - Bitume: 1 tipologia, 70/100.
 - Plastica: 2 dosaggi (0.8% e 0.4%) su miscela totale.
 - Temperatura di produzione e di stesa.
- Mix design di
 - Base: 35% RAP 0/20
 - Binder/Collegamento: 25% RAP 0/20
 - Usura: 15% RAP 0/6
- Impiego delle miscele realizzate per diversi impieghi (es. pavimentazione di aree di sosta, pavimentazioni di strade con differenti livelli di traffico) attraverso dimensionamento della pavimentazione.

Il capitolato a cui si farà riferimento in questo progetto sarà il capitolato ANAS, in cui sono presenti una serie di regole a cui si deve prestare attenzione.

- Le miscele dovranno avere una composizione granulometrica determinata in conformità con la UNI EN 13108-1 e UNI EN 12697-2 utilizzando i setacci appartenenti al gruppo base+2 e compresa nei fusi di seguito elencati e una percentuale di bitume riferita al peso della miscela, compresa tra i sottoindicati intervalli per i diversi tipi di conglomerato.
 - *Strato di **Base***

Apertura setacci UNI	Passante totale in peso %
Setaccio 31.5	100
Setaccio 20	68-88
Setaccio 16	55-78
Setaccio 8	36-60
Setaccio 4	25-48
Setaccio 2	18-38
Setaccio 0.5	8-21
Setaccio 0.25	5-16
Setaccio 0.063	4-8

Tabella 2. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Base

Bitume, riferito alla miscela, 3,8%-5,2% (UNI EN 12697-1 e 39) e spessori compresi tra 8 e 15 cm.

▪ Strato di **Collegamento/Binder**

Apertura setacci UNI	Passante totale in peso %
Setaccio 20	100
Setaccio 16	90-100
Setaccio 12.5	66-86
Setaccio 8	52-72
Setaccio 4	34-54
Setaccio 2	25-40
Setaccio 0.5	10-22
Setaccio 0.25	6-16
Setaccio 0.063	4-8

Tabella 3. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Collegamento/Binder Bitume, riferito alla miscela, 4,1%-5,5% (UNI EN 12697-1 e 39) e spessori compresi tra 4 e 8 cm.

▪ Strato di **Usura** tipo A (spessore 4-6 cm)

Apertura setacci UNI	Passante totale in peso %
Setaccio 16	100
Setaccio 12.5	90-100
Setaccio 8	70-88
Setaccio 4	40-58
Setaccio 2	25-38
Setaccio 0.5	10-20
Setaccio 0.25	8-16
Setaccio 0.063	6-10

Tabella 4. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Usura Bitume, riferito alla miscela, 4,5%-6,1% (UNI EN 12697-1 e 39) e spessori compresi tra 4 e 6 cm per l'usura tipo A.

- Le miscele dovranno avere delle percentuali dei vuoti la cui verifica dovrà essere fatta a tre livelli di n° giri: *N1 (iniziale)*, *N2 (medio)* e *N3 (finale)*; il numero dei giri di riferimento con le relative percentuali dei vuoti sono:

	Usura A e B	Binder e Base	% vuoti (V_m UNI EN 12697-8)
N1	10	10	11-15
N2	120	100	3-6
N3	210	180	>2

Tabella 5. Valori di riferimento per N1, N2, N3 e percentuale dei vuoti

- Le miscele risultanti dallo studio/verifica mediante giratoria (compattate a N3) dovranno essere testate a trazione diametrale a 25°C e 40°C. I due parametri di riferimento sono *Rt* (resistenza a trazione indiretta) e *CTI* (coefficiente di trazione indiretta):

▪ **Strato di Base**

	Miscele con bitume TQ	Miscele con bitume SF e HD
<i>Rt</i> (GPa x 10 ⁻³)	0.72-1.40	0.95-1.70
<i>CTI</i> (GPa x 10 ⁻³)	≥ 65	≥ 75

Tabella 6. Valori di riferimento di *Rt* e *CTI* per strato di Base

▪ **Strato di Collegamento/Binder**

	Miscele con bitume TQ	Miscele con bitume SF e HD
<i>Rt</i> (GPa x 10 ⁻³)	0.72-1.40	0.95-1.70
<i>CTI</i> (GPa x 10 ⁻³)	≥ 65	≥ 75

Tabella 7. Valori di riferimento di *Rt* e *CTI* per strato di Collegamento/Binder

▪ **Strato di Usura**

	Miscele con bitume TQ	Miscele con bitume SF e HD
<i>Rt</i> (GPa x 10 ⁻³)	0.72-1.60	0.95-1.90
<i>CTI</i> (GPa x 10 ⁻³)	≥ 65	≥ 75

Tabella 8. Valori di riferimento di *Rt* e *CTI* per strato di Usura

Vengono riportate le ricette delle miscele di riferimento prodotte in impianto per la realizzazione degli strati di Usura, Collegamento e Base, le curve granulometriche, i valori di Massima Massa Volumica Teorica e Contenuto di Bitume ottenuti in laboratorio al DIATI.

Usura	
Sabbia Granita 0/5	27.2%
Graniglia 3/8	31.0%
Pietrischetto 5/15	22.1%
Filler	4.7%
RAP 0/6	15.0%
Totale	100%
Bitume tipo 70/100 di apporto % su inerti	5.06%

Tabella 9. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Usura

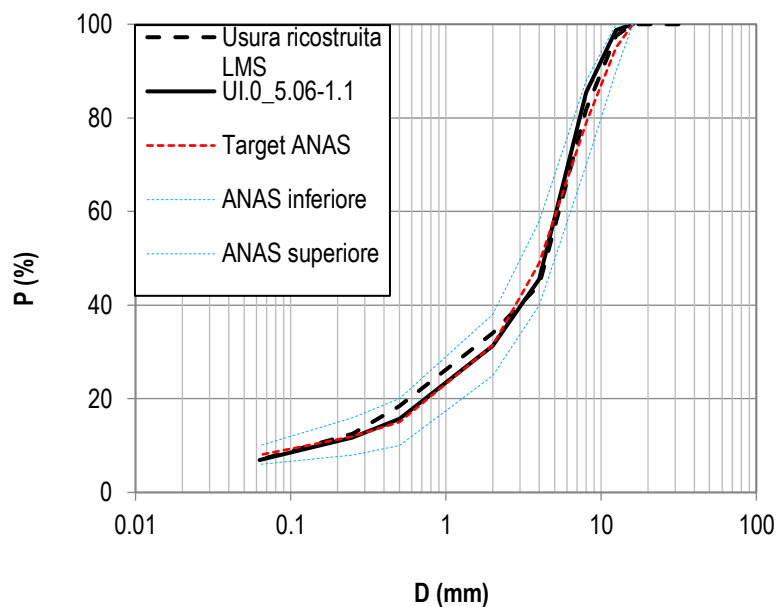


Figura 8. Curva granulometrica dello strato di Usura

Collegamento	
Sabbia Granita 0/5	40.0%
Pietrischetto 5/15	16.1%
Pietrisco 15/25	16.1%
Filler	2.8%
RAP 0/20	25.0%
Totale	100%
Bitume tipo 70/100 di apporto % su inerti	3.77%

Tabella 10. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Collegamento

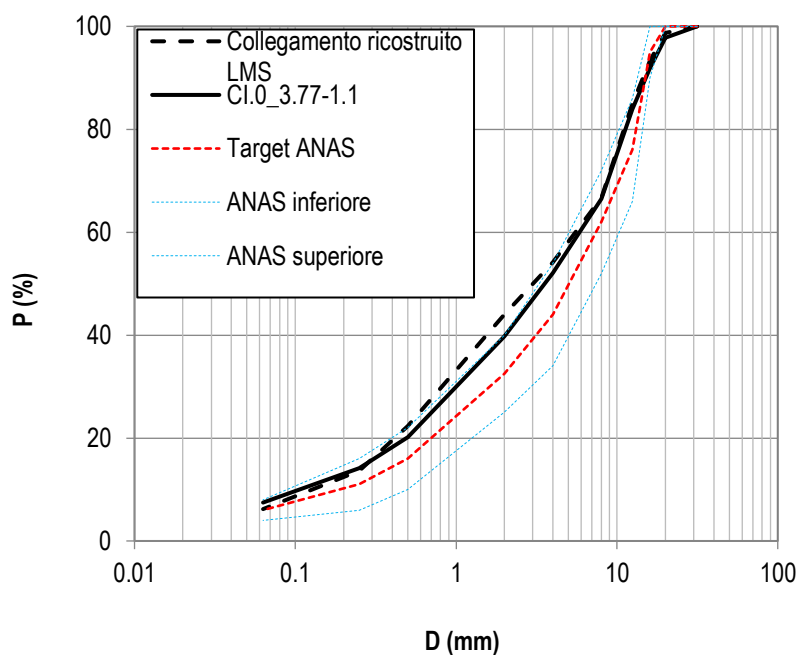


Figura 9. Curva granulometrica dello strato di Collegamento

Base	
Sabbia Granita 0/5	30.0%
Pietrisco 15/25	35.0%
RAP 0/20	35.0%
Totale	100%
Bitume tipo 70/100 di apporto % su inerti	2.46%

Tabella 11. Proporzioni dei materiali costituenti lo strato di Base

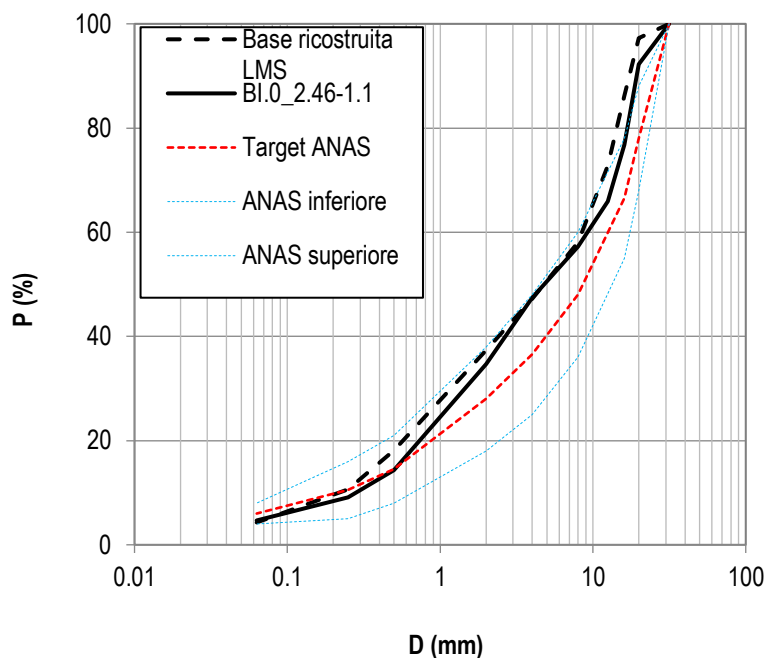


Figura 10. Curva granulometrica dello strato di Base

Test ID	MMVT [Mg/m ³]
Usura	2.535
Collegamento	2.554
Base	2.586

Tabella 12. Valori di Massima Massa Volumica Teorica delle miscele prodotte in impianto

Test ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregati
Usura	5.69	6.04
Collegamento	4.85	5.10
Base	3.97	4.13

Tabella 13. Valori di Contenuto di Bitume delle miscele prodotte in impianto

2.3 Mix Design

Il conglomerato bituminoso, da definizione, è un materiale che prevede la presenza contemporanea di aggregati e bitume, legati fra di loro, per formare un unico composto; per la sua realizzazione viene eseguito uno studio dei quantitativi dei due materiali per far sì che l'interazione tra essi sia ottima e che si ottengano delle prestazioni aspettate. Tutto questo è ancora di più amplificato, come nel caso del progetto SWITCH, in cui si ha anche la presenza di RAP e plastiche da riciclo, e lo studio condotto per ottenere la ricetta ottimale prende il nome di *Mix Design*.

La procedura di Mix Design risulta essere fondamentale nella realizzazione delle miscele di conglomerato bituminoso; essa rappresenta quella procedura utilizzata per identificare "una miscela e una gradazione economicamente vantaggiosa di aggregati e asfalto" che permetta di ottenere una miscela bituminosa che abbia:

- adeguato contenuto di bitume → durabilità;
- appropriata resistenza ai danni indotti dal traffico e dalle condizioni climatiche (ormaiamento, fatica, fessure alle basse temperature, ...);
- adeguato contenuto di vuoti d'aria;
- idonea lavorabilità;
- efficaci caratteristiche della superficie.

In particolare, si cerca di trovare il miglior compromesso tra le proprietà desiderate e cercate.

L'obiettivo finale della fase di Mix Design è quello di selezionare un contenuto di bitume unico che permetta di raggiungere un equilibrio tra tutte le proprietà desiderate. Le prestazioni finali delle pavimentazioni sono legate a durabilità, impermeabilità, resistenza, stabilità, rigidità, flessibilità, resistenza alla fatica e lavorabilità. Ovviamente, non esiste un singolo contenuto di legante che massimizzi tutte queste proprietà, ma si stabilisce il contenuto ottimale sulla base dell'ottimizzazione delle proprietà necessarie per le condizioni specifiche [10].

La fase di Mix Design, insieme a una corretta pratica di costruzione, è una fase importante per ottenere pavimentazioni in conglomerato bituminoso dalle buone prestazioni. In molti casi, la causa delle scarse prestazioni delle pavimentazioni viene attribuita a una cattiva o inappropriata progettazione della miscela, oppure è dovuta alla produzione di una miscela diversa da quella progettata in laboratorio. La corretta progettazione delle miscele implica anche che vengano osservate una serie di tecniche di laboratorio e di criteri di progettazione stabiliti, le quali si basano sulla ricerca scientifica e su anni di esperienza nell'osservazione delle prestazioni delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. È fondamentale che tutto ciò che deve essere realizzato in laboratorio segua con precisione le prescrizioni [10].

Come già accennato precedentemente, le prestazioni desiderate e considerate nella fase di Mix Design risultano essere:

- resistenza alle deformazioni permanenti (ormaiamento);
- resistenza a fatica;
- resistenza alle fessurazioni a basse temperature;
- impermeabilità;
- durabilità;
- skid resistance;
- lavorabilità.

Per quanto riguarda invece le proprietà volumetriche considerate e richieste nella fase di progettazione della miscela sono:

- densità;
- numero di vuoti;
- vuoti negli aggregati, detti anche “voids in the mineral aggregate” VMA;
- vuoti riempiti dal bitume, detti anche “voids filled with bitumen” VFB;
- contenuto di bitume.

La fase di Mix Design si differenzia a seconda che si debba progettare una miscela tradizionale (aggregati, bitume e filler), miscela con RAP e miscela con plastiche.

Per quanto riguarda il Mix Design tradizionale, le fasi principali consistono in selezione e gradazione degli aggregati, selezione e definizione del contenuto di bitume.

- Per la selezione degli aggregati, essi devono soddisfare le specifiche di progetto sviluppate sulla base di standard (es. EN 13043 in EU) ed esperienza; essi devono essere descritti in termini di dimensione delle particelle con la denominazione d/D , dove d è la dimensione del setaccio più piccolo e D è la dimensione del setaccio più grande. Secondo le norme europee (EN 13043, EN 13242), esiste una distinzione fatta in base alla dimensione delle particelle:
 - aggregati grossolani: $D > 4 \text{ mm}$ e $d \geq 1 \text{ mm}$;
 - aggregati fini: $D \leq 4 \text{ mm}$ e $d = 0$;
 - aggregati in frazione unica: $D > 4 \text{ mm}$ e $d = 0$;
 - filler: aggregati passanti al setaccio 0.063 mm .

Tutte le tipologie di aggregati devono rispettare certe proprietà, valutate secondo modalità precise descritte da norme.

COARSE AGGREGATE			
Property	Test method	Required value	Category UNI EN 13043
Resistance to fragmentation (LA)	UNI EN 1097-2	$\leq 30\%$	LA ₃₀
Crushed surfaces	UNI EN 933-5	≥ 80	C _{80/0}
Maximum size	UNI EN 933-1	30mm	-
Passing to 0.063 mm	UNI EN 933-1	$\leq 1\%$	f ₁
Resistance to freezing and thawing	UNI EN 1367-1	$\leq 1\%$	F ₁
Flakiness Index	UNI EN 933-3	$\leq 30\%$	FI ₃₀
Water absorption	UNI EN 1097-6	$\leq 1.5\%$	WA _{M2}
FINE AGGREGATE			
Property	Test method	Required value	Category UNI EN 13043
Sand equivalent	UNI EN 933-8	$\geq 70\%$	-
Crushed surfaces	UNI EN 933-5	$\geq 50\%$	-
Passing to 0.063 mm	UNI EN 933-1	$\leq 2\%$	f ₂
FILLER			
Property	Test method	Required value	Category UNI EN 13043
Plasticity Index	UNI CEN ISO/TS 17892-12	N.P.	-
Voids of dry compacted filler (Rigden)	UNI EN 1097-7	30-45%	V _{38/45}
Stiffening power (filler/bitumen ratio = 1.5)	UNI EN 13179-1	$\geq 5\%$	$\Delta_{p,85} 8/16$

Tabella 14. Aggregati per strato di Collegamento/Binder

- Dopo la selezione degli aggregati, si passa alla determinazione della curva granulometrica degli aggregati che formeranno la miscela, ovvero la gradazione degli aggregati. Si determina la dimensione massima nominale, ovvero la dimensione del setaccio di dimensioni superiori al primo in grado di trattenere più del 10% dell'aggregato, e la dimensione massima, cioè il setaccio più piccolo attraverso il quale passa il 100% delle

particelle di aggregato. La percentuale di passante a un certo setaccio di certe dimensioni viene determinata secondo la formula

$$P_i = 100 \cdot \left(\frac{d_i}{D}\right)^n$$

dove "d_i" rappresenta la dimensione del setaccio i-esimo e "n" il numero di Fuller pari a 0.45.

- Per quanto riguarda la selezione del bitume, esso deve essere conforme alle norme (ad esempio EN 12591, EN 14023, SUPERPAVE attraverso ASTM e AASHTO) e alle specifiche del progetto.
- Dopo la selezione del bitume, si può passare alla determinazione del contenuto iniziale di bitume ottimale, calcolabile mediante il metodo della superficie specifica stabilito da Duriez nel 1959:

$$\Sigma = \frac{1}{100} (0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f) \left[\frac{m^2}{kg} \right]$$

dove:

- G: percentuale di granulometria superiore a 10 mm;
- g: percentuale di gradazione tra 5 e 10 mm;
- A: percentuale di gradazione tra 0.3 e 5 mm;
- a: percentuale di gradazione compresa tra 0.075 e 0.3;
- f: percentuale di granulometria più fine di 0.075 mm;

Il contenuto di bitume (percentuale in massa degli aggregati), basato sul modulo di ricchezza (K) e sull'area di superficie specifica (Σ), è dato da:

$$\%B = \bar{K} \cdot \Sigma^{\frac{1}{5}}$$

con il valore di $\bar{K}$ che varia tra 3.5 e 4.

Passando al Mix Design con materiale RAP o fresato, da un punto di vista economico risulta essere conveniente utilizzare il fresato, dal momento che si può riutilizzare, oltre che da un punto di vista ambientale, perché riduce l'utilizzo di risorse non rinnovabili come aggregati vergine e bitume.

La quantità di RAP utilizzata nella miscela determinerà quali proprietà devono essere conosciute prima di poter utilizzare il RAP e, per questo motivo, sarà necessario conoscere il contenuto di bitume, la granulometria e la gravità specifica degli aggregati RAP [10]. Per la determinazione del contenuto di bitume del fresato, esso dovrà essere calcolato in modo appropriato perché si andrà a sommare al contenuto di bitume vergine, formando il contenuto totale di legante. Esistono due metodi principali per determinare il contenuto di bitume del RAP: la procedura del forno di combustione e l'estrazione con solvente. La prima procedura è descritta nel dettaglio nella norma AASHTO T 308 "Determinazione del contenuto di legante bituminoso nell'Hot Mix Asphalt (HMA) mediante il metodo di combustione", mentre la seconda procedura è descritta in dettaglio nella norma AASHTO T 164 "Estrazione quantitativa del legante bituminoso dall'Hot Mix Asphalt (HMA)". Una volta che una delle due procedure è stata realizzata (da scegliere anche in funzione di specifiche condizioni del RAP e del bitume), si può procedere a determinare la granulometria del materiale ottenuto tramite setacciatura. Riguardo alla gravità specifica, essa si può determinare utilizzando gli aggregati ottenuti dalle due procedure precedentemente citate (forno o solventi), dividerli in grossolani e fini, calcolare la loro gravità specifica e poi determinare la gravità specifica combinata degli aggregati RAP, oppure calcolare direttamente la massima teorica gravità specifica sul fresato [10].

Una volta che è stato selezionato il grado appropriato di bitume vergine e la percentuale di RAP,

si può passare alla fase di Mix Design della miscela, considerando però alcuni fattori, come riportato nell'Asphalt Institute.

- Il RAP deve essere trattato come qualsiasi altro aggregato nella determinazione della curva granulometrica combinata, tranne per il fatto che si deve ricordare che il RAP contiene aggregato e bitume; a differenza degli aggregati vergini, la percentuale di aggregato nel RAP sarà sempre inferiore alla percentuale totale di RAP aggiunto alla miscela.
- Per la realizzazione di una miscela, gli aggregati vergini vengono dosati in base alle loro percentuali di stoccaggio, miscelati e preriscaldati alla temperatura di miscelazione; quando si utilizza il RAP, esso e il bitume vengono dosati insieme e devono essere tenuti separati e non riscaldati come gli aggregati vergini.
- Se gli aggregati vergini vengono dosati, combinati e posti in un forno durante la notte alla temperatura di miscelazione appropriata, dal momento che il RAP contiene legante, esso non potrà essere riscaldato allo stesso modo, perché porterebbe a un'alterazione delle proprietà. Dal momento che il fresato verrà introdotto nella miscela a una temperatura inferiore, l'aggregato vergine dovrebbe essere riscaldato al di sopra della temperatura di miscelazione di un certo valore; sebbene le temperature effettive di miscelazione varino, una buona regola empirica è quella di aumentare la temperatura degli aggregati vergini di 0,5 °C.
- Poiché il RAP predosato contiene legante oltre all'aggregato, è necessario tenere conto del peso del bitume del RAP affinché il contenuto totale sia corretto. Ciò si ottiene calcolando il peso totale del bitume da utilizzare per un determinato contenuto e sottraendo il legante RAP per ottenere il peso del bitume vergine da aggiungere.

Si può dire che la fase di progettazione della miscela risulta essere molto simile a quella tradizionale, tenendo conto però di alcune accortezze legate alla presenza di bitume nel RAP, all'influenza nella curva granulometrica e nella temperatura di riscaldamento.

Passando al Mix Design dei conglomerati bituminosi con plastiche, uno degli obiettivi della fase di progettazione è quello di provare a capire se l'aggiunta delle plastiche permette di sostituire una parte degli aggregati tradizionali, riducendo l'impatto ambientale e il consumo di materie prime. La fase di Mix Design, come lo è quello per il materiale RAP precedentemente descritto, segue procedure simili a quelle tradizionali, ma con l'aggiunta di specifiche fasi per l'integrazione della plastica.

- Selezione della plastica: si utilizzano plastiche pretrattate, come scarti di produzione o rifiuti plastici selezionati e puliti, evitando materiali che potrebbero rilasciare sostanze nocive durante la lavorazione o l'utilizzo.
- Caratterizzazione della plastica: essa viene selezionata, studiata e sottoposta a test per determinarne le proprietà meccaniche, termiche e chimiche, al fine di valutare la sua compatibilità con il bitume e gli aggregati tradizionali.
- Definizione del Mix Design: si procede alla progettazione della miscela, seguendo le normative tecniche e le specifiche del progetto, tenendo conto in questo caso dell'aggiunta di una percentuale di plastica riciclata sul peso totale della miscela, andando a ridurre il contenuto di aggregati vergine nella miscela. La quantità di plastica può variare a seconda del tipo di plastica utilizzata e delle caratteristiche desiderate per il conglomerato. L'aggiunta delle plastiche nella miscela può avvenire, come già accennato, con metodo dry o wet.

Anche in questo caso, la fase di Mix Design risulta essere molto simile a quella tradizionale, con l'unica eccezione rappresentata dalle plastiche.

In molti casi, risulta essere anche importante studiare la fase di Mix Design in cui si ha l'aggiunta contemporanea di RAP e plastiche.

Per la realizzazione di una miscela esistono diverse tipologie di Mix Design in letteratura che possono essere seguite, dal *Marshall Mix Design* (il più antico e conosciuto), fino ai più moderni come *SuperPAVE Mix Design* o *Balanced Mix Design* (BMD). Anche se differiscono l'un l'altro per alcune caratteristiche, tutte le varie tipologie di Mix Design hanno un obiettivo comune: selezionare gli aggregati e il bitume più adatti al fine di realizzare una miscela e combinarli nelle gradazioni più appropriate per ottenere proprietà fisiche e volumetriche ottimali.

Si passa ora a elencare e descrivere alcune tipologie di Mix Design presenti in letteratura.

2.3.1 *Marshall Mix Design*

Il metodo Marshall per il Mix Design è il metodo più antico, conosciuto e utilizzato al mondo per la progettazione di conglomerati bituminosi. Questa metodologia di Mix Design venne inventata negli anni 30 da Bruce Marshall, il quale sviluppò un metodo semplice e veloce per valutare la stabilità di una miscela bituminosa; durante la Seconda Guerra Mondiale vennero condotte ricerche approfondite per l'utilizzo del seguente metodo nella progettazione delle pavimentazioni degli aeroporti e venne stabilito il metodo di progettazione delle miscele Marshall.

Le procedure dei test Marshall sono state standardizzate dall'American Society for Testing and Materials (ASTM) e dall'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Le procedure sono riportate nei seguenti documenti:

- ASTM D6926, "Preparazione di miscele bituminose utilizzando l'apparecchiatura Marshall";
- ASTM D6927, "Metodo di prova standard per la stabilità Marshall e la fluidità delle miscele bituminose";
- AASHTO T 245, "Resistenza al flusso plastico delle miscele bituminose utilizzando l'apparecchiatura Marshall".

Il metodo Marshall originale è applicabile solo ai conglomerati bituminosi a caldo contenenti aggregati con dimensioni massime di 25 mm (1 pollice) o inferiore; è stato sviluppato un metodo Marshall modificato per aggregati con dimensioni massime fino a 38 mm (1,5 pollici) [10].

Come riportato al capitolo 7 dell'Asphalt Institute "Marshall Method of Mix Design", la procedura del Marshall Mix Design inizia con la preparazione dei campioni di prova, in cui devono essere soddisfatte una serie di richieste:

- tutti i materiali proposti per l'uso devono soddisfare i requisiti fisici delle specifiche del progetto;
- le combinazioni di aggregati proposte per la realizzazione dei campioni devono soddisfare i requisiti di granulometria delle specifiche del progetto;
- ai fini dell'esecuzione delle analisi di densità e vuoti, devono essere noti il peso specifico di tutti gli aggregati utilizzati nella miscela e il peso specifico del bitume.

Il metodo Marshall prevede la realizzazione di provini standard di 63,5 mm di altezza e 101,6 mm di diametro; essi vengono preparati utilizzando una procedura specifica per il riscaldamento, la miscelazione e la compattazione della miscela. Le due caratteristiche principali del metodo Marshall sono l'analisi della densità dei vuoti e una prova stability-flow dei campioni di prova compattati: la stability del campione di prova è la resistenza massima al carico in Newton che il

campione di prova standard sviluppa a 60 °C durante il test, mentre il valore di flow number è la deformazione totale, in unità di 0,25 mm, che si verifica nel campione tra l'assenza di carico e il punto di carico massimo durante la prova di stability.

Il Marshall Mix Design prevede alcune procedure principali.

- *Selezione del bitume*: la scelta dovrà essere fatta in funzione della posizione geografica in cui verrà posata la miscela e del traffico previsto; sarà inoltre necessario stabilire le temperature di miscelazione e compattazione tramite prove di viscosità.
- *Selezione degli aggregati*: analisi degli aggregati (considerando le caratteristiche geometriche, meccaniche e fisico-chimiche) e definizione della struttura litologica della miscela (mediante la combinazione di singoli aggregati) per soddisfare i requisiti stabiliti dalle normative di riferimento.
- *Preparazione dei campioni Marshall*: realizzazione di diversi campioni con differenti contenuti di bitume selezionati a incrementi costanti intorno al contenuto ottimale previsto di bitume; il contenuto iniziale di bitume può essere stimato in un primo momento in base all'esperienza, alle linee guida, alla formula di calcolo (ad esempio utilizzando il metodo Duriez).
- *Determinazione delle proprietà volumetriche* (contenuto di vuoti d'aria, VMA, VFB) e *delle proprietà meccaniche* (Marshall stability e flow).
- *Selezione del contenuto ottimale di legante* sulla base dei criteri specifici del metodo utilizzato (AI, CIRS, ...).
- *Valutazione delle proprietà volumetriche* (contenuto di vuoti d'aria, VMA, VFB) e *delle proprietà meccaniche* (Marshall stability e flow) al contenuto ottimale di bitume.

Per la determinazione del contenuto di bitume di progetto per una particolare miscela o granulometria di aggregati con il metodo Marshall, vengono preparati una serie di provini per diversi contenuti di bitume, in modo che le curve dei dati di prova mostrino relazioni ben definite. La differenza tra i vari contenuti di bitume risulta essere pari allo 0,5%, con almeno due contenuti di legante superiori al valore di progetto previsto e almeno due inferiori a tale valore. Per avere a disposizione sufficienti dati da analizzare, vengono preparati almeno tre campioni di prova per ciascun contenuto di bitume, pertanto, una miscela preparata con il metodo Marshall in cui è previsto l'utilizzo di cinque diversi contenuti di legante richiederà normalmente almeno 15 campioni di prova [10].

Nel metodo Marshall, per ogni campione compattato vengono determinate alcune procedure e vengono realizzati alcuni test; in particolare, si procederà con:

- determinazione dell'altezza del campione;
- determinazione del peso specifico apparente (bulk density);
- analisi della densità e dei vuoti;
- stability e flow test.

Il test della bulk density può essere eseguito non appena i campioni appena compattati si sono raffreddati a temperatura ambiente. Questo test viene eseguito in conformità alla norma ASTM D1188, "Densità apparente di conglomerati bituminosi compattati utilizzando campioni rivestiti di paraffina" o alla norma ASTM D2726, "Densità apparente di conglomerati bituminosi compattati utilizzando campioni saturi e asciutti in superficie" [10].

Per quanto concerne il test di Marshall Stability e Flow, l'apparecchiatura utilizzata consiste nell'utilizzo di un dispositivo di prova di compressione conforme alla norma ASTM D6927; è progettato per applicare carichi ad una velocità di carico costante di 51 mm al minuto. Sono inclusi due montanti di guida perpendicolari per consentire ai due segmenti di mantenere il posizionamento orizzontale e il libero movimento verticale durante la prova. È dotato di un anello di prova calibrato per determinare il carico di prova applicato, una testa di prova di Marshall Stability da utilizzare nella prova del campione e un dispositivo di registrazione automatica per determinare l'entità della deformazione al carico massimo nella prova [10].



Figura 11. Dispositivo per test di Marshall stability e flow [27]

Prima della realizzazione della prova, è necessario che i provini vengano riscaldati a 60°C in un bagno d'acqua per almeno 30 minuti ma non più di 40 minuti.

Le limitazioni di questo test sono legate all'applicazione di carichi statici, al fatto che la temperatura a cui vengono condizionati i campioni (60°C) differisce dalle condizioni operative, e al fatto che le caratteristiche misurate durante la prova non siano proprietà fondamentali.

In seguito alla realizzazione della prova Marshall, si ottiene per ogni campione valori di Stability e flow che possono essere messi in relazione mediante un grafico, con valori di flow sull'asse delle ascisse e valori di Stability sull'asse delle ordinate. Come già riportato all'inizio del paragrafo, il valore di Stability rappresenta il massimo valore di carico che il provino è in grado di sopportare, mentre il Flow number rappresenta il valore in corrispondenza del massimo carico.

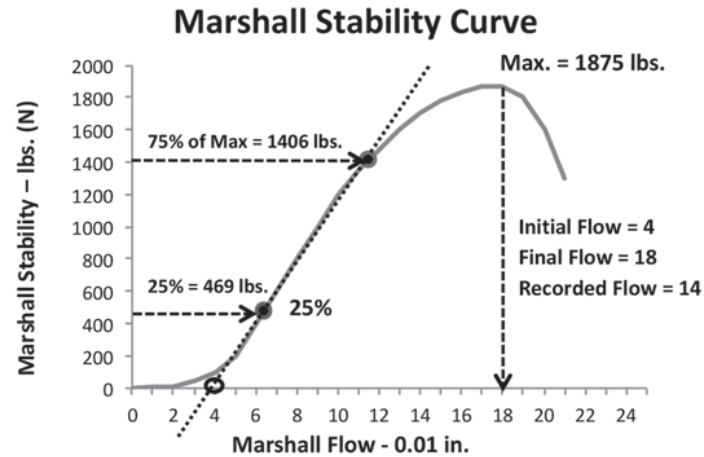


Figura 12. Marshall Stability Curve [27]

Dal loro rapporto è possibile ottenere il Marshall Quotient.

$$Q = \frac{S}{s}$$

Dopo la realizzazione del test per la determinazione di Marshall Stability e Flow, è possibile determinare la densità e il numero di vuoti facendo riferimento alla bulk density.

Come riportato precedentemente, i valori che si ottengono di Marshall Stability, Flow, densità e numero di vuoti devono rispettare alcune specifiche di progetto riportate nelle tabelle sottostanti.

Marshall Method Criteria ¹	Light Traffic ³ Surface & Base		Medium Traffic ³ Surface & Base		Heavy Traffic ³ Surface & Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compaction, number of blows each end of specimen	35		50		75	
Stability ² , N (lb.)	3336 (750)	–	5338 (1200)	–	8006 (1800)	–
Flow ^{2,4,5} , 0.25 mm (0.01 in.)	8	18	8	16	8	14
Percent Air Voids ⁷	3	5	3	5	3	5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) ⁶	See Table 7.3					
Percent Voids Filled With Asphalt (VFA)	70	80	65	78	65	75
NOTES: 1. All criteria, not just stability value alone, must be considered in designing an asphalt paving mix. 2. Hot mix asphalt bases that do not meet these criteria when tested at 60°C (140°F) are satisfactory if they meet the criteria when tested at 38°C (100°F) and are placed 100 mm (4 inches) or more below the surface. This recommendation applies only to regions having a range of climatic conditions similar to those prevailing throughout most of the United States. A different lower test temperature may be considered in regions having more extreme climatic conditions. 3. Traffic classifications Light Traffic conditions resulting in a 20-year Design ESAL < 10 ⁴ Medium Traffic conditions resulting in a 20-year Design ESAL between 10 ⁴ and 10 ⁶ Heavy Traffic conditions resulting in a 20-year Design ESAL > 10 ⁶ 4. The flow value refers to the point where the load begins to decrease. When an automatic recording device is used, the flow should be corrected as shown in section 7.3.3.3. 5. The flow criteria were established for neat asphalts. The flow criteria are often exceeded when polymer-modified or rubber-modified binders are used. Therefore, the upper limit of the flow criteria should be waived when polymer-modified or rubber-modified binders are used. 6. Percent voids in the mineral aggregate are to be calculated on the basis of the ASTM bulk specific gravity for the aggregate, as discussed in chapter 5. 7. Percent air voids should be targeted at 4 percent. This may be slightly adjusted if needed to meet the other Marshall criteria.						

Tabella 15. Specifiche di progetto per Marshall Mix Design - 1 [10]

Nominal Maximum Particle Size ^{1,2}	Minimum VMA, percent			
	Design Air Voids, Percent ³			
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	$\frac{3}{8}$	14.0	15.0	16.0
12.5	$\frac{1}{2}$	13.0	14.0	15.0
19.0	$\frac{3}{4}$	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0
NOTES: 1. Standard Specification for Wire Cloth Sieves for Testing Purposes, ASTM E11 (AASHTO M 92) 2. The nominal maximum particle size is one size larger than the first sieve to retain more than 10 percent. 3. Interpolate minimum voids in the mineral aggregate (VMA) for design air void values between those listed.				

Tabella 16. Specifiche di progetto per Marshall Mix Design - 2 [10]

In seguito alle specifiche di progetto per il Marshall Mix Design riportate nell'Asphalt Institute, è possibile andare a determinare il contenuto ottimale di bitume (%B) per la miscela prodotta; in particolare, %B è il valore medio di:

- %B a S_{max} ;
- %B a MV_{max} ;
- %B a $\%V_{mid-point}$.

Nella Figura 13 sono presenti una serie di grafici in cui vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove Marshall, dalla densità, dai numeri di vuoti, VMA, VFB e Peso per unità di volume, in funzione del contenuto di bitume, delle miscele con cinque diversi contenuti di legante.

In funzione delle prescrizioni riportate nella Tabella 15 e Tabella 16, è possibile determinare il contenuto ottimale di bitume della miscela e, una volta ottenuto tale valore, si dovranno valutare le proprietà volumetriche e meccaniche del conglomerato con il valore ottimale di bitume.

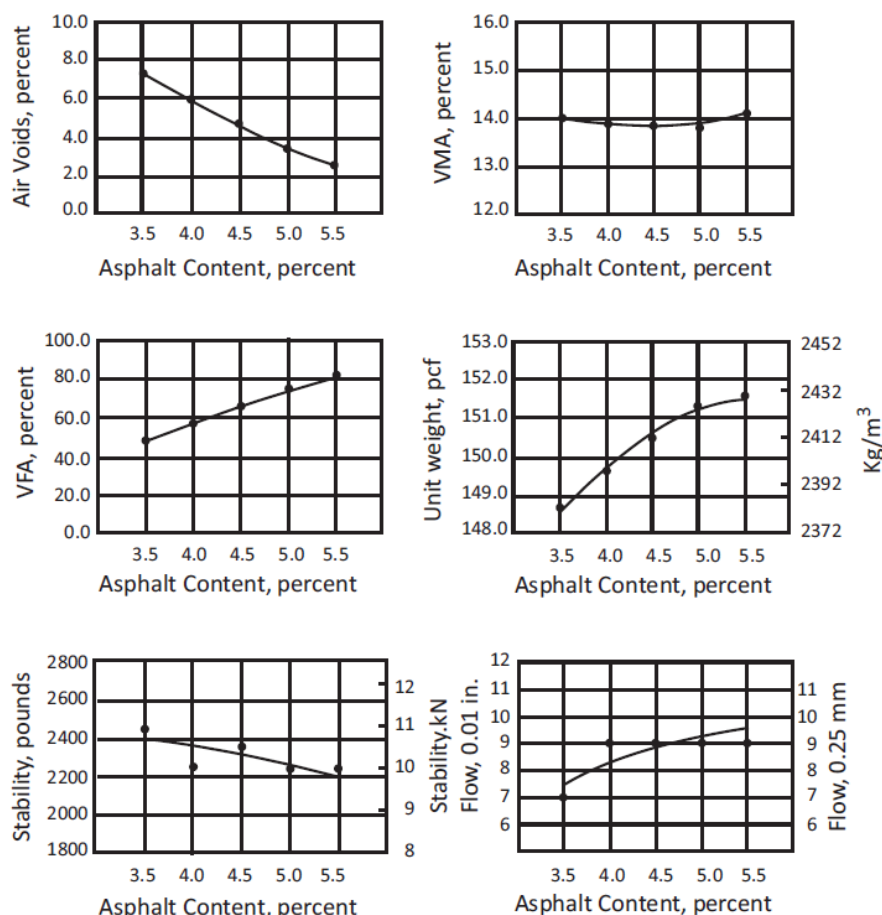


Figura 13. Grafici ottenuti da Marshall Mix Design [10]

2.3.2 SuperPAVE Mix Design

Il SuperPAVE Mix Design (SUPERior PERforming Asphalt PAVEMENTs) è un metodo inventato nel 1987 in seguito a uno studio quinquennale della Federal Highway Administration, che ha avuto lo scopo di fornire agli ingegneri e agli appaltatori di pavimentazioni gli strumenti necessari per migliorare le prestazioni delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso [10].

Il prodotto originale includeva tre livelli di progettazione della miscela:

- **LIVELLO 1** basato sulla progettazione volumetrica, per strade con ESAL < 1 milione.
- **LIVELLO 2**, per strade con 1 milione < ESAL < 10 milioni, aggiungeva test di previsione delle prestazioni.
- **LIVELLO 3**, per strade con ESAL > 10 milioni, aggiungeva test avanzati di previsione delle prestazioni.

Il metodo SuperPAVE per il mix design di conglomerati bituminosi segue la procedura riportata di seguito:

- *selezione di bitume e aggregati* che soddisfino i criteri di progettazione;
- *sviluppo di una miscela di aggregati* che soddisfi i requisiti SuperPAVE;
- *miselazione e invecchiamento* a breve termine del bitume e della miscela di aggregati selezionati;
- *compattazione* dei campioni utilizzando la SuperPAVE gyratory compactor in base ai livelli di traffico previsti;
- *analisi delle proprietà volumetriche della miscela*;

- *selezione* della migliore miscela di aggregati e bitume che soddisfi i criteri specificati per la miscela;
- *test* delle prestazioni della miscela per moisture susceptibility. [10]

Per quanto concerne la selezione dei materiali, Il bitume deve essere classificato in base alle prestazioni, un cosiddetto “*performance-graded*” (PG), adeguato alle condizioni climatiche e di carico del traffico nel sito dove deve essere realizzata la pavimentazione, mentre per gli aggregati è importante cercare di rispettare una serie di requisiti relativi all'angolosità degli aggregati grossolani e fini, alle particelle piatte e allungate, al contenuto di argilla e alle proprietà quali abrasione Los Angeles, solidità e assorbimento d'acqua. Nelle tabelle successive ricavate dall'Asphalt Institute sono riportati i valori che devono essere rispettati per la selezione degli aggregati.

20-Year Design ESALs ^a (in millions)	Coarse Aggregate Angularity (Percent), minimum ^c AASHTO T 335 (CAA)		Uncompacted Void Content of Fine Aggregate Angularity (Percent), minimum AASHTO T 304 (FAA)		Sand Equivalent (Percent), minimum AASHTO T 176 (SE)	Flat and Elongated ^c (Percent), maximum ASTM D4791 (F&E)
	≤ 100 mm ^f	> 100 mm ^f	≤ 100 mm	> 100 mm ^f		
< 0.3	55/-	-/-	- ^d	-	40	-
0.3 to < 3	75/-	50/-	40 ^e	40	40	10
3 to < 10	85/80 ^b	60/-	45	40	45	10
10 to < 30	95/90	80/75	45	40	45	10
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	10

NOTES:

a Design ESALs are the anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years and choose the appropriate N_{design} levels.

b 85/80 denotes that 85 percent of the coarse aggregate has one or more fractured faces and 80 percent has two or more fractured faces.

c This criterion does not apply to 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixtures.

d For 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixture designed for traffic levels below 0.3 million ESALs, the minimum Uncompacted Void Content is 40.

e For 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixture designed for traffic levels equal to or above 0.3 million ESALs, the minimum Uncompacted Void Content is 45.

f If less than 25 percent of a construction lift is within 100 mm of the surface, the lift may be considered to be below 100 mm for mix design purposes.

Tabella 17. Requisiti di accettazione per gli aggregati con SuperPAVE – 1 [10]

20-Year Design Equivalent Single Axle Loads (ESALs in millions)	Los Angeles Abrasion (Max. %) AASHTO T 96	Sodium or Magnesium Sulfate Soundness (Max. %) AASHTO T 104	Deleterious materials*	
			Clay Lumps/ Friable Particles AASHTO T 112	Lightweight Particles AASHTO T 113
< 0.3	45	25	<5	<5
0.3 to < 3	40	20	<4	<4
3 to < 10	30	15	<3	<3
10 to < 30	30	15	<2	<2
≥ 30	25	<10	<1	<1

*Specific tests and property requirements to be determined locally

Tabella 18. Requisiti di accettazione per gli aggregati con SuperPAVE – 2 [10]

Per la gradazione degli aggregati da utilizzare, anche in questo caso, bisogna fare riferimento a una serie di requisiti riportati nella Tabella 19 in cui sono stati stabiliti, ai vari setacci, i valori dei punti di controllo per definire la tipologia di miscela.

NMAS	37.5 mm		25 mm		19 mm		12.5 mm		9.5 mm		4.75 mm	
Sieve, mm	Min. % P	Max. % P	Min. % P	Max. % P	Min. % P	Max. % P	Min. % P	Max. % P	Min. % P	Max. % P	Min. % P	Max. % P
50.0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37.5	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.0	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
19.0	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100
4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
2.36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-
1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	55
0.600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.075	0.0	6.0	1.0	7.0	2.0	8.0	2.0	10.0	2.0	10.0	6.0	13.0

Tabella 19. Requisiti di gradazione per gli aggregati con SuperPAVE

Come riportato nell'Asphalt Institute al capitolo 6 "SuperPAVE HMA Mix Design System", con il presente metodo di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso è necessario preparare i seguenti campioni:

- almeno 8 campioni da compattare a N_{des} ;
- almeno 2 campioni su cui eseguire la prova della massima densità teorica;
- almeno 6 campioni per la prova di water sensitivity AASHTO T 283;
- almeno 2 campioni per la verifica di N_{max} ;
- almeno 2 campioni per la verifica N_{max} ;
- qualsiasi altro campione richiesto per le prove di prestazione specificate.

Nella realizzazione di una miscela SuperPAVE vengono utilizzate tre diverse miscele di prova e, per ognuna di esse, viene stimato il valore iniziale di contenuto di bitume mediante l'utilizzo della seguente equazione:

$$P_{B-TRIAL} = \frac{100 \cdot MV_B \cdot (V_{BE} + V_{BA})}{(MV_B \cdot (V_{BE} + V_{BA})) + W_G} \quad \text{con} \quad W_G = \frac{P_G \cdot (1 - V_A)}{\left(\frac{P_B}{MV_B}\right) + \left(\frac{P_G}{MV_{GE}}\right)}$$

dove:

- MV_B : densità del bitume;
- V_{BE} : volume del bitume effettivo;
- V_{BA} : volume del legante assorbito;
- W_G : peso della miscela di aggregati;
- MV_{GE} : densità effettiva della miscela di aggregati;
- V_A : volume dei vuoti d'aria;
- P_B : percentuale del bitume;
- P_G : percentuale degli aggregati.

La procedura di Mix Design richiede la realizzazione di campioni con almeno quattro diversi contenuti di bitume, consigliando di creare campioni con il contenuto iniziale di bitume previsto per la progettazione (stimato con la formula riportata nella pagina precedente) e con un intervallo di -0.5%, +0.5% e +1.0% di legante rispetto al contenuto iniziale.

Una volta stabilito il contenuto iniziale di bitume e i vari valori incrementati, si passa alla miscelazione e compattazione mediante l'utilizzo della *SuperPAVE gyratory compactor*, in cui

devono essere rispettati una serie di requisiti per i numeri di giri funzione del numero di ESAL (Equivalent Standard Axle Load), la massima densità teorica, VMA, VFB e Dust-to-Binder Ratio.

20-Year Design ESALs ^a (in millions)	Required Relative Density During Mix Design, Percent of Theoretical Maximum Specific Gravity (% G _{mm})			Voids in the Mineral Aggregate (VMA), Percent Minimum					Voids Filled with Asphalt (VFA) ^b Range, Percent	Dust-to-Binder Ratio (DP) Range ^c
	N _{initial}	N _{design}	N _{maximum}	Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS), mm						
				37.5	25.0	19.0	12.5	9.5		
< 0.3	≤ 91.5	96.0	≤ 98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	70-80 ^{d,e}	0.6-1.2
0.3 to < 3	≤ 90.5								65-78 ^f	
3 to < 10	≤ 89.0								65-75 ^{e,f,g}	
10 to < 30									65-75 ^g	
≥ 30										

NOTES:

a Design ESALs are the anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years.

b For 37.5-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the specified lower limit of the VFA shall be 64 percent for all design traffic levels.

c For 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the dust-to-binder ratio shall be 1.0 to 2.0, for design traffic levels < 3 million ESALs, and 1.5 to 2.0 for design traffic levels ≥ 3 million ESALs.

d For 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the relative density (as a percent of the theoretical maximum specific gravity) shall be within the range of 94.0 to 96.0 percent.

e For design traffic levels < 0.3 million ESALs and for 25.0-mm nominal maximum size mixtures, the specified lower limit of the VFA range shall be 67 percent, and for 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the specified VFA range shall be 67 to 69 percent.

f For design traffic levels > 0.3 million ESALs and for 4.75-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the specified VFA range shall be 66 to 67 percent.

g For design traffic levels ≥ 3 million ESALs and for 9.5-mm nominal maximum aggregate size mixtures, the specified VFA range shall be 73 to 76 percent.

If the aggregate gradation passes beneath the specified PCS Control Point, the dust-to-binder ratio range may be increased from 0.6-1.2 to 0.8-1.6 at the agency's discretion.

Mixtures with VMA exceeding the minimum value by more than 2 percent may be prone to flushing and rutting. Unless satisfactory experience with high VMA mixtures is available, mixtures with VMA greater than 2 percent above the minimum should be avoided.

Tabella 20. Requisiti dei numeri di giri per la SuperPAVE gyratory compactor [10]

Lo scopo principale con il metodo SuperPAVE è quello di ottenere delle miscele con una percentuale di vuoti d'aria pari a 4% in corrispondenza di N_{des}, ai quali corrisponde una percentuale di compattazione del 96%. Nel caso in cui il contenuto di vuoti d'aria (v) a N_{des} dovesse differire dal 4%, è necessario stimare il contenuto di legante di progetto al quale v=4% e regolare il VMA e il livello di compattazione C. Tutto questo viene fatto utilizzando la seguente formula:

$$P_{B-ESTIMATED} = P_{B-TRIAL} + \Delta P_B = P_{B-TRIAL} - 0.4 \cdot \Delta V_A$$

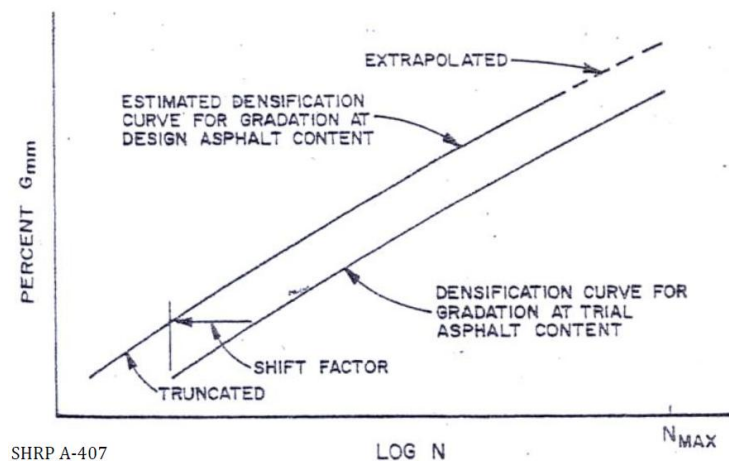


Figura 14. Stima del contenuto di bitume a vuoti pari a 4%

In seguito, si passa alla preparazione di quattro miscele con diverso contenuto di legante (contenuto di bitume previsto, $\pm 0,5\%$ e $+1,0\%$), si realizzano campioni per eseguire l'analisi volumetrica e ottenere numero di vuoti, VMA e VFA, e infine si determina il contenuto ottimale di bitume che garantisca la conformità delle prescrizioni.

Nella Figura 15 sono riportati, a titolo di esempio, una serie di grafici con i valori di vuoti d'aria, VMA, VFA o VFB e la densità al variare del contenuto di bitume (4.3%, 4.8%, 5.3%, 5.8%); dai grafici si può evincere come il contenuto ottimale di bitume per la miscela risulti essere pari a 5.7%, dal momento che permette di ottenere una miscela con vuoti pari a 4% e permette anche di rispettare le prescrizioni riguardanti VMA e VFA.

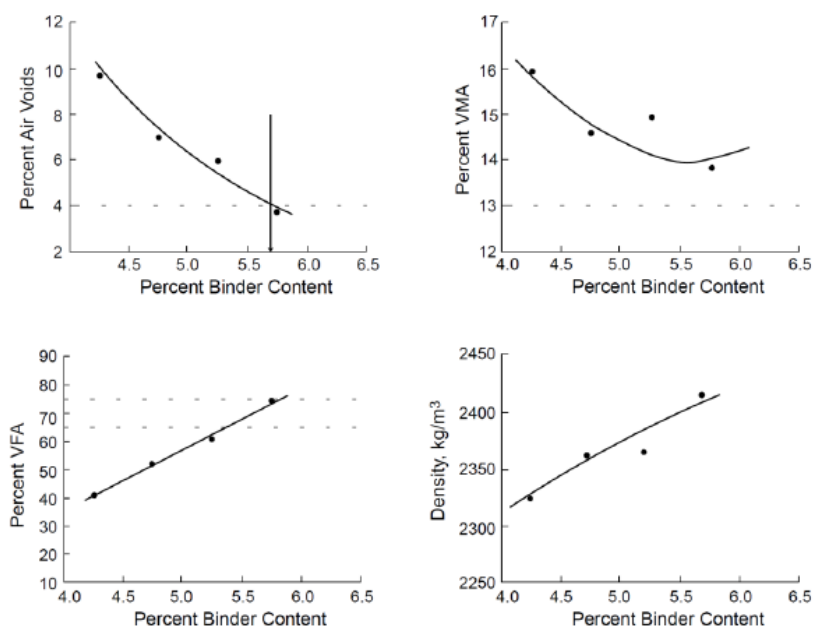


Figura 15. Esempio di grafici di v , VMA, VFA e densità per una miscela a diversi contenuti di bitume [10]

Il passo successivo nel processo di Mix Design della miscela è quello di effettuare test di *moisture susceptibility*. La miscela deve soddisfare tutti i criteri riguardanti gli aggregati e le proprietà volumetriche e tutti i campioni preparati per il test saranno miscelati al contenuto di bitume ottimale di progetto. La resistenza alla trazione a 25 °C di una serie di campioni asciutti (ITS1) viene confrontata con la resistenza alla trazione a 25 °C di una serie di campioni condizionati in acqua (ITS2), e i valori di resistenza ottenuti vengono rapportati tra di loro e dovranno rispettare alcune specifiche di progetto.

I campioni in acqua (55%-80% di saturazione) vengono posti in un sacchetto di plastica con acqua all'interno di un congelatore a -18 °C per 16 ore e in un bagno d'acqua a 60 °C per 24 ore.

2.3.3 Volumetric Mix Design

Il Volumetric Mix Design è un metodo che può essere considerato alternativo al Marshall Mix Design ed è stato sviluppato e promosso dalle specifiche tecniche CIRS; si ispira al livello 1 della progettazione della miscela con metodo SuperPAVE, variando i limiti di prestazione, e si basa sull'utilizzo della pressa taglio-giratoria.

VOLUMETRIC METHOD		PAVEMENT LAYER			
Compaction conditions	Unit of measure	BASE	BINDER	WEARING COURSE	
Rotating angle	Degree	1.25			
Rotating speed	RPM	30			
Vertical pressure	kPa	600			
Specimen diameter (D)	mm	150			
Requested results					
Voids at 10 gyrations	%	10 -14	10 – 14	10 – 14	
Voids at 100 gyrations	%	3 – 5	3 – 5	4 – 6	
Voids at 180 gyrations	%	> 2	> 2	> 2	
Indirect tensile strength (ITS) at 25 °C ¹	N/mm ²			> 0.6	
Indirect tensile coefficient (CTI) at 25 °C	N/mm ²			> 50	
Loss in ITS at 25 °C after conditioning 15 d in water ¹	%	≤ 25	≤ 25	≤ 25	
¹ On specimens compacted at 100 gyrations					
² $CTI = \frac{\pi D \cdot ITS}{2 \cdot \delta_c}$ with δ_c vertical displacement at the maximum load					

Tabella 21. Requisiti per Volumetric Mix Design

Le fasi principali di questa metodologia di Mix Design sono le seguenti.

- *Selezione* del tipo di bitume.
- *Scelta* degli aggregati e della granulometria.
- *Stima* del contenuto iniziale di bitume.
- *Preparazione* di miscele di conglomerato bituminoso con diverso contenuto di legante.
- *Preparazione* di provini girevoli a N_{max} e determinazione delle proprietà volumetriche e lavorabilità.
- *Valutazione* delle proprietà volumetriche a N_{des} , N_{ini} e N_{max} .
- *Determinazione* del contenuto ottimale di bitume.
- *Verifica* della conformità ai criteri della miscela con il contenuto ottimale di bitume (proprietà volumetriche, proprietà meccaniche e durabilità).

Dalla procedura esposta si può notare come questo metodo sia molto simile, se non praticamente uguale, al SuperPAVE Mix Design, in cui però variano i valori limite dei requisiti da rispettare per quanto riguarda le caratteristiche volumetriche e meccaniche.

2.3.4 Balanced Mix Design (BMD)

Oltre ai 3 approcci citati precedentemente, cioè Marshall, SuperPAVE e Volumetric Mix Design (a cui può anche essere aggiunto il metodo Hveem seppur poco utilizzato), negli ultimi anni è stato sviluppato un nuovo metodo per la progettazione di miscele di conglomerati bituminosi che prende il nome di Balanced Mix Design (BMD).

La norma "AASHTO PP 105, Balanced Design of Asphalt Mixtures" definisce il BMD come "la progettazione di conglomerati bituminosi che prevede l'utilizzo di prove a carattere prestazionale su campioni opportunamente condizionati, tenendo conto di molteplici modalità di deterioramento, tra cui l'invecchiamento della miscela, il traffico, il clima e la posizione all'interno della struttura della pavimentazione" [28].

L'approccio BMD utilizza essenzialmente prove di carattere prestazionale per bilanciare la resistenza di una miscela alla formazione di ormaia e fessure.

Nel processo di progettazione della miscela non si tiene conto soltanto del bilanciamento della resistenza ai danni, ma si deve anche considerare la sostenibilità e le prestazioni a lungo termine, le quali rappresentano un elemento chiave nella progettazione della miscela. Inoltre, una peculiarità di questo metodo è quello di cercare di utilizzare il più possibile materiali locali e

riciclati senza sacrificare le prestazioni della miscela, pertanto, è importante non soltanto considerare l'uso di RAP e altri prodotti nel processo BMD, ma anche come utilizzarli senza diminuire la durata della miscela [28].

Come riportato nella normativa "AASHTO PP 105, Balanced Design of Asphalt Mixtures", esistono 4 diversi approcci al BMD.

- 1) *Approccio A – Volumetric Mix Design con verifica delle prestazioni*: consiste nell'utilizzare il Volumetric Mix Design per selezionare un contenuto ottimale di bitume (OBC) e successivamente la miscela risultante viene sottoposta a test di prestazione selezionati. Se la miscela supera i test di prestazione, la progettazione è completa, altrimenti il processo di progettazione della miscela verrà ripetuto con nuovi materiali e combinazioni fino a quando tutti i criteri volumetrici e di prestazione saranno soddisfatti.
- 2) *Approccio B – Volumetric Mix Design con ottimizzazione delle prestazioni*: prevede l'utilizzo del Volumetric Mix Design per determinare un contenuto ottimale di bitume preliminare e successivamente vengono condotti test di prestazione su miscele realizzate con bitume pari a contenuto ottimale e due o più contenuti di legante aggiuntivi (le quali risulteranno essere maggiori o minori rispetto a quello ottimale). Il contenuto di bitume che permette alla miscela di soddisfare tutti i criteri di prestazione verrà designato come OBC di progettazione. Questo approccio è leggermente più flessibile rispetto all'approccio A.
- 3) *Approccio C – Performance-Modified Volumetric Design*: prevede la progettazione della miscela con metodo volumetrico e si passa successivamente ai test di carattere prestazionale. I risultati dei test vengono utilizzati per regolare il contenuto preliminare del bitume o le proprietà e proporzioni dei componenti della miscela. I valori volumetrici risultanti potrebbero non soddisfare i criteri iniziali. Questo approccio è più flessibile rispetto all'approccio A e all'approccio B.
- 4) *Approccio D – Performance Design*: stabilisce e regola i componenti e le proporzioni dei componenti della miscela utilizzando in maniera limitata se non nulla i parametri volumetrici. È comunque possibile fissare i requisiti minimi per le proprietà del bitume e degli aggregati e verificare i parametri volumetrici della miscela durante la produzione. Si tratta dell'approccio più flessibile, ma anche quello che si discosta maggiormente dai metodi di progettazione volumetrica della miscela storicamente collaudati.

Il BMD rappresenta un passo avanti positivo nella ricerca di miscele più performanti, consentendo l'uso di materiali e metodi innovativi. Gli ormaiamenti, le fessurazioni e altri danni alla pavimentazione possono essere specificamente individuati dai test di carattere prestazionale che vengono realizzati nel processo di Mix Design.

Come tutte le nuove ricerche e scoperte, sebbene il BMD possa far progredire il settore, permangono alcune questioni critiche relative alla sua implementazione, in particolare i test di fessurazione e la convalida di tali test con le prestazioni in servizio. Il Volumetric Mix Design è sempre stato apprezzato nel settore della progettazione delle miscele in quanto permette di stabilire il numero di vuoti d'aria, il VMA e il VFB, per cui non risulta vantaggioso al giorno d'oggi non considerare più queste caratteristiche per lo studio dei conglomerati bituminosi; ecco perché, finché non si sarà estremamente sicuri dei test di prestazione scelti per tutti i materiali, le miscele e le applicazioni, l'utilizzo di parametri come vuoti d'aria, VMA e VFB per stabilire la bontà dei materiali risultanti dal Mix Design risulta ancora essere una valida soluzione.

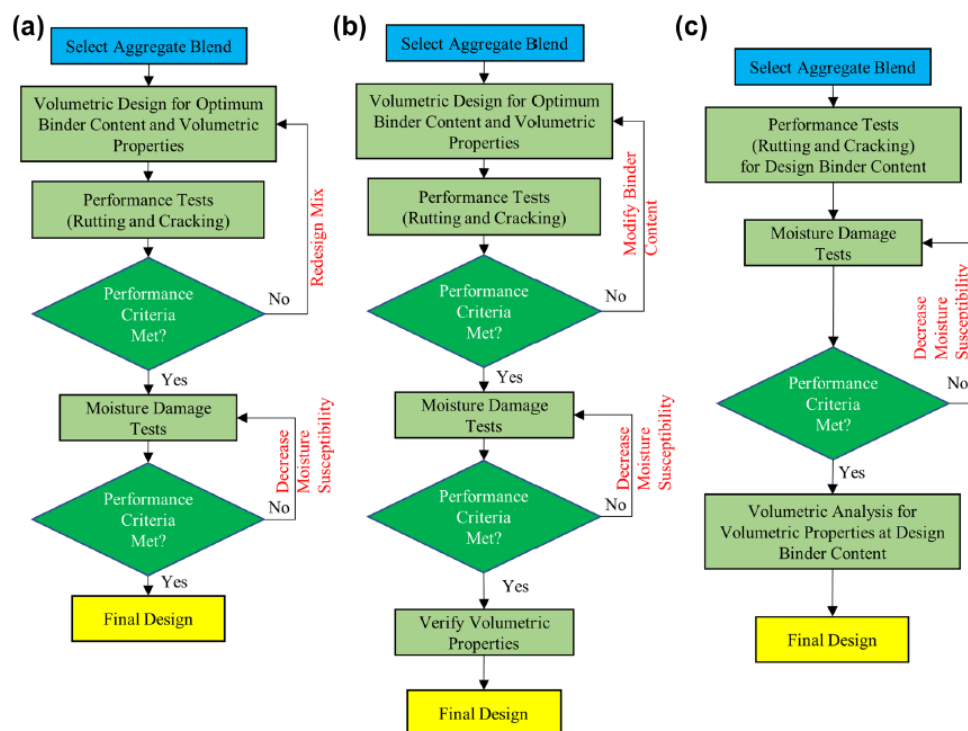


Figura 16. Balanced Mix Design [29]

Inoltre, come riportato all’inizio del paragrafo, questo metodo considera l’utilizzo di materiali locali e riciclati, per cui è fortemente consigliato l’utilizzo di materiale come RAP e altro [28].

Questo metodo è già stato implementato anche in vari studi, come quello di Al-Khayat et al., 2021 [26], in cui viene specificato come il BMD abbia lo scopo di migliorare la durata e la stabilità della miscela di conglomerato bituminoso e a correlare meglio i requisiti di progettazione della miscela di asfalto alle prestazioni sul campo. In particolare, in questo studio vengono realizzate quattro diverse miscele utilizzando aggregati, bitume e RAP e, per ognuna di esse, si ha un contenuto iniziale di bitume stabilito con metodo volumetrico (AC_V) e due altri contenuti di bitume pari a $AC_V \pm 0.5\%$; ogni miscela a diverso contenuto di bitume e diverse gradazioni di aggregati e RAP è stata sottoposta a prove di fessurazione e ormaiamento. In seguito alla realizzazione dei test prestazionali, è stato ottenuto il contenuto ottimale di bitume con BMD (AC_B) per ognuna delle 4 miscele, mostrando come AC_B possa essere in alcuni casi maggiore di AC_V , mentre in altri casi risulti essere minore di AC_V . Nella Tabella 22 sono riportati i valori ottenuti per le quattro miscele ai diversi test prestazionali; in grassetto è riportato, sotto la colonna AC, il valore di AC_V , mentre il valore di AC_B varia a seconda della prova effettuata e dei requisiti da rispettare.

Mixture No.	I-FTT				IDEAL-CT				DCT			
	AC (%)	Mean	Standard deviation	COV (%)	AC (%)	Mean	Standard deviation	COV (%)	AC (%)	Mean	Standard deviation	COV (%)
1: 12.5 mm, carbonate, Level 3	4.9	8.6	1.30	15	4.9	53.9	8.30	15	4.9	385.0	34.09	9
	5.4	9.5	1.04	11	5.4	64.2	7.25	11	5.4	446.0	52.77	12
	5.9	10.6	1.20	11	5.9	105.0	11.12	11	5.9	511.8	99.23	19
AC_B	5.3	—	—	—	5.9	—	—	—	5.8 (LV) ^a	—	—	—
2: 12.5 mm, noncarbonate, Level 4	4.9	8.9	0.71	8	4.9	79.4	7.44	9	4.9	545.4	58.05	11
	5.4	13.2	1.68	13	5.4	115.3	9.68	8	5.4	676.0	147.02	22
	5.9	19.1	3.53	18	5.9	151.9	11.91	8	5.9	779.2	177.13	23
AC_B	5.3	—	—	—	5.3	—	—	—	5.3 (LV or HV) ^b	—	—	—
3: 9.5 mm, carbonate, Level 3	5.3	6.5	0.93	14	5.3	38.8	1.83	5	5.3	429.8	25.41	6
	5.8	11.7	2.78	24	5.8	85.3	11.84	14	5.8	518.4	22.24	4
	6.3	18.8	1.87	10	6.3	105.5	12.09	11	6.3	577.6	19.57	3
AC_B	5.8	—	—	—	6.2	—	—	—	5.8 (LV)	—	—	—
									6.2 (HV)	—	—	—
4: 9.5 mm, noncarbonate, Level 4	5.5	15.8	2.83	18	5.5	76.0	5.78	8	5.5	580.2	67.95	12
	6.0	15.9	3.65	23	6.0	125.4	15.94	13	6.0	700.0	56.04	8
	6.5	19.0	1.15	6	6.5	156.3	14.77	9	6.5	664.6	65.65	10
AC_B	5.9	—	—	—	5.9	—	—	—	5.9 (HV)	—	—	—
Mean	—	—	1.88	14.25	—	—	9.82	10.16	—	—	68.76	11.58
Range	—	—	0.71–3.65	6–24	—	—	1.83–15.94	5–15	—	—	19.57–177.13	3–23

Tabella 22. Valori ottenuti dalle prove per le 4 miscele [26]

Il BMD è stato proposto anche nello studio condotto da Ghos et. al., 2022 [29] in cui è stata promossa la realizzazione di una miscela con utilizzo di aggregati, bitume e due diverse tipologie di plastiche (LDPE e LLDPE) seguendo l'approccio C precedentemente esposto. L'aggiunta delle plastiche è stata fatta seguendo il metodo dry. In seguito alla realizzazione delle miscele, esse sono state sottoposte a prove di carattere volumetrico e prove per stabilire la resistenza a ormaiamento e fessurazione, ottenendo come risultati un miglioramento della resistenza a fessurazione e ormaiamento delle miscele con aggiunta delle plastiche.

Il BMD è stato anche utilizzato nello studio condotto da Ziari et al., 2023 [22], precedentemente citato nel paragrafo 2.1.2 "Utilizzo del RAP nelle miscele" in cui si arriva alla conclusione che il metodo SuperPAVE non risulti essere adatto alla progettazione di miscele con alto contenuto di RAP e agenti riciclatori, mentre risulta essere adatto il Balanced Mix Design per tale scopo.

3. SPERIMENTAZIONE

Nel seguente capitolo verrà illustrato il lavoro sperimentale eseguito presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) della Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino. Nello specifico, partendo dagli obiettivi stabiliti dal Progetto SWICH e dalle miscele prodotte presso lo stabilimento Brillada, si identificano le miscele di conglomerato bituminoso utilizzate nella sperimentazione, si riportano i materiali utilizzati nella fase di sperimentazione e le caratteristiche, si descrive la procedura adottata per il confezionamento di miscele e le varie prove di laboratorio realizzate per ottenere le caratteristiche volumetriche e meccaniche dei materiali ottenuti. Durante la fase operativa del lavoro sperimentale sono state seguite le procedure in conformità alle normative UNI ed EN al fine di ottenere risultati rappresentativi e confrontabili con i requisiti richiesti dalle normative e dal capitolato ANAS.

3.1 Obiettivi e programma sperimentale

Lo scopo di questa Tesi è quello di verificare il comportamento di miscele di conglomerato bituminoso realizzate per lo strato di Usura con due tipologie di plastiche da riciclo, valutare le caratteristiche meccaniche (Modulo di Rigidezza e ITS) e volumetriche (vuoti d'aria, VMA e VFB), e analizzare il comportamento delle plastiche a contatto con aggregati, bitume e RAP, cercando di capire, in funzione della forma, della temperatura di fusione e delle dimensioni, se all'interno delle miscele esse potranno sostituire gli aggregati o il bitume (fusione parziale o totale). Si cercherà quindi di analizzare l'influenza che la plastica ha sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche, deducendola dai risultati delle prove sperimentali che si andranno ad effettuare e confrontando le proprietà ottenute con quelle di miscele a pari contenuto di bitume ma senza materiale polimerico.

Si procederà quindi ad uno studio delle caratteristiche della plastica per capire le sue proprietà (temperatura di fusione e dimensioni), indirizzando l'organizzazione e il proseguo sperimentale delle lavorazioni.

Per lo studio delle miscele bituminose da realizzare si è deciso di adottare la seguente procedura di Mix Design:

- *Definizione dello scheletro litico*: partendo dalle percentuali di aggregati, bitume e RAP riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, e considerando la curva ottenuta dai valori medi di passante progressivo riportati nella Tabella 4 del Capitolato ANAS, si è deciso di modificare le percentuali degli aggregati in modo tale da avere una curva che fosse il più possibile sovrapposta a quella Target di ANAS, ottenendo la curva riportata in Figura 17.

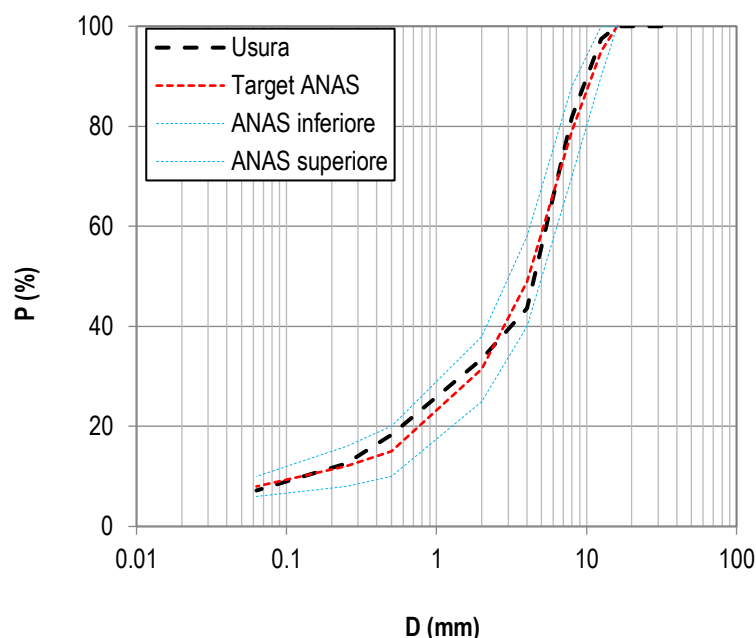


Figura 17. Curva granulometrica Usura con nuove proporzioni dei costituenti

- *Definizione delle percentuali di WP:* si è deciso di adottare come valori percentuali quelli pari a 0.4% e 0.8% sul peso totale della miscela, che erano stati già concordati e riportati nel capitolo "Progetto GREENROADS".
- *Definizione delle contenuto di bitume di 1° tentativo:* partendo dalla miscela di riferimento senza plastiche dello strato di Usura, è stato adottato come contenuto di 1° tentativo il 5.06% di bitume di apporto su aggregati e RAP; facendo come prima ipotesi quella secondo cui il materiale plastico fonda completamente, agendo come sostituto del legante, in funzione delle percentuali di aggiunta della plastica sopra citate, si è deciso di ridurre il contenuto di bitume di una quantità percentuale pari a quella della plastica aggiunta, ottenendo come nuovi valori percentuali di bitume il 4.61% e il 4.19% (aggiungendo, rispettivamente, 0.4% e 0.8% di WP).
- *Definizione delle combinazioni di percentuali di bitume e plastica:* facendo come seconda ipotesi che la sostituzione del bitume, aggiungendo un quantitativo superiore di esso rispetto alle due percentuali sopra riportate, possa avvenire in maniera parziale, ovvero che una parte del materiale plastico non fonde completamente agendo come materiale inerte, sono state realizzate altre miscele combinando le varie percentuali di plastica (0%, 0.4% e 0.8%) con le diverse percentuali di bitume (4.19%, 4.61% e 5.06%). Applicando test di carattere prestazionale, sono state verificate le caratteristiche meccaniche e volumetriche in funzione dei requisiti minimi riportati nel capitolato ANAS.
- *Definizione della temperatura di miscelazione e compattazione:* per la realizzazione di alcune miscele sono state utilizzate temperature di miscelazione e compattazione differenti, con l'obiettivo di analizzare l'effetto della temperatura sul comportamento dei conglomerati contenenti materiale plastico.

Con questa procedura di Mix Design adottata sono state realizzate una serie di miscele che presentano la seguente denominazione:

$$XY.nr_m.mm - A$$

dove:

- X: identifica lo strato della pavimentazione stradale (usura (U), collegamento (C), base (B));
- Y: identifica come è stata prodotta la miscela (impianto (I), laboratorio (L), a mano (M));
- n: identifica la percentuale di aggiunta di plastica sul peso totale della miscela (.0; .4; .8);
- r: identifica la tipologia di plastica aggiunta nella miscela (M, R);
- m.mm: identifica il dosaggio di bitume di apporto su aggregato e RAP (4.19%, 4.61%, 5.06%);
- A: identifica il lotto di produzione per quella miscela nello specifico (1: primo lotto, 2: secondo lotto, ...).

ID	Descrizione	Data	STRATO	MISCELAZIONE
UI.0 5.06-1	TAPPETO +15% GRANULATO 0/6 no rej	12/12/2024	usura	impianto
UL.8M 5.60-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	06/05/2025	usura	miscelatore
UM.0 5.06-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator	08/05/2025	usura	manuale
UM.0 4.19-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator	14/05/2025	usura	manuale
UM.8M 4.19-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	14/05/2025	usura	manuale
UM.4M 4.61-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix	21/05/2025	usura	manuale
UM.0 4.61-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator	21/05/2025	usura	manuale
UM.8M 5.06-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	29/05/2025	usura	manuale
UM.8M 4.61-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	29/05/2025	usura	manuale
UM.4M 4.19-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix	10/06/2025	usura	manuale
UM.4M 5.06-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix	10/06/2025	usura	manuale
UM.8M 4.19-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix - lotto 2	19/06/2025	usura	manuale
UM.8M 4.61-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix - lotto 2	20/06/2025	usura	manuale
UM.8M 5.06-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix - lotto 2	20/06/2025	usura	manuale
UM.4M 4.19-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix - lotto 2	19/06/2025	usura	manuale
UM.8R 4.19-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP Redpol su mix	02/07/2025	usura	manuale
UM.8R 4.61-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP Redpol su mix	02/07/2025	usura	manuale
UM.8R 5.06-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP Redpol su mix	02/07/2025	usura	manuale
UM.4R 4.19-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP Redpol su mix	04/07/2025	usura	manuale
UM.4R 4.61-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP Redpol su mix	04/07/2025	usura	manuale
UM.4R 5.06-1	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP Redpol su mix	04/07/2025	usura	manuale
UM.4R 4.61-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP Redpol su mix per verif	15/07/2025	usura	manuale
UM.4M 4.61-2	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix per verif	18/07/2025	usura	manuale
UM.0M 4.61-1D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator	24/07/2025	usura	manuale
UM.0M 4.61-2D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator	24/07/2025	usura	manuale
UM.8M 4.61-1D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix	24/07/2025	usura	manuale
UM.4M 4.61-2D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.4% WP MEG su mix	24/07/2025	usura	manuale
UM.8M 4.19-1D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	24/07/2025	usura	manuale
UM.8M 4.19-2D	USURA +15% GR 0/6 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix	24/07/2025	usura	manuale

Tabella 23. Elenco delle miscele realizzate e analizzate

Si vuole specificare che questo lavoro di Tesi, essendo focalizzato sullo studio di miscele destinate allo strato di Usura, presenterà conglomerati bituminosi che avranno nella loro denominazione sempre la lettera "U" al posto della lettera "X".

Per ogni miscela realizzata, sono stati prodotti vari campioni il cui numero identificativo (1, 2, 3, ...), è stato posto dopo il numero del lotto di produzione.

Nella Tabella 23 sono riportate tutte le miscele che sono state prodotte in laboratorio, oltre alla miscela iniziale prodotta in impianto, che saranno oggetto di studio in questo lavoro di tesi.

Si vuole mettere in evidenza che le miscele che non dispongono di materiale polimerico al loro interno non presentano, nella denominazione, la lettera identificante la tipologia di plastica, in quanto non rappresentativo; inoltre, quando si parlerà dei conglomerati che contengono materiale plastico, verrà anche utilizzata l'abbreviazione WP che significa "Waste Plastic".

In seguito alla realizzazione dei vari composti e delle varie analisi eseguite sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche, sono state identificate tre miscele ottimali che presentano tre diversi contenuti di plastica e che saranno oggetto di studio nel Progetto GREENROADS; questi

conglomerati bituminosi sono stati poi sottoposti a prove di ITSr per valutare la suscettibilità all'acqua.

3.2 Materiali

Come già anticipato nei capitoli e paragrafi precedenti, il conglomerato bituminoso da testare è una miscela composta da quattro tipologie di materiali, aggregati, bitume, RAP e plastiche da riciclo, su ciascuna dei quali sono state fatte delle prove preliminari di caratterizzazione.

3.2.1 Aggregati e RAP

Gli aggregati e il RAP utilizzati nelle miscele oggetto di studio sono stati raccolti direttamente nell'impianto Brillada, collocato a Borgaro Torinese (TO), Piemonte, Italia, e portati nel laboratorio di Materiali Stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.

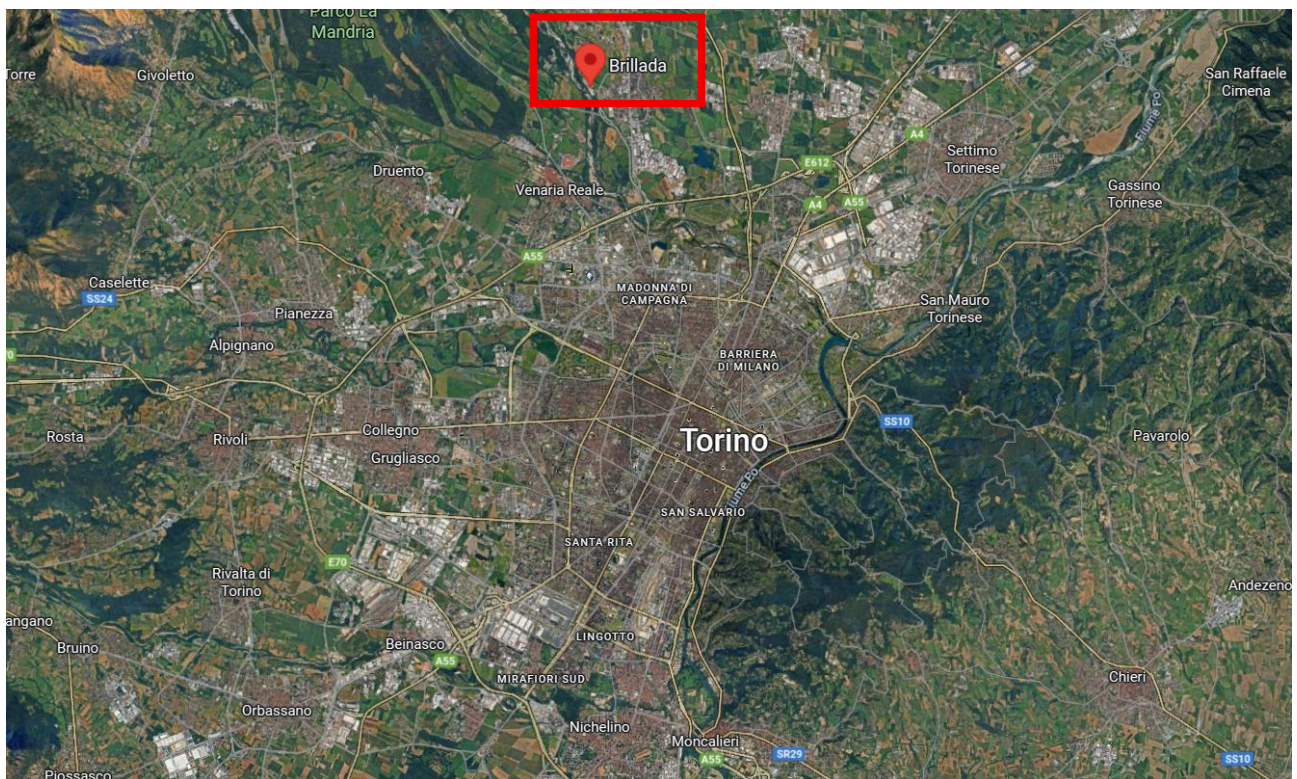


Figura 18. Localizzazione dell'impianto Brillada presso Borgaro Torinese (TO)



Figura 20. Impianto Brillada



Figura 19. Stoccaggio aggregati e RAP

Le classi di materiali utilizzate per la realizzazione dello strato di usura sono 5-15, 3-8, 0-5, *filler* e RAP 0/6, ciascuna delle quali ha differenti dimensioni come mostrato in Figura 21. Per ciascuna classe granulometrica sono state calcolate la densità e la granulometria dello scheletro litico. Si vuole precisare che la classe 5/15 è stata ottenuta dalla classe di aggregato 5/17, dal momento che in impianto viene fornita come classe di aggregato la 5/17; ciò vuol dire che i risultati relativi a densità e curva granulometrica fanno riferimento a quest'ultima classe. Per ottenere aggregato di classe 5/15, necessario per la realizzazione dello strato di usura, è stato utilizzato un setaccio di apertura 16 mm così da ottenere un materiale inerte privo delle particelle di diametro pari a 17 mm.



Figura 21. Classe 5/17 (a), 3/8 (b), 0/5 (c), *filler* (d), RAP 0/6 (e)

3.2.1.1 Densità delle particelle – metodo dei picnometri

La densità delle particelle (in questo caso chiamata anche *Massima Massa Volumica Teorica*) è una proprietà calcolata come rapporto tra massa e volume dove il volume è determinato dalla massa d'acqua dopo un certo periodo di immersione, secondo la norma europea EN 1097-6 Annex H.

Il metodo utilizzato nella normativa europea sopra citata per il calcolo della densità è il cosiddetto metodo dei picnometri che prevede i seguenti passaggi.

- 1) *Calibrazione dei picnometri.* È necessario ottenere i valori della massa e volume dei picnometri vuoti utilizzati per la prova. Essi sono degli strumenti in vetro costituiti da un recipiente di forma conica e un tappo dotato di capillare. Per la calibrazione, ogni picnometro viene pesato a vuoto ottenendo la prima massa in aria e, dopo esser stato riempito con acqua distillata e successivamente deaerata, viene pesato una seconda volta dopo essere stato riempito nuovamente con acqua distillata e deaerata fino a creare un menisco convesso alla fine del beccuccio di un tappo applicato in sommità (con una concavità verso il basso). Una volta ottenuto le masse, e attraverso il volume di acqua all'interno del picnometro, si ottiene il volume del picnometro stesso alla temperatura di prova.
- 2) *Preparazione dei campioni di prova.* Il test si effettua su due campioni dello stesso materiale per ottenere un valore medio rappresentativo. Prima della prova gli aggregati subiscono un processo di quartatura (siccome i materiali prelevati erano in quantità elevate in termini di peso) e, una volta ottenuto il quantitativo necessario, vengono essiccati per 12 ore in forno alla temperatura di 105 °C. Successivamente gli aggregati essiccati vengono suddivisi in due campioni di una quantità definita a seconda della dimensione massima degli aggregati, tenendo conto della norma.
- 3) *Pesatura dei picnometri in aria.* Si riempiono i picnometri con gli aggregati in esame e si pesano per acquisire la massa del picnometro più aggregati.
- 4) *Riempimento dei picnometri con acqua distillata e successiva deaerazione.* Si versa l'acqua distillata all'interno dei picnometri, lasciando 2-3 cm di differenza tra il pelo libero dell'acqua e il materiale. Tuttavia, poiché ciascuna classe di aggregati può contenere particelle molto fini, si è aspettato per circa 4 ore in modo tale che i vuoti tra le particelle venissero riempiti di acqua. Successivamente, si collegano i due picnometri, contenenti la classe di aggregati, ad un sistema di aspirazione di aria (o disaeratore), con lo scopo di rimuovere l'aria intrappolata tra particelle. Questo processo richiede almeno 30 minuti, durante i quali vengono fatti scuotere manualmente e leggermente i picnometri.



Figura 23. Sedimentazione degli aggregati



Figura 22. Deaerazione mediante disaeratore

- 5) *Pesatura in acqua.* Terminato il processo di deaerazione, si riempiono i picnometri con acqua distillata e disaerata fino all'estremità del beccuccio, come nello step 1. Infine, vengono pesati con la nuova massa del picnometro contenente aggregati ed acqua.
- 6) *Calcolo della densità delle particelle.* Si calcola la densità degli aggregati attraverso la seguente formula ottenuta dalla normativa di riferimento:

$$\rho_p = \frac{M_1}{V - \frac{M_2 - M_1 - M_0}{\rho_w}}$$

dove:

- M_1 è la massa del campione, in grammi (g);
- M_2 è la massa del picnometro, tappo, campione ed acqua, in grammi (g);
- M_0 è la massa del picnometro e tappo, in grammi (g);
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova quando M_2 è stato calcolato, in megagrammi per metro cubico (Mg/m^3);
- V è il volume del picnometro, in millilitri (ml) calcolato come:

$$V = \frac{M_3}{\rho_w}$$

con

- M_3 la massa dell'acqua all'interno del picnometro più tappo, in grammi (g);
- ρ_w la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in megagrammi per metro cubico (Mg/m^3).

Una volta ottenuti i due valori di densità per i due campioni, si effettua la media dei due risultati per ottenere un valore rappresentativo. Nella Tabella 24 vengono riportati i valori di densità ottenuti per gli aggregati e RAP utilizzati.

Classe Aggregato o RAP	Densità [Mg/m³]
5/17	2.772
3/8	2.789
0/5	2.726
Filler	2.771
RAP 0/6	2.552

Tabella 24. Valori di Densità di aggregati e RAP

3.2.1.2 Distribuzione granulometrica

La conoscenza della distribuzione granulometrica degli aggregati utilizzati è di fondamentale importanza per la progettazione delle miscele, dal momento che risulta essere importante conoscere la distribuzione delle dimensioni di particelle degli aggregati; alla fine del processo si ottiene la cosiddetta curva granulometrica, ovvero una curva che mostra la distribuzione delle particelle di diversa dimensione nella classe di aggregato.

Le norme EN 12697-2 ed EN 933-1 suggeriscono due processi: il lavaggio e la successiva setacciatura; oltre a esse si fa riferimento, per la presente Tesi, ai fusi granulometrici da rispettare e descritti nel capitolato ANAS in cui vengono mostrati i limiti superiore e inferiore di passante progressivo in percentuale da rispettare alle varie aperture dei setacci utilizzati.

Apertura setacci UNI	Passante totale in peso %
Setaccio 16	100
Setaccio 12.5	90-100
Setaccio 8	70-88
Setaccio 4	40-58
Setaccio 2	25-38
Setaccio 0.5	10-20
Setaccio 0.25	8-16
Setaccio 0.063	6-10

Tabella 25. Valori limite della curva granulometrica per lo strato di Usura

Dopo che i vari aggregati hanno subito un processo di quartatura per ottenere un campione rappresentativo, essi sono stati sottoposti a due operazioni.

- 1) *Lavaggio*. Il campione da setacciare viene prima pesato in aria per conoscere a posteriori il quantitativo di filler presente nel campione stesso, e poi si procede con il lavaggio dello stesso. Si preparano due setacci di apertura delle maglie differente, con il setaccio da 2 mm posto al di sopra di uno da 0.063 mm e si procede al lavaggio manuale dell'aggregato, posizionando quest'ultimo sul setaccio superiore; il lavaggio dell'aggregato verrà effettuato fino a quando l'acqua passante dal setaccio inferiore non diventerà limpida, per eliminare il filler presente. Alla fine, si porta il trattenuto ad essiccare in forno a 105 °C per 12 ore.



Figura 24. Lavaggio degli aggregati

- 2) **Setacciatura.** Gli aggregati asciutti vengono vagliati per mezzo di setacci posizionati uno sopra l'altro formando una pila con maglie decrescenti dall'alto verso il basso. Dopo aver versato il materiale sul setaccio posto in sommità, si passa alla setacciatura meccanica per almeno 20 minuti attraverso un setacciatore che, grazie alle vibrazioni e ai movimenti trasmessi ai setacci, favorisce il completo passaggio delle particelle. Al termine della procedura, si rimuove ciascun setaccio dalla pila pesandolo su una bilancia, compreso il piatto inferiore che tiene il filler, e da ciò è possibile tracciare la curva granulometrica su scala semi-logaritmica riportando i valori di percentuale di passante progressivo, ottenuto tramite il peso del trattenuto, in funzione del logaritmo dell'apertura dei vagli.



Figura 25. Pila di setacci su setacciatore meccanico



Figura 26. Trattenuto post-setacciatura ai setacci 12.5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva con tutte le percentuali di passante progressivo ai vari setacci per le varie classi granulometriche, e tutte le curve granulometriche degli aggregati.

Setaccio	Passante progressivo [%]					
	5/17	3/8	0/5	Filler	RAP 0/6 black	RAP 0/6 white
32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12.5	88.73	99.94	100.00	100.00	100.00	100.00
8	26.45	94.13	100.00	100.00	98.87	99.20
4	1.62	10.86	94.37	100.00	59.90	68.53
2	1.24	3.04	77.80	99.86	34.76	46.66
0.5	0.97	1.14	34.98	99.30	8.27	24.73
0.25	0.85	0.93	17.21	98.08	3.27	18.46
0.063	0.61	0.74	3.85	85.00	0.50	10.47
Pan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 26. Valori passante progressivo aggregati e RAP

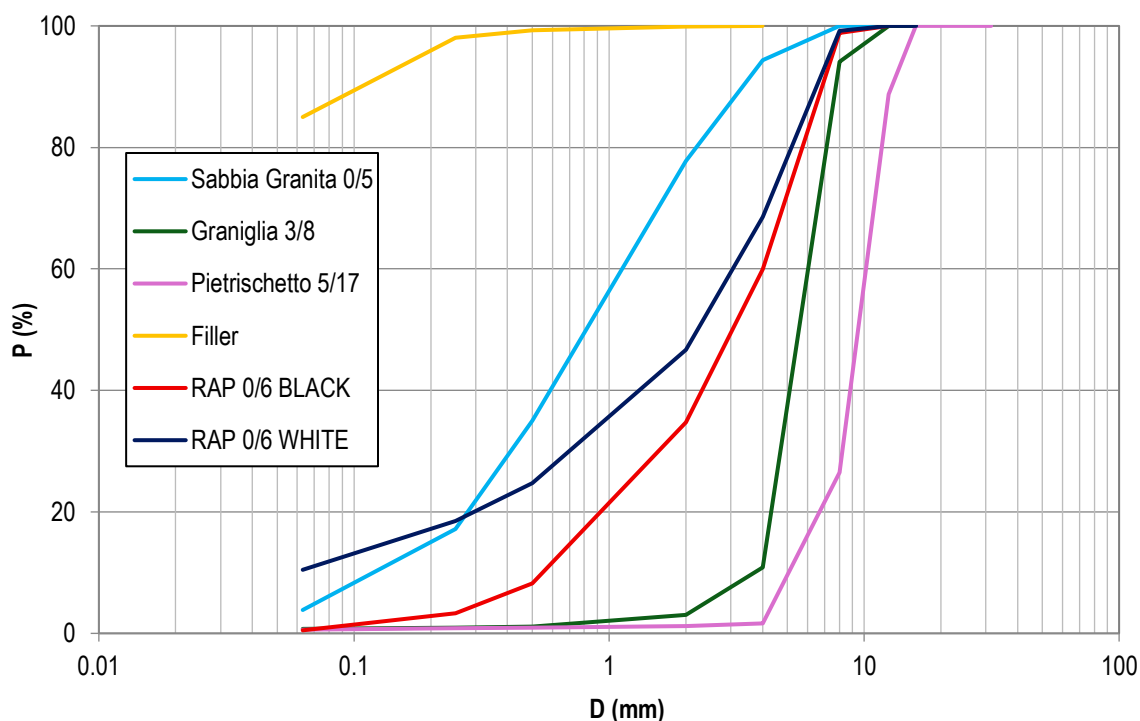


Figura 27. Curve granulometriche aggregati e RAP

In questo ultimo grafico ci sono due curve riferite a RAP 0/6 facenti riferimento a due situazioni diverse, evidenziate dalla presenza delle parole *BLACK* e *WHITE*; la differenza tra i due casi risiede nel fatto che la prima distribuzione granulometrica è stata ottenuta mediante setacciatura del fresato allo stato "puro", ovvero il materiale è stato semplicemente lavato, essiccato e setacciato, mentre la seconda curva fa riferimento a un fresato a cui è stata sottratta la componente di bitume. Questa operazione di rimozione del legante è stata compiuta mediante l'utilizzo di un

macchinario che, inserendo il materiale al suo interno a una temperatura di 540°C, permette di rimuovere il bitume; una volta rimosso, il materiale ottenuto è stato poi lavato, essiccato e vagliato.

3.2.2 Plastiche da rifiuto

Come riportato all'inizio del capitolo, in questa Tesi si analizzeranno i comportamenti di conglomerati bituminosi realizzati per lo strato di Usura, i quali presenteranno al loro interno due tipologie di plastiche da rifiuto chiamate *MEG* e *Redpol*, le cui caratteristiche sono riportate di seguito:

- le plastiche MEG sono formate essenzialmente da polietilene HDPE e LDPE e rappresentano le plastiche ottenute da raccolta differenziata dei rifiuti urbani;
- le plastiche Redpol sono formate da polipropilene PP, poliammide ed elastomero in proporzione, rispettivamente, 72%-17%-11% e rappresentano il rifiuto delle plastiche ottenute dal settore automobilistico.

Si vuole specificare che, d'ora in poi, all'interno del lavoro di Tesi, come già mostrato nella spiegazione della codifica delle miscele realizzate in laboratorio e analizzate, si indicheranno con la lettera "M" le plastiche MEG, mentre con la lettera "R" si indicheranno le plastiche Redpol.

È possibile osservare che nelle due tipologie di plastiche sono presenti il polietilene (in M) e il polipropilene (in R), i quali sono polimeri che fanno parte del gruppo delle *poliolefine*, ovvero una classe di macromolecole composte da monomeri di olefine (detti anche alcheni, basati sulla struttura C_nH_{2n}) derivate dalla polimerizzazione di petrolio o gas naturale. Le poliolefine sono una famiglia di materie plastiche che si distingue per l'elevata resistenza agli agenti chimici e per l'elevata versatilità, dovuta alla possibilità di controllare durante il processo di polimerizzazione, ad esempio, il grado di cristallinità dei composti (che può variare dallo 0 al 60%), con conseguente adattabilità al tipo di proprietà meccaniche richieste dal processo di lavorazione e dall'utilizzo finale richiesti [15].

Oltre a polipropilene (PP) e polietilene (PE), che può essere suddiviso in polietilene ad alta densità HDPE e polietilene a bassa densità LDPE, un'altra tipologia di plastica facente parte del gruppo delle poliolefine è il *poliisobutilene* (PIB), ed essi sono largamente utilizzati per la realizzazione di prodotti in plastica o gomma presenti nella vita quotidiana.

La poliammide (PA), invece, è una famiglia di polimeri sintetici resistenti, elastici e durevoli, derivati dal petrolio, usati in campo tessile e ingegneristico. Essa dispone di elevata resistenza meccanica e all'usura, buona elasticità e resistenza ai solventi organici. La poliammide viene particolarmente usata nei capi d'abbigliamento, componenti automobilistici, dispositivi di sicurezza e parti meccaniche [48].

L'elastomero è un polimero (presente nella plastica R) allo stato gommoso nel quale sono presenti legami, deboli o forti, che ne rafforzano la struttura, esaltandone le prestazioni meccaniche. Esso può essere di due tipologie: termoplastico, ovvero un copolimero di stirene e butadiene, poliolefine e co-poliesteri e ha la capacità di poter essere rimodellato se si raggiunge la temperatura di transizione vetrosa, oppure termoindurente, ottenuto legando le catene di polimero attraverso l'uso di reattivi chimici, temperatura e

pressione in un processo generalmente chiamato vulcanizzazione, conferendo proprietà termoindurenti [49].



Figura 28. Plastiche M



Figura 29. Plastiche R

Queste tipologie di plastiche, prima di essere inserite all'interno delle miscele, sono state sottoposte ad alcune prove per capire il loro comportamento e le loro proprietà.

3.2.2.1 Distribuzione granulometrica

Le due plastiche sono state sottoposte a setacciatura per ottenere le due distribuzioni granulometriche e capire le dimensioni delle particelle.

Sono stati presi due lotti di peso, rispettivamente, pari a 550 g (M) e 590 g (R) e sono stati sottoposti a setacciatura esattamente come spiegato al paragrafo 3.2.1.2. Di seguito vengono riportate la tabella con le percentuali di passante progressivo delle due plastiche e le due curve granulometriche ottenute.

Setaccio	Passante progressivo [%]	Setaccio	Passante progressivo [%]
	M		R
16	100.00	16	100.00
12.5	99.76	12.5	100.00
10	95.72	10	100.00
8	81.47	8	100.00
6.3	56.64	6.3	99.98
4	16.88	4	96.39
2	2.72	2	50.27
1	0.36	0.5	17.77
0.5	0.07	0.25	15.98
Pan	0.00	0.063	15.38
		Pan	0.00

Tabella 27. Valori di passante progressivo plastiche M e R

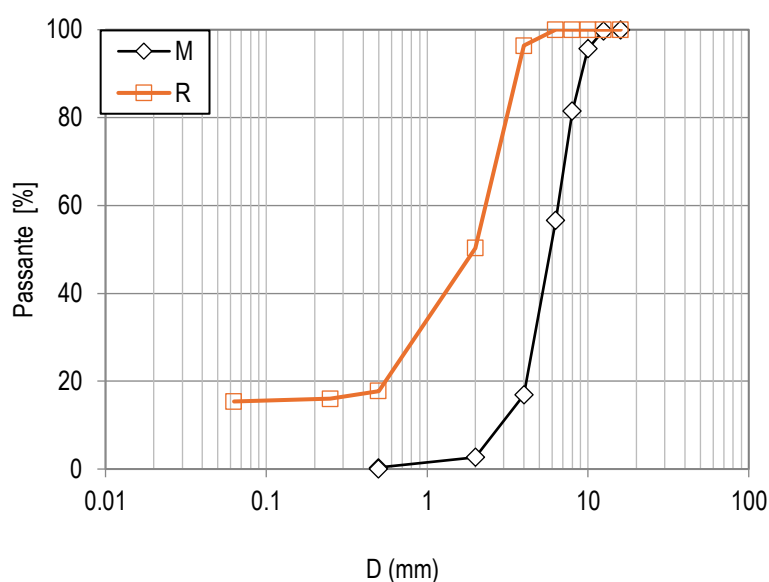


Figura 30. Curve granulometriche plastiche M e R

Dal grafico si può notare come il campione R risulti essere molto più fine rispetto al campione M, ovvero presenta particelle con dimensioni minori rispetto a M (aspetto che si può cogliere osservando la Figura 28 e la Figura 29).

3.2.2.2 Valutazione qualitativa delle capacità leganti

Al fine di valutare il comportamento delle plastiche da un punto di vista qualitativo, è stata adottata una procedura di tempo empirico mediante l'applicazione di due prove sulle plastiche M e R.

La prima prova consiste nell'analisi del comportamento delle plastiche alle alte temperature eseguendo una prova di rammollimento a temperature crescenti (200 °C, 225 °C, 250 °C). Per i due campioni di M e R non sono state prelevate quantità precise in massa, ma sono stati scelti

alcuni elementi dotati di certe dimensioni su cui fosse possibile visualizzare con più facilità l'effetto della temperatura sul loro comportamento; una volta selezionati, essi sono stati posizionati su un piatto di acciaio e hanno subito un processo di trattamento termico alle temperature precedentemente citate per un periodo pari a 30 minuti dal momento in cui il forno raggiungeva la temperatura prefissata. Una volta passati i 30 minuti, il piatto con il materiale polimerico è stato prelevato e, mediante un pestello, si è proceduto a valutarne la risposta allo schiacciamento.

Per quanto riguarda M, si sono osservate le seguenti prestazioni.

- *Trattamento a 200°C*: assenza significativa di variazioni di forma e dimensione. Allo schiacciamento i campioni si presentano duri e poco deformabili (rimangono tutti inerti).
- *Trattamento a 225°C*: 11 elementi su 39 non mostrano alcuna deformazione sotto carico (inerti), 18 elementi su 39 evidenziano deformazione elastica, 10 elementi su 39 presentano recupero parziale della deformazione rimosso il carico (rammolliscono).
- *Trattamento a 250°C*: 4 elementi su 39 non mostrano alcuna deformazione sotto carico (inerti), 12 elementi su 39 evidenziano deformazione elastica, 19 elementi su 39 presentano un recupero parziale della deformazione rimosso il carico (rammolliscono), 4 elementi su 39 si disintegrano.

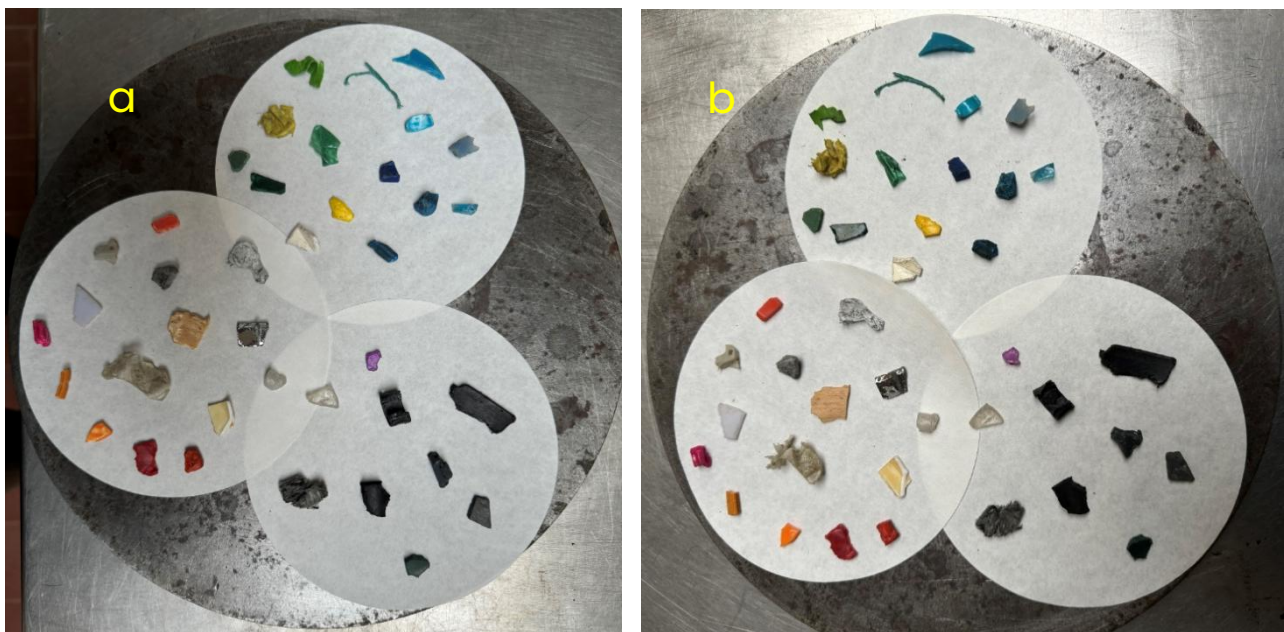


Figura 31. Trattamento termico M a 200°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)



Figura 33. Trattamento termico M a 225°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)

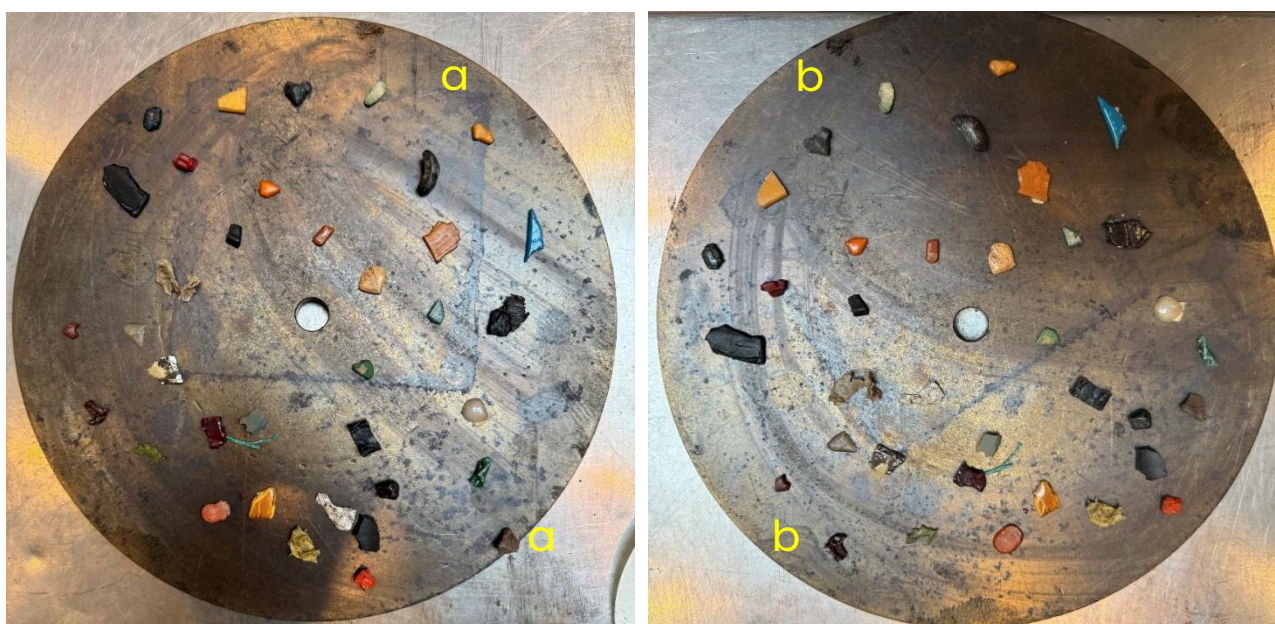


Figura 32. Trattamento termico M a 250°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)

Per quanto riguarda R, sono stati osservati i seguenti risultati.

- *Trattamento a 200°C*: 6 elementi su 23 non mostrano alcuna deformazione sotto carico (inerti), 6 elementi su 23 evidenziano deformazione elastica, 11 elementi su 23 presentano recupero parziale della deformazione rimosso il carico (rammolliscono).
- *Trattamento a 225°C*: 6 elementi su 23 non mostrano alcuna deformazione sotto carico (inerti), 4 elementi su 23 evidenziano deformazione elastica, 12 elementi su 23 presentano recupero parziale della deformazione rimosso il carico (rammolliscono), 1 elemento su 23 si disintegra.
- *Trattamento a 250°C*: 4 elementi su 23 non mostrano alcuna deformazione sotto carico (inerti), 4 elementi su 23 evidenziano deformazione elastica, 13 elementi su 23 presentano

recupero parziale della deformazione rimosso il carico (rammolliscono), 2 elementi su 23 si disintegrano.

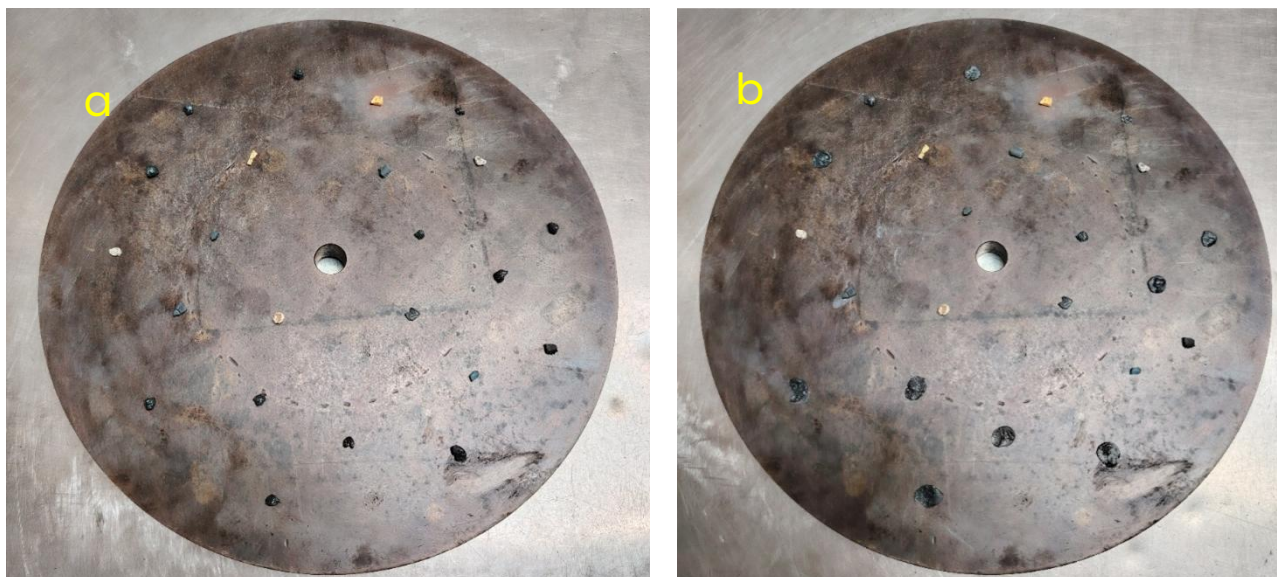


Figura 34. Trattamento termico R a 200°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)

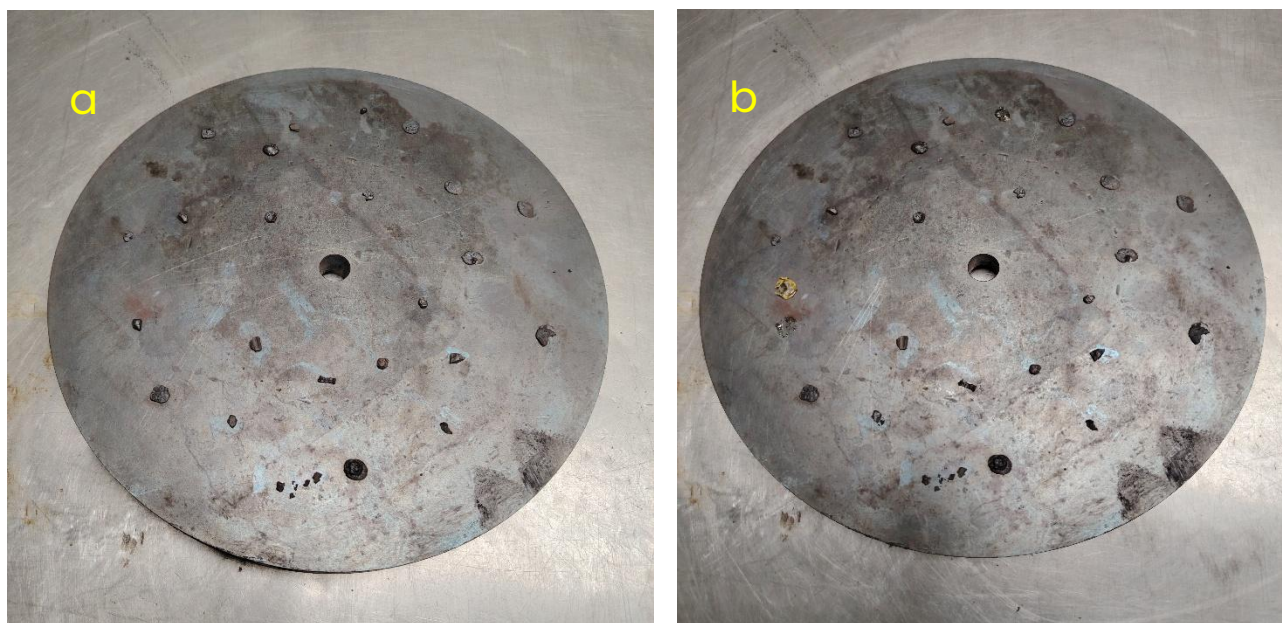


Figura 35. Trattamento termico R a 225°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)



Figura 36. Trattamento termico R a 250°C pre-schiacciamento (a) e post-schiacciamento (b)

Dopo aver analizzato qualitativamente il comportamento di M e R alle alte temperature, si è deciso di miscelare i due materiali plastici insieme ad aggregato di classe 16/20 a una temperatura pari a 200°C con l'obiettivo di capire l'interazione alle alte temperature tra plastiche e materiali inerti.

Dopo aver analizzato qualitativamente il comportamento di M e R alle alte temperature, si è deciso di miscelare i due materiali plastici insieme ad aggregato di classe 16/20 a una temperatura pari a 200°C con l'obiettivo di capire l'interazione alle alte temperature tra plastiche e materiali inerti.

Ambedue i materiali polimerici sono stati prelevati in quantità pari a 100 g, sono stati inseriti all'interno di un miscelatore manuale e sono stati mescolati insieme a 500 g di aggregato precedentemente riscaldato a una temperatura di 230 °C.

Dall'analisi dell'interazione delle due plastiche con gli aggregati si possono trarre le seguenti considerazioni:

- per quanto concerne M, alcune frazioni del polimero fondono e coprono la superficie degli aggregati conferendo una relativa coesione tra gli stessi, mentre una parte della frazione fusa ingloba e agglomera le plastiche inerti che dunque si comportano da aggregato;
- per quanto riguarda R, si osserva un ricoprimento superficiale uniforme degli aggregati a seguito della fusione del polimero e la presenza di cluster polimerici.

Da questa analisi si può dedurre come l'azione legante del campione R tra aggregati lapidei sia più resistente rispetto a M, molto probabilmente dovuto a una granulometria più fine che facilita la fusione della plastica e il ricoprimento e unione degli aggregati.



Figura 38. Miscelazione M con aggregato



Figura 37. Miscelazione R con aggregato

3.2.3 Bitume 70/100 e rejuvenator

La componente fondamentale per il conglomerato bituminoso è il bitume, una sostanza viscosa e derivante dal petrolio grezzo che viene utilizzata come legante per tenere uniti aggregati di diversi tipi e dimensioni, creando la miscela per le pavimentazioni stradali.

Nello studio condotto in questa tesi, è stato utilizzato il bitume *tal quale* 70/100 ricavato direttamente dallo stabilimento; il termine "*tal quale*" si riferisce al bitume estratto dal petrolio greggio e utilizzato così com'è nella sua forma base, non modificato o additivato, senza aggiunte di polimeri o altri additivi per migliorarne le prestazioni. 70/100 indica il grado di penetrazione del bitume, una misura della consistenza, ossia la profondità in decimi di millimetro (dmm) a cui un ago standard (100 g) penetra verticalmente nel bitume a una specifica temperatura (25°C) per un certo intervallo di tempo (5 secondi).

Nella tabella sottostante sono riportate alcune proprietà del bitume.

Bitume 70/100	
Penetrazione (25°C)	96 dmm
Prova palla e anello	49.3°C

Tabella 28. Proprietà del bitume 70/100



Figura 39. Contenitore con bitume 70/100

Oltre a esso, un altro materiale utilizzato per la realizzazione delle miscele è il cosiddetto “rejuvenator”, un agente ringiovanente inserito nel RAP in grado di restaurare le proprietà originali dei bitumi invecchiati all’interno dello stesso. Nella tabella sottostante sono riportate le proprietà principali di questo agente ringiovanente.

PARAMETRI	STD TECNICI	UNITA'	DATI
Densità, 15°C	DIN 51757	Kg/m ³	870 - 880
Acqua	DIN 51777:2014 - 10	% Gew.	0,20 - 0,40
Flashpoint, PM	DIN EN ISO 2592	°C	> 150
PCB, totale	DIN EN 15308 - 2008 - 5	mg/kg	n.n. *)
Viscosità Cinemat.a 40°C	DIN 51562	mm ² /s	60 ± 10
Viscosità Cinemat.a 100°C	DIN 51562	mm ² /s	8 ± 2
Indice Viscosità	DIN ISO 2909	-	> 120
Sedimenti	DIN ISO 10307 - 1 :2009-2	% Gew.	0,1
Puorpoint	EN 20065	°C	< -25
Apparenza			Liquido
Colore			Nero - Bruno
Miscela di oli nuovi di varia natura		%	99
Altre Sostanze		%	> 1%

Tabella 29. Proprietà del rejuvenator

Entrando più nello specifico, il rejuvenator utilizzato è una miscela composta di oli nuovi ed altre sostanze non nocive (0÷2%); normalmente utilizzato in forma liquida in misura dell'0.2% sul peso del RAP.

Questo materiale, inserito nel fresato, può agire come antiossidante (permette di ridurre notevolmente l'aumento dell'ossidazione del legante), riduttore del consumo energetico (permette in fase di riscaldamento degli inerti una riduzione di temperatura di circa 20/30°C, determinando un importante recupero energetico), rigenerante (aumenta la morbidezza del bitume ossidato presente nel materiale riciclato e consente un utilizzo maggiore di materiale), fluidificante (maggiore scorrevolezza ad alte temperature e migliore lavorabilità in fase di stesura), conservatore della temperatura, ecologico ambientale (permette di ridurre in

atmosfera le emissioni di sostanze nocive contenute nel bitume) e additivo abbattitore di odori [51].

3.3 Confezionamento delle miscele e prove di laboratorio

Dopo aver stabilito le caratteristiche e le proprietà dei materiali, si è passati alla preparazione del conglomerato bituminoso e delle sue componenti; ciò è necessario per ottenere le miscele desiderate con la presenza delle plastiche M e R e le miscele senza materiale polimerico, le quali rappresentano una sorta di materiale di riferimento.

Per la realizzazione delle miscele in laboratorio, la procedura seguita risulta essere molto simile a quella proposta nello studio condotto da La Macchia, J.N.; Baglieri, O.; Dalmazzo, D.; Santagata, E. *"Engineering Properties of Road Paving Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt and Recycled Waste Plastics"* [26], in cui si studiano le proprietà ingegneristiche di miscele con alto contenuto di RAP e presenza di plastiche da riciclo.

In particolar modo, la procedura adottata in laboratorio prevede le seguenti fasi:

1. inserimento degli aggregati riscaldati a 230°C per 2 ore, miscelazione di 30 secondi;
2. inserimento plastiche a 65°C, miscelazione di 120 secondi;
3. inserimento RAP+rejuvenator a 65°C, miscelazione fino al raggiungimento della temperatura di equilibrio pari a 165°C;
4. inserimento 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
5. inserimento 1/2 del filler, miscelazione di 30 secondi;
6. inserimento 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
7. inserimento 1/2 del filler, miscelazione di 30 secondi;
8. inserimento 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
9. miscelazione ad alta velocità per 60 secondi;
10. riposo della miscela per 60 secondi;
11. miscelazione a velocità standard per 60 secondi per simulare l'azione dei rulli compattatori.

Il procedimento adottato ha come scopo quello di simulare ciò che avviene in stabilimento, per cercare di ottenere miscele che più si avvicinano a quella realizzate in un impianto di produzione di conglomerati bituminosi; nella Figura 40 è riportato uno schema di un impianto di produzione asfalti.



Figura 40. Miscelatore in impianto

Il procedimento adottato per la miscelazione manuale e meccanica prevede anche una serie di passaggi preliminari adottati prima della miscelazione.

- Gli aggregati vengono preriscaldati a 110°C per 12 ore e, successivamente, vengono riscaldati per 2 ore prima di essere miscelati; il preriscaldamento serve per eliminare l'umidità negli inerti e non influenzare la miscelazione.
- Le plastiche da riciclo, sia M che R, vengono inserite con metodo dry, cioè aggiunte direttamente negli aggregati.
- Il RAP viene preriscaldato a 65°C per 1,5 ore e viene distribuito su vassoi sufficientemente ampi per massimizzare l'esposizione all'agente ringiovanente, il quale viene spruzzato utilizzando un flacone spray direttamente sul RAP durante la fase di riscaldamento 20 minuti prima della miscelazione, in modo tale da permettere all'agente di agire sul fresato.
- Lo shock termico causato dal contatto tra l'aggregato, RAP e plastica permette di raggiungere la temperatura di miscelazione desiderata, fissata a 165°C.
- Il bitume e il filler vengono riscaldati a 165°C per 1.5 ore.

Nella Figura 41 è riportato uno schema della procedura adottata in laboratorio, sia con miscelazione manuale che meccanica.

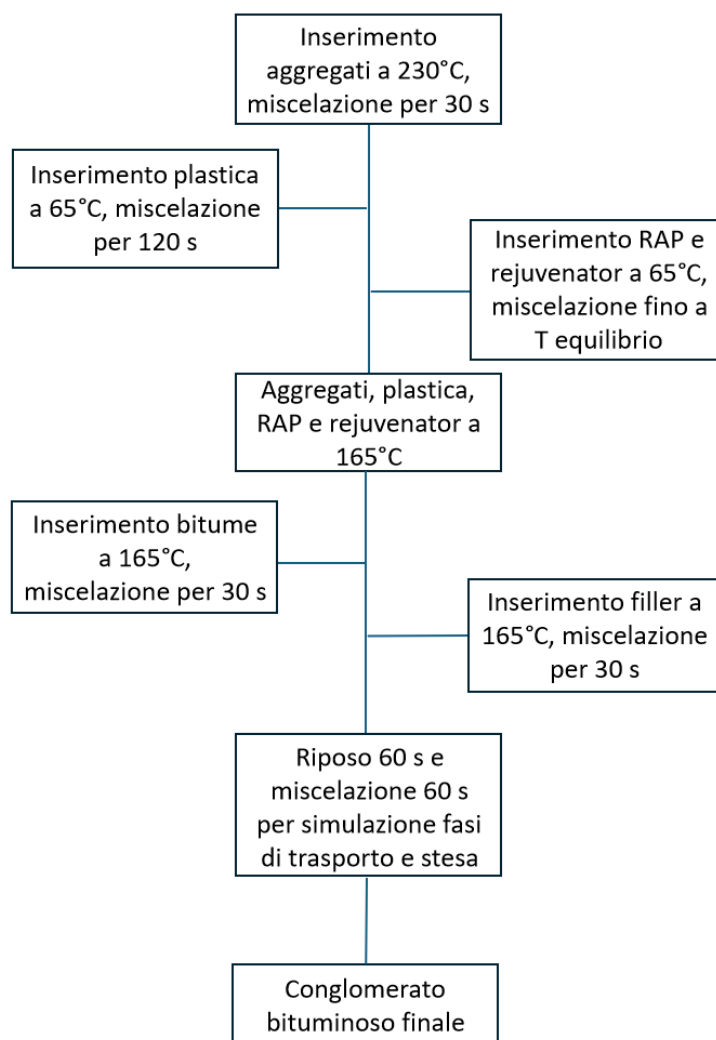


Figura 41. Schema della procedura adottata per la miscelazione manuale e meccanica

È importante osservare come, escludendo il caso di UL.0_5.06-1 e UL.0_5.60-1, tutte le altre miscele sono state realizzate mediante miscelazione manuale in un miscelatore che ha previsto la preparazione di 5 kg di miscela per volta. La scelta adottata di utilizzare un miscelatore manuale è stata dettata dal fatto che, dato il numero consistente di conglomerati bituminosi da preparare, la miscelazione manuale ha permesso di ottenere risultati nel più breve tempo possibile, a discapito di un numero ridotto di campioni realizzati che, invece, con un miscelatore di laboratorio, sarebbe stato più elevato. L'utilizzo di quest'ultimo, però, avrebbe allungato i tempi di ottenimento dei risultati relativi a caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Si entra ora nello specifico nelle varie operazioni svolte per la realizzazione delle miscele e determinazione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche.

3.3.1 Preparazione materiale e miscelazione in laboratorio

Il primo step per il confezionamento delle miscele consiste nella preparazione del materiale necessario alla realizzazione della miscela, per cui le varie classi di aggregati e RAP, bitume, plastica e rejuvenator.

Si procede alla miscelazione, mediante l'utilizzo di un miscelatore manuale o meccanico, alla temperatura prestabilita secondo la norma BS EN 12697-35; come già raccontato all'inizio del paragrafo nella spiegazione della procedura adottata, si riscaldano dapprima i vari materiali in forno alle varie temperature adottate e poi vengono mescolati con inserimento graduale degli stessi all'interno del miscelatore.

Alla fine dell'operazione si è ottenuta la miscela progettata.



Figura 42. Miscelazione manuale di aggregati+RAP+plastica (sx) e del conglomerato finale (dx)



Figura 44. Miscelatore meccanico



Figura 43. Miscelatore in impianto

3.3.2 Determinazione della Massima Massa Volumica Teorica

Dalla miscela ottenuta viene prelevata una certa quantità di materiale che viene usata per il calcolo della *Massima Massa Volumica Teorica* (MMVT, o TMD in inglese – *Theoretical Maximum Density*). Essa è una grandezza intrinseca della miscela e rappresenta la densità massima della miscela in assenza di vuoti, cioè nella condizione in cui si ha l'addensamento limite; dal punto di vista fisico è impossibile raggiungere tale condizione e questo è il motivo per cui tale grandezza viene chiamata "teorica".

La norma di riferimento utilizzata è la BS EN 12697-5 con il metodo volumetrico o metodo dei picnometri, procedura che era stata già utilizzata sugli aggregati nel paragrafo 3.2.1.1 "*Densità delle particelle – metodo dei picnometri*" ad eccezione i punti 2, 4 e 6.

- Il materiale utilizzato non è più formato da aggregati, ma da conglomerato bituminoso. Seguendo la normativa EN 12697-28, il campione, prelevato di una quantità definita dalla normativa dipendente dalla dimensione massima di aggregati, viene prima riscaldato almeno alla temperatura di 100-110°C, non comunque superiore a quella massima dalla norma, per renderlo più lavorabile, e successivamente disperso su un piano d'appoggio pulito, privo di residui di bitume, per separare manualmente particelle grossolane da quelle fini. Una volta effettuata la sgranatura del conglomerato, si esegue la quartatura di particelle separate e raffreddate e si versano i due campioni dimezzati nei picnometri e si passa alla pesatura in aria.
- Dal momento che si sta lavorando con sono miscele bituminose, si trascura l'attesa di 4 ore dovuta alla sedimentazione delle particelle fini degli aggregati e si procede direttamente a deaerare la miscela tramite il disaeratore.
- La MMVT è calcolata attraverso la formula dalla norma EN 12697-5:

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

dove:

- ρ_{mv} è la MMVT calcolata con metodo volumetrico, in megagrammi per metro cubico (Mg/m³);
- m_1 è la massa del picnometro e tappo, in grammi (g);
- m_2 è la massa del picnometro, tappo e campione, in grammi (g);
- m_3 è la massa del picnometro, tappo, campione ed acqua, in grammi (g);
- V_p è il volume del picnometro calibrato in metri cubi (m³);
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in Mg/m³, calcolata come:

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \cdot t - 5.32 \cdot t^2}{10^6} \right)$$

con t che rappresenta la temperatura dell'acqua in °C.

La MMVT del conglomerato bituminoso sarà data dalla media dei due valori di densità ottenuti.



Figura 45. Quartatura del conglomerato bituminoso



Figura 46. Deaerazione del conglomerato bituminoso

3.3.3 Determinazione del Contenuto di Bitume tramite Ignizione

Un altro aspetto importante riguardante la composizione del conglomerato bituminoso è il contenuto di bitume che influenza le caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela, ed è possibile determinarlo grazie al processo di ignizione, spiegato dalla normativa BS EN 12697-39.

Tale procedimento consiste nell'eliminare il bitume dallo scheletro litico della miscela inserendo il conglomerato all'interno di un apposito forno, detto *Carbolite*, alla temperatura di 540°C, secondo lo standard.

Il processo di ignizione prevede i seguenti passaggi.

1. *Preparazione del materiale.* Si preriscalda il forno Carbolite alla temperatura di prova pari a 540°C e si riscalda il campione, la cui quantità rispetti i limiti dalla normativa in funzione della dimensione massima nominale dell'aggregato, a 100-110°C per un'ideale lavorabilità.

2. *Pesatura.* Si pesa il cestello vuoto in metallo, adatto al forno, su una bilancia e, dopo aver posizionato il campione in modo omogeneo sui due piani del cestello, si pesa nuovamente il cestello pieno, per cui si misura prima la tara e poi il peso lordo.
3. *Ignizione.* Il cestello viene posto all'interno del forno e si inizia il processo di combustione della miscela con conseguente perdita di massa. Per mezzo di una bilancia presente nella Carbolite, si registrerà la perdita in massa che sta subendo il materiale; il processo terminerà quando non si registra più una variazione.
4. *Misura del contenuto di bitume.* Una volta terminata la prova, si estrae il cestello con soli aggregati dal forno e si lascia raffreddare a temperatura ambiente; una volta raffreddatosi, lo si pesa e si procede al calcolo della percentuale di bitume, sia rispetto alla miscela che rispetto agli aggregati, mediante l'utilizzo delle seguenti formule:

$$B_{mix} = \frac{m_{mix} - m_{agg}}{m_{mix}} \cdot 100$$

$$B_{agg} = \frac{m_{mix} - m_{agg}}{m_{agg}} \cdot 100$$

dove:

- B_{mix} è il contenuto di bitume rispetto alla miscela, in %;
- B_{agg} è il contenuto di bitume rispetto agli aggregati, in %;
- m_{mix} è la massa della miscela prima dell'ignizione, in g;
- m_{agg} è la massa degli aggregati dopo l'ignizione, in g.

Questa prova serve anche per capire l'influenza del materiale polimerico all'interno del conglomerato, in particolar modo per capire se esso fonde realmente e agisce come fase legante all'interno della miscela.



Figura 47. Carbolite utilizzata per il processo di ignizione



Figura 48. Conglomerato nel cestello prima del processo di ignizione



Figura 49. Materiale post processo di ignizione

3.3.4 Curva granulometrica

Dopo il processo di ignizione, è importante ottenere la distribuzione granulometrica dello scheletro litico. Il procedimento utilizzato è lo stesso che si è visto nel paragrafo 3.2.1.2, con l'aggiunta di un passaggio iniziale.

- *Pulizia degli aggregati post-ignizione.* Dopo aver effettuato la prova di ignizione per ottenere il contenuto di bitume della miscela, si rimuovono gli aggregati dal cestello facendo attenzione a non perdere nessuna particella e li si mettono su una teglia apposita prima di essere lavati.



Figura 50. Pulizia degli aggregati post-ignizione

A fine setacciatura, si disegna la curva granulometrica per vedere se si discosta o meno da quella di progetto. Questa operazione serve anche per capire un'eventuale influenza del materiale plastico sulla curva, nel caso in cui esso non dovesse fondere.

3.3.5 Realizzazione e compattazione dei provini mediante pressa taglio-giratoria

Dopo aver determinato la Massima Massa Volumica Teorica della miscela, si procede con la realizzazione dei provini e la loro successiva compattazione mediante l'utilizzo di un macchinario che prende il nome di pressa taglio-giratoria; tale macchina permette di conoscere la lavorabilità della miscela e il grado di compattazione, o di addensamento, a diversi giri.

La norma BS EN 12697-31 descrive la configurazione del macchinario e la tecnica utilizzata per la compattazione; il conglomerato bituminoso è inserito all'interno di una fustella cilindrica metallica mantenuta alla temperatura di prova costante, la quale dipende dalla tipologia di bitume ed è regolata dalla norma europea BS EN 12697-35.

Paving grade of bitumen	Reference compaction temperature for: °C	
	Mixtures of types other than mastic asphalt	Mastic asphalt mixtures
10/20 to 20/30	180	230
30/45	175	220
35/50	165	210
40/60	155	200
50/70	150	-
70/100	145	-
100/150	140	-
160/220	135	-

Tabella 30. Temperature di riferimento per la compattazione in funzione del bitume (BS EN 12697-35)

La compattazione è realizzata con due diversi movimenti che avvengono contemporaneamente: la bassa compressione statica e l'azione di taglio dovuto al movimento della fustella contenente il campione, che genera una superficie conica di rivoluzione, di apice 0 e di angolo pari a 2ϕ . Idealmente, le estremità del provino dovrebbero rimanere perpendicolari all'asse della superficie conica.

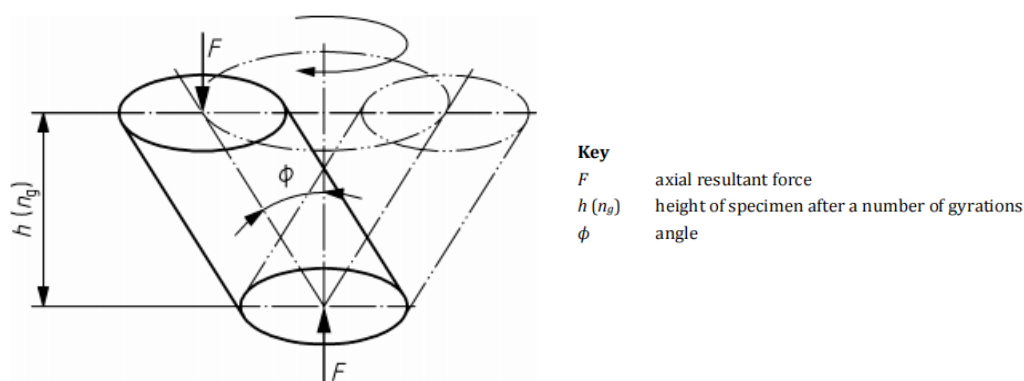


Figura 51. Movimento giratorio del campione (BS EN 12697-31)

La pressa in laboratorio presenta uno sforzo costante di compressione pari a 600 kPa, un angolo di inclinazione di 1.25° e una velocità di rotazione di 30 giri al minuto; durante il costipamento del materiale, le particelle si avvicinano e si ha una loro riorganizzazione all'interno del campione grazie all'azione combinata della compressione verticale e della forza tagliente.

Tramite un software collegato alla pressa taglio-giratoria, è possibile registrare le altezze di compattazione del provino al crescere del numero di giri, necessarie per costruire la curva di compattazione del campione. Inoltre, la compattazione può essere fatta secondo due modalità: per numero di giri o per altezza del campione; nello studio condotto in questa tesi si è deciso di compattare i provini per numero di giri (210 come da capitolato ANAS) per conoscere altresì la volumetria del campione.

Con questo macchinario sono stati realizzati provini dal diametro di 100 mm necessari per l'esecuzione di prove di resistenza a trazione indiretta (RTI).

Viene descritto in maniera dettagliata il processo di realizzazione e compattazione dei campioni di conglomerato bituminoso una volta che è stata preparata la miscela.

1. *Calcolo del quantitativo di materiale da inserire nella fustella.* È necessario conoscere la massa della miscela da inserire all'interno della fustella cilindrica, la quale viene calcolata mediante l'utilizzo della formula riportata nella norma BS EN 12697-31 (dry mixture):

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

dove:

- M è la massa della miscela da inserire nella fustella, in g.
 - D è il diametro interno della fustella, in mm.
 - h_{min} è l'altezza minima di costipamento del campione corrispondente a vuoti nulli, in mm.
 - ρ_M è la Massima Massa Volumica Teorica, in Mg/m^3 .
2. *Riscaldamento di fustelle e materiali.* Per la compattazione del materiale, è necessario che la fustella, all'interno della quale viene messo il materiale, si trovi a una temperatura

molto simile, se non uguale, a quella di compattazione pari a 145°C, per evitare brusche cadute di temperatura una volta che il materiale viene inserito al suo interno.

Per l'inserimento del materiale all'interno delle fustelle, quest'ultime vengono riscaldate in forno a una temperatura pari a 155°C (secondo la norma, la temperatura di riscaldamento deve essere pari a 145°C+10°C) per un periodo pari a 2 ore e, successivamente, si inserisce il conglomerato bituminoso, anch'esso riscaldato a 155°C, all'interno delle fustelle (previo inserimento di un foglio circolare di carta filtro tra piatto inferiore della fustella e materiale, per evitare che il materiale si incolli al piatto); in seguito si rimette tutto in forno a riscaldare (l'inserimento della miscela nella fustella avviene a temperatura ambiente, per cui vi è un calo di temperatura) fino al raggiungimento della temperatura di compattazione di 145°C.

3. *Compattazione*. Una volta raggiunta la temperatura di 145°C, si inserisce un secondo foglio di carta filtro, si inserisce il piatto superiore, il quale sarà a contatto con il pistone della pressa giratoria, e si inserisce la fustella all'interno della pressa taglio-giratoria con lubrificazione dei punti di contatto tra disco e pistone; una volta effettuate queste operazioni, si esegue la compattazione del materiale fino al raggiungimento del 210° giro.

A fine prova, si estrae il campione finale dalla fustella e lo si lascia raffreddare. Per conoscere l'altezza reale finale del provino si effettuano 4 misure su due diametri ortogonali tra loro facendo, alla fine, la media dei 4 valori ottenuti.



Figura 52. Preparazione fustelle in forno a 155°C



Figura 54. Pressa taglio-giratoria



Figura 53. Proveni di conglomerato bituminoso post-compattazione

Come già citato all'inizio del paragrafo, con i dati registrati dal software si costruiscono curve di compattazione su scala semi-logaritmica, riportando sull'asse delle ascisse il logaritmo del numero di giri e sull'asse delle ordinate il grado di costipamento. È fondamentale conoscere:

- V_x volume geometrico del campione, dato da:

$$V_x = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h(n_G)$$

con D diametro della fustella e $h(n_G)$ altezza di compattazione al giro n .

- C_{ux} grado di compattazione in cui non si considera l'effetto parete:

$$C_{ux} = \frac{MV_{geo}}{MMVT} \cdot 100 \quad \text{con} \quad MV_{geo} = \frac{M_{eff}}{V_x}$$

con MV_{geo} massa volumica geometrica del campione compattato, pari al rapporto tra massa effettiva del campione e il volume geometrico.

- c fattore correttivo, in quanto si hanno superfici irregolari del campione cilindrico che portano ad avere un volume reale minore di quello geometrico; questo fenomeno prende il nome di "effetto parete" dovuto alla non perfetta aderenza campione-fustella e se ne tiene conto mediante il calcolo del fattore correttivo:

$$c = \frac{\rho_{SSD}}{MV_{geo}}$$

con ρ_{SSD} che rappresenta la massa volumica reale, misurata dopo la compattazione e illustrata nel paragrafo successivo "Bulk Density".

- C_x grado di compattazione che considera l'effetto parete:

$$C_x = C_{ux} \cdot c$$

Avendo a disposizione tutti i dati, è possibile tracciare la retta che rappresenta la curva di compattazione del campione, la cui equazione è:

$$C_x(n_G) = C_1 + k \cdot \log(n_G)$$

dove:

- C_x rappresenta il grado di compattazione in funzione del numero di giri, in %;
- C_1 rappresenta l'autoaddensamento (valore dell'intercetta), pari al grado di compattazione registrato al primo giro, in %;
- k equivale alla pendenza della curva ed esprime una misura della lavorabilità;
- n_g rappresenta il numero di giri.

3.3.6 Bulk Density

La percentuale dei vuoti d'aria svolge un ruolo fondamentale nelle prestazioni di un conglomerato bituminoso, in quanto influenza le sue proprietà meccaniche. Questa percentuale viene determinata attraverso il calcolo della massa volumica del campione compattato regolato dalla norma BS EN 12697-6, che prevede l'utilizzo della procedura B: con il seguente metodo è possibile calcolare la massa volumica di un campione saturo a superficie asciutta (*Bulk Density, saturated surface dry – SSD*), caratterizzato da una superficie asciutta e con vuoti interni completamente riempiti dall'acqua.

La procedura da seguire per il calcolo della Bulk Density è costituita dai seguenti passaggi:

1. *Pesatura in aria.* Il campione, dopo esser stato compattato, raffreddato (generalmente si aspetta un giorno dalla compattazione) a temperatura ambiente e misurato per determinare l'altezza reale, viene pesato sulla bilancia.
2. *Immersione e pesatura in acqua.* Si mette il campione in una vasca di acqua per almeno 40 minuti in modo tale che l'acqua riempia gli interstizi tra le particelle, con scuotimento ogni 5/10 minuti per rimuovere le particelle d'aria poste sulla superficie e all'interno del materiale. Mediante l'utilizzo di una bilancia posta nella vasca di acqua, per mezzo del principio di Archimede si pesa il provino.
3. *Pesatura SSD.* Si rimuove il campione dalla vasca e si asciuga con un panno umido tutta la superficie e si pesa, ottenendo la massa del campione saturo a superficie asciutta (SSD).
4. *Misura temperatura.* A fine prova, si misura la temperatura dell'acqua presente nella vasca.



Figura 55. Campioni in acqua per successiva pesatura

La massa volumica, o Bulk Density, del campione cilindrico viene determinata con la seguente formula:

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

dove:

- m_1 è la massa del campione in aria, in g.
- m_2 è la massa del campione in acqua, in g.
- m_3 è la massa del campione saturo a superficie asciutta, in g.
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in Mg/m³.

Infine, è possibile calcolare il contenuto di vuoti reali a 210 giri, per dare una misura della compattazione finale:

$$v_{210} = \frac{MMVT - \rho_{SSD}}{MMVT} \cdot 100$$

e il contenuto di vuoti a n giri mediante l'utilizzo del grado di compattazione C_x : $v_x = 100 - C_x$.

3.3.7 Determinazione delle caratteristiche volumetriche

Dopo aver determinato il numero di vuoti d'aria, è possibile determinare altre due proprietà volumetriche quali *Voids in the Mineral Aggregate* (VMA) e *Voids Filled with Bitumen* (VFB), le quali rappresentano rispettivamente i Vuoti negli Aggregati Minerali e i Vuoti Riempiti dal Bitume. Per definizione, VMA rappresenta il volume di spazio vuoto intergranulare tra le particelle degli aggregati di una miscela bituminosa compattata che include i vuoti d'aria e il volume del bitume nel campione, mentre VFB esprime la percentuale dei vuoti nell'aggregato minerale riempiti con legante; la norma utilizzata per il calcolo dei due parametri è la BS EN 12697-8.

È importante precisare che nella normativa si fa riferimento a valori di VMA e VFB senza additivi e con additivi; dal momento che il materiale plastico inserito all'interno del conglomerato occupa una certa porzione di volume e dispone di densità e peso che non possono essere trascurati, sono state utilizzate le formule per il calcolo di VMA e VFB con materiale additivo.

Per la determinazione di VMA e VFB è necessario conoscere il contenuto di vuoti d'aria, calcolato a partire dalla MMVT del provino e dalla sua Bulk Density, mediante la seguente formula:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- V_a è il contenuto di vuoti d'aria del conglomerato bituminoso, in %;
- ρ_m è la Massima Massa Volumica Teorica della miscela, in Mg/m^3 ;
- ρ_b è la Bulk Density del campione compattato, in Mg/m^3 .

Una volta determinato il valore di V_a , è possibile calcolare VMA e VFB con additivo:

$$VMA_{ad} = V_a + \frac{B \cdot \rho_b}{\rho_B} + \sum_i \frac{P_{ad,i} \cdot \rho_b}{\rho_{ad,i}}$$
$$VFB_{ad} = \left(\frac{B \cdot \rho_b}{\rho_B} + \sum_i \frac{P_{ad,i} \cdot \rho_b}{\rho_{ad,i}} \right) \cdot \frac{100}{VMA_{ad}}$$

dove:

- B è il contenuto di bitume totale nella miscela, in %;
- ρ_b è la Bulk Density del campione compattato, in Mg/m^3 ;
- ρ_B è la densità del bitume, in Mg/m^3 ;
- $P_{ad,i}$ è la percentuale dell'additivo i-esimo nel campione, in % sulla miscela;
- $\rho_{ad,i}$ è la densità dell'additivo i-esimo, in Mg/m^3 ;
- V_a è il contenuto di vuoti d'aria del conglomerato bituminoso, in %.

Il valore finale di VMA e VFB sarà dato dal valore medio dei valori ottenuti per i provini.

3.3.8 Determinazione del Modulo di Rigidezza

Una volta determinate le caratteristiche volumetriche del conglomerato bituminoso, si procede con la determinazione delle proprietà meccaniche del materiale in esame partendo dal calcolo del *Modulo di Rigidezza*. La procedura seguita per la sua determinazione è quella riportata nella norma BS EN 12697-26 all'allegato C: trazione indiretta su campioni cilindrici (IT-CY).

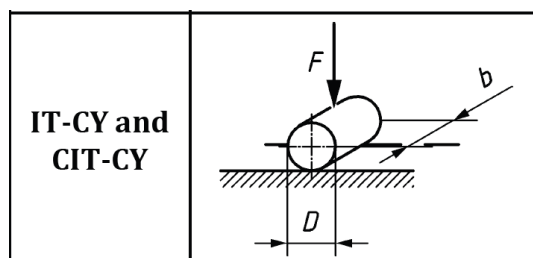


Figura 56. Configurazione di prova IT-CY e CIT-CY (BS EN 12697-26)

Il test prevede l'applicazione di uno sforzo verticale di compressione che determina degli spostamenti di trazione orizzontali (trazione indiretta), i quali vengono registrati da trasduttori differenziali variabili lineari (LVDT). Noto carico e spostamento si ricava il modulo di rigidezza. Nella figura successiva è possibile osservare l'equipaggiamento utilizzato per la realizzazione della prova, in cui sono rappresentati il pistone di carico, il telaio in acciaio, la cella di carico, le strisce di carico superiore e inferiore, il provino, i trasduttori e gli adattatori dei trasduttori.

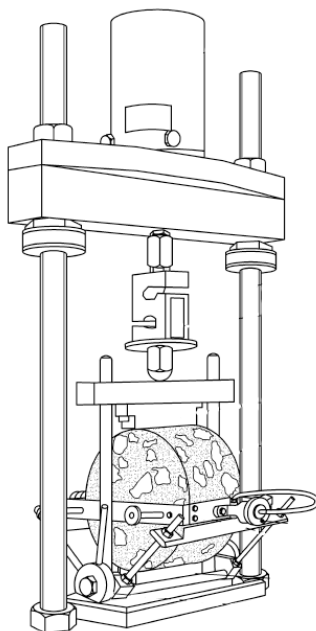


Figura 57. Equipaggiamento per prova IT-CY e CIT-CY (BS EN 12697-26)

Elevate rigidezze consentono una maggior resistenza all'ormaiamento, dal momento che vi è un minor accumulo di deformazioni permanenti, ma si rischia di avere un rischio maggiore per quanto riguarda le fessurazioni a basse temperature, a causa della formazione di importanti stati di coazione derivanti da spostamenti impediti.

I campioni da testare vengono messi in camera climatica per il condizionamento alla temperatura di prova pari a 25°C (essendo che il Capitolato ANAS riporta valori limite delle proprietà meccaniche con temperatura pari a 25°C) per un periodo almeno pari a 4h.

L'equipaggiamento della macchina consiste nell'avere un pistone idraulico, un attuatore di carico capace di applicare una forza verticale di tipo impulsiva con il tempo di riposo. Il carico ha come forma d'onda l'haversine.

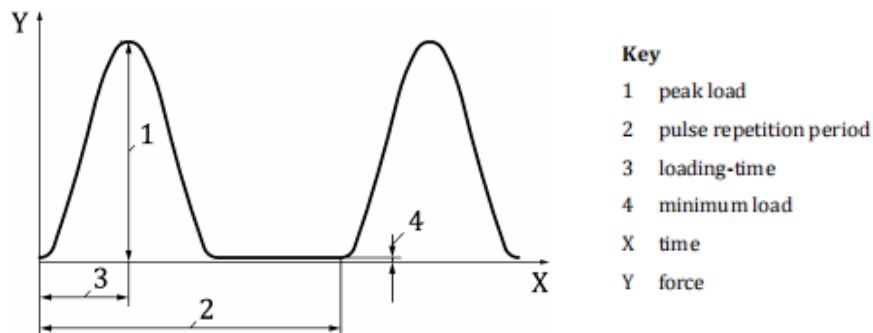


Figura 58. Esempio di curva Haversine (BS EN 12697-26)

Il tempo di carico da inizio test fino al raggiungimento del picco deve essere compreso tra 50 e 125 ms $\pm$ 5 ms; per la determinazione della prova, è necessario inserire alcuni dati di input come il carico, pari a 50 kN, le altezze del provino, la temperatura di prova, e la deformazione massima orizzontale, dipendente dalla temperatura, per campioni di 100 mm di diametro, nel nostro caso pari a 9.0 μ m.

Temperature	Recommended maximum horizontal deformation
°C	μ m
-5	2,5
10	5,0
15	6,5
20	7,5
25	9,0

Tabella 31. Deformazione massima orizzontale in funzione della temperatura di prova (BS EN 12697-26)

Per iniziare la prova, il campione viene inserito in un castelletto che impedisce il suo movimento durante l'esecuzione della prova, e successivamente si inserisce il tutto all'interno di una macchina di prova universale servo-idraulica che prende il nome di UTM-30.

Nel corso del test vengono applicati un minimo di 10 impulsi di condizionamento, per consentire alla macchina di regolare il carico richiesto per raggiungere la deformazione target e il tempo.; successivamente si applicano 5 impulsi e il modulo sarà determinato come media dei 5. Dopo aver determinato il primo valore di modulo elastico, si effettua la rotazione del campione di $90^\circ \pm 10^\circ$ intorno all'asse orizzontale del provino e si ripete il test, ottenendo il secondo valore di modulo di rigidezza; per verificare la bontà del risultato, è necessario che il secondo valore ottenuto rientri nell'intervallo tra +10% e -20% della prima media calcolata al primo test, altrimenti il provino verrà scartato.

Il modulo di rigidezza viene calcolato secondo la formula riportata nella normativa:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0.27)}{z \cdot h}$$

dove:

- E è il modulo di rigidezza, o modulo resiliente, in MPa;
- F è la forza applicata, in N;
- v è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0.35 per i conglomerati bituminosi;
- h è l'altezza media reale del provino (su 4 punti), in mm;
- z è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente ottenuto durante la fase di carico in mm.



Figura 60. Macchinario UTM-30

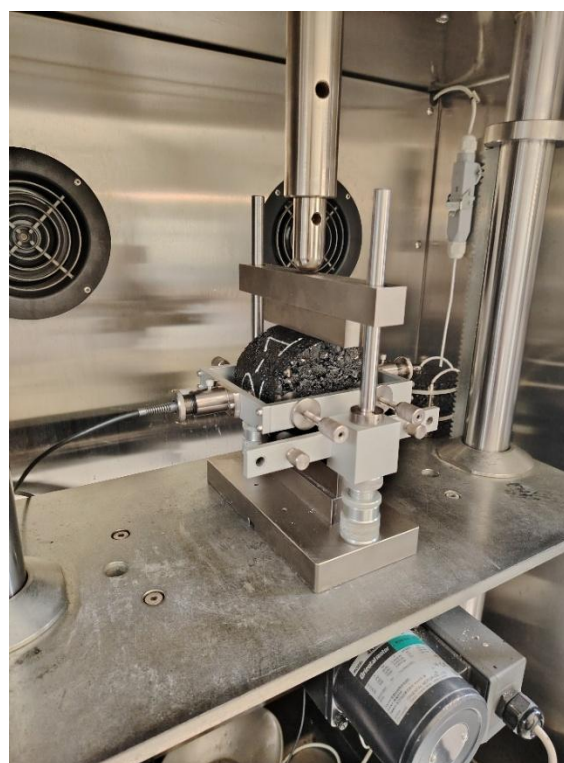


Figura 59. Disposizione del castelletto con provino durante la prova

3.3.9 Determinazione della Resistenza a Trazione Indiretta

Dopo la determinazione del modulo di rigidezza, i campioni vengono sottoposti a una prova distruttiva in grado di misurare la *Resistenza a Trazione Indiretta* (RTI) o *Indirect Tensile Strength* (ITS), una delle proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi; il parametro fornisce informazioni sulla resistenza a trazione e alla fessurazione dei conglomerati, sotto condizioni di carico indiretto. Essa rappresenta il massimo sforzo di trazione ottenuto dalla forza massima applicato al campione cilindrico caricato diametralmente finché questo non si rompe a certe condizioni.

Per lo svolgimento del test si segue la norma EN 12697-23, in cui si descrive il fatto che i provini devono essere testati alla temperatura desiderata, posizionati nella macchina di compressione tra due piastre metalliche di carico e caricato diametralmente lungo l'asse del cilindro con una

deformazione costante di 50 mm/min finché non si arriva a rottura. Nella figura sottostante è riportato uno schema della prova, in cui è possibile individuare il provino, le strisce di carico inferiore e superiore, il telaio in acciaio e la forza applicata.

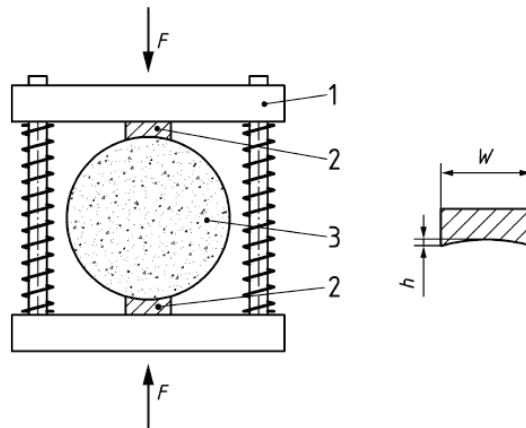


Figura 61. Configurazione di prova per RTI (BS EN 12697-23)

I campioni vengono tenuti in camera climatica a temperatura pari a 25°C (stessa considerazione riportata nel paragrafo precedente riguardante i valori limite di ANAS facenti riferimento a una T pari a 25°C). Il macchinario è collegato a un software che permette di registrare i valori di carico e di spostamento durante l'esecuzione della prova, nonché i loro valori massimi.

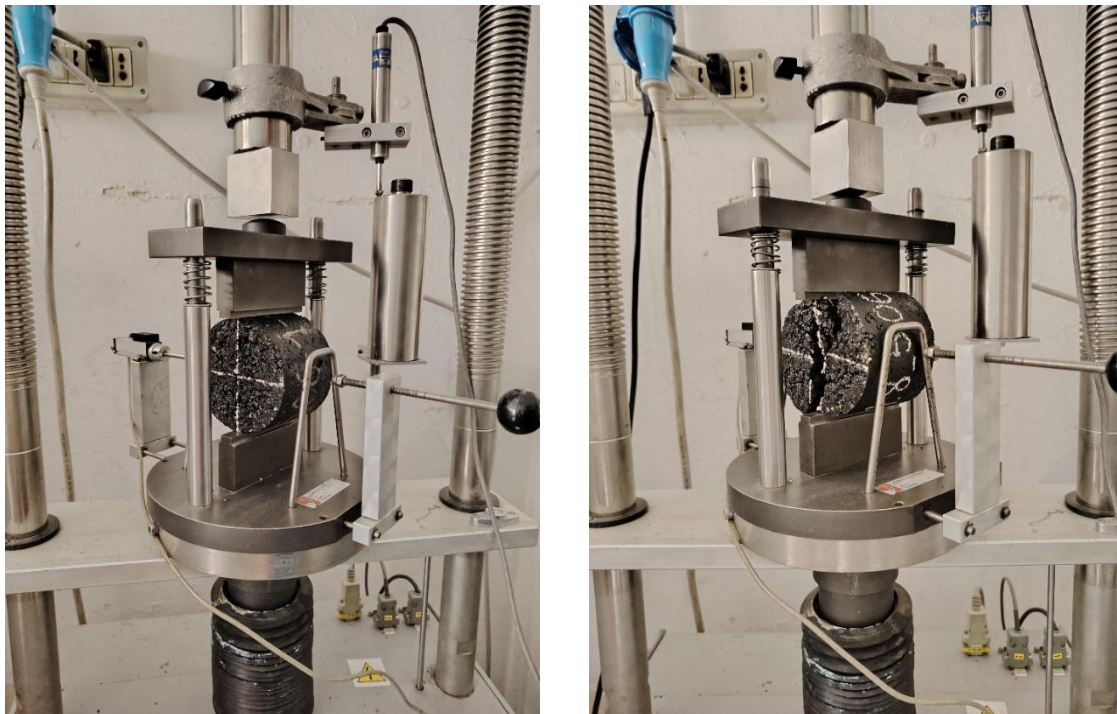


Figura 62. Configurazione campione prima della prova ITS (sx) e dopo la prova ITS (dx)

Il valore di RTI/ITS si determina, come riportato nella normativa, con la seguente formula:

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

in cui:

- ITS/RTI è l'Indirect Tensile Strength o Resistenza a Trazione Indiretta, in MPa;
- P è il massimo valore del carico applicato, in N;
- D è il diametro del campione, in mm;
- H è l'altezza reale finale del campione (media delle 4 altezze misurate), in mm.

4. ANALISI DEI RISULTATI

In questo capitolo si vogliono analizzare i risultati ottenuti per quanto riguarda la composizione, le caratteristiche volumetriche e meccaniche delle miscele riportate in Tabella 23 e, attraverso una corretta interpretazione dei dati a disposizione, cercare di dare risposta alla serie di domande che sono state poste all'inizio di questo argomento di Tesi, ovvero:

- verificare il comportamento dei conglomerati bituminosi contenenti plastiche da riciclo;
- capire se il materiale polimerico all'interno della miscela agisce come sostituto del bitume o sostituisce gli aggregati;
- analizzare l'influenza del materiale plastico sulle proprietà volumetriche e meccaniche del conglomerato.

4.1 Composizione

4.1.1 Granulometria

Sono riportate le curve granulometriche delle miscele oggetto di studio, i cui valori di passante progressivo sono riportati nella tabella sottostante.

Mix ID	Passante progressivo [%]										
	31.5	20	16	12.5	8	4	2	0.5	0.25	0.063	Pan
UI.0_5.06-1	100	100	100	98.74	85.45	45.56	31.38	15.67	11.73	6.93	0.00
UM.0_4.19-1	100	100	100	97.02	80.36	39.46	27.51	13.93	10.22	6.65	0.00
UM.0_4.61-1	100	100	100	97.76	81.55	42.18	29.55	15.48	11.11	6.58	0.00
UM.0_5.06-1	100	100	100	97.59	79.60	40.18	29.54	15.99	11.18	6.57	0.00
UM.4M_4.19-1	100	100	100	98.32	82.21	43.43	31.62	16.37	11.75	7.32	0.00
UM.4M_4.19-2	100	100	100	98.32	82.21	43.43	31.62	16.37	11.75	7.32	0.00
UM.4M_4.61-1	100	100	100	97.95	82.23	42.11	30.27	16.27	11.55	6.82	0.00
UM.4M_4.61-2	100	100	99.54	96.18	79.27	44.47	32.07	17.27	12.22	7.42	0.00
UM.4M_5.06-1	100	100	100	99.07	81.68	42.37	31.46	16.69	11.70	7.17	0.00
UM.8M_4.19-1	100	100	100	96.10	78.92	39.31	28.18	15.59	11.26	7.06	0.00
UM.8M_4.61-1	100	100	100	97.80	81.92	42.15	31.14	16.74	12.08	7.29	0.00
UM.8M_5.06-1	100	100	100	97.06	79.24	40.08	30.02	16.26	11.66	7.01	0.00
UM.8M_4.19-2	100	100	100	96.10	78.92	39.31	28.18	15.59	11.26	7.06	0.00
UM.8M_4.61-2	100	100	100	97.80	81.92	42.15	31.14	16.74	12.08	7.29	0.00
UM.8M_5.06-2	100	100	100	97.06	79.24	40.08	30.02	16.26	11.66	7.01	0.00
UL.8M_5.60-1	100	100	100	97.56	82.75	44.62	32.09	17.43	12.72	7.64	0.00
UM.4R_4.19-1	100	100	100	96.75	79.92	47.89	35.72	19.61	14.12	8.48	0.00
UM.4R_4.61-1	100	100	100	99.21	82.52	45.52	32.08	17.36	12.78	7.94	0.00
UM.4R_4.61-2	100	100	100	96.80	79.63	40.43	29.36	14.27	8.43	2.64	0.00
UM.4R_5.06-1	100	100	100	97.44	79.03	44.16	32.78	18.00	13.00	7.72	0.00
UM.8R_4.19-1	100	100	100	98.75	82.62	44.56	33.31	18.23	13.08	7.94	0.00
UM.8R_4.61-1	100	100	100	97.83	82.55	43.37	31.77	17.14	12.36	7.62	0.00
UM.8R_5.06-1	100	100	100	99.02	83.39	46.03	34.03	18.72	13.31	7.92	0.00

Tabella 32. Valori di passante progressivo delle miscele realizzate

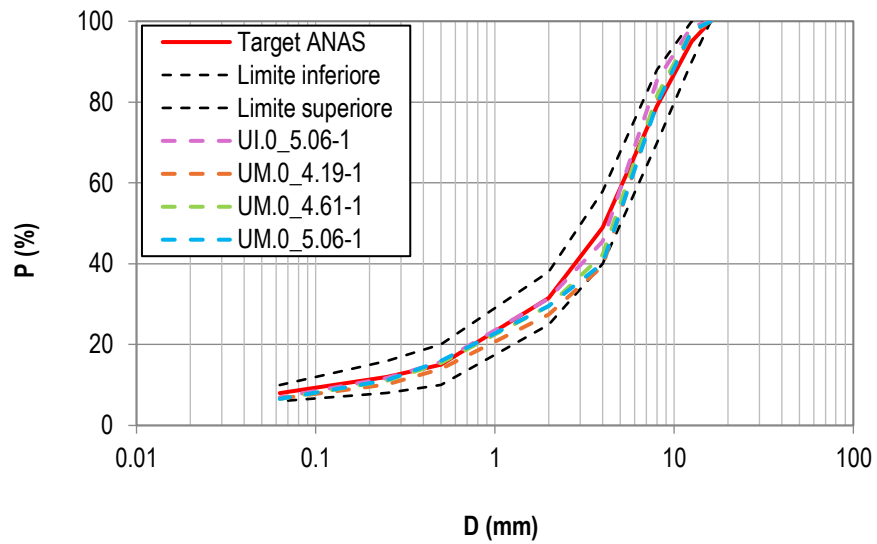


Figura 63. Curva granulometrica miscela senza WP

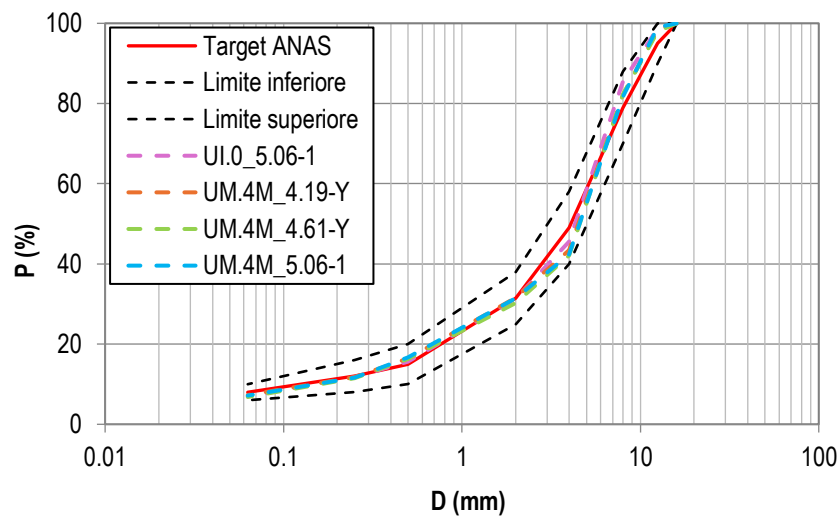


Figura 64. Curva granulometrica miscela con M pari a 0.4%

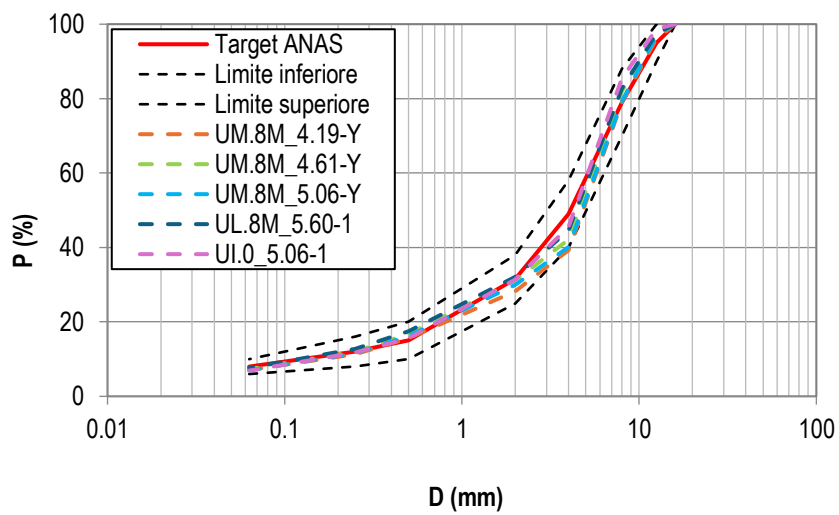


Figura 65. Curva granulometrica miscela con M pari a 0.8%

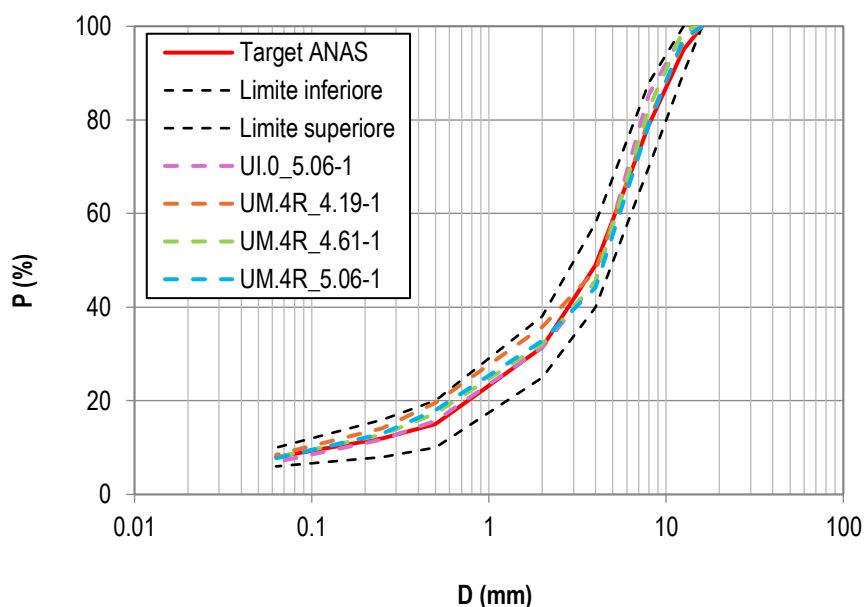


Figura 66. Curva granulometrica miscela con R pari a 0.4%

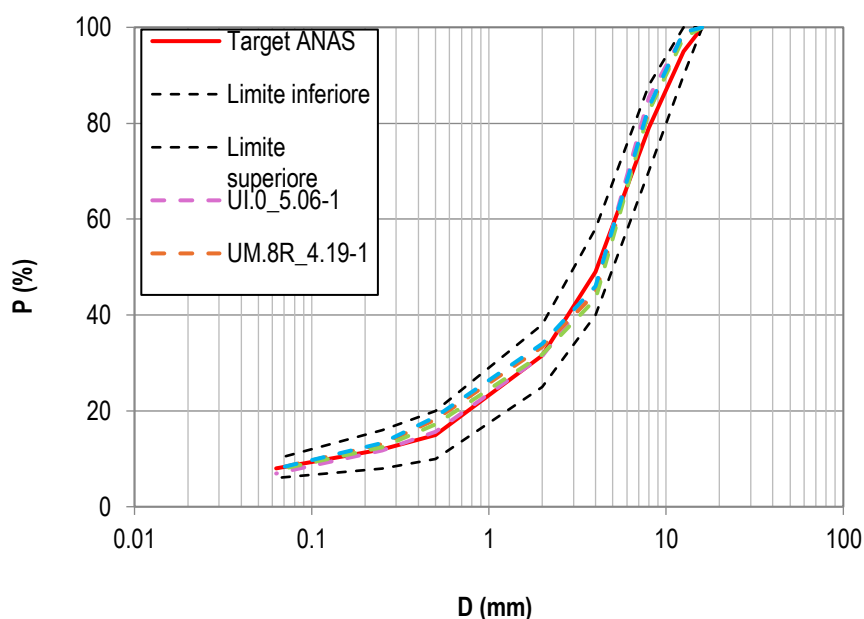


Figura 67. Curva granulometrica miscela con R pari a 0.8%

È stato valutato lo scostamento percentuale dei passanti progressivi delle varie miscele rispetto ai valori ottenuti come media, ai vari setacci, del limite inferiore e superiore riportati nel Capitolato ANAS. I risultati ottenuti sono stati riportati nella Tabella 33 ed è stato valutato lo scostamento medio di ogni singola miscela; questa operazione è stata fatta per valutare la differenza percentuale tra la curva Target di ANAS e le curve ottenute in laboratorio. I risultati ottenuti sono stati suddivisi in tre categorie:

- <5%: colore verde → Ottima qualità → curva granulometrica con scostamento medio basso;
- 5%-15%: colore giallo → Buona qualità → curva granulometrica con scostamento medio accettabile;
- >15%: colore rosso → Qualità insufficiente → curva granulometrica con scostamento medio significativo.

Mix ID	Passante progressivo [%]							MEDIA
	12.5	8	4	2	0.5	0.25	0.063	
UI.0_5.06-1	3.94%	8.16%	-7.02%	-0.37%	4.49%	-2.21%	-13.41%	-0.92%
UM.0_4.19-1	2.13%	1.72%	-19.47%	-12.66%	-7.13%	-14.87%	-16.92%	-9.60%
UM.0_4.61-1	2.90%	3.23%	-13.92%	-6.19%	3.23%	-7.43%	-17.78%	-5.14%
UM.0_5.06-1	2.73%	0.76%	-17.99%	-6.23%	6.63%	-6.81%	-17.83%	-5.53%
UM.4M_4.19-1	3.50%	4.06%	-11.37%	0.38%	9.12%	-2.05%	-8.52%	-0.70%
UM.4M_4.19-2	3.50%	4.06%	-11.37%	0.38%	9.12%	-2.05%	-8.52%	-0.70%
UM.4M_4.61-1	3.10%	4.09%	-14.07%	-3.91%	8.49%	-3.73%	-14.72%	-2.96%
UM.4M_4.61-2	1.24%	0.35%	-9.25%	1.81%	15.14%	1.83%	-7.31%	0.54%
UM.4M_5.06-1	4.28%	3.39%	-13.54%	-0.13%	11.24%	-2.47%	-10.37%	-1.09%
UM.8M_4.19-1	1.16%	-0.10%	-19.78%	-10.54%	3.96%	-6.21%	-11.72%	-6.17%
UM.8M_4.61-1	2.95%	3.70%	-13.99%	-1.16%	11.57%	0.68%	-8.84%	-0.73%
UM.8M_5.06-1	2.17%	0.31%	-18.20%	-4.69%	8.39%	-2.86%	-12.41%	-3.90%
UM.8M_4.19-2	1.16%	-0.10%	-19.78%	-10.54%	3.96%	-6.21%	-11.72%	-6.17%
UM.8M_4.61-2	2.95%	3.70%	-13.99%	-1.16%	11.57%	0.68%	-8.84%	-0.73%
UM.8M_5.06-2	2.17%	0.31%	-18.20%	-4.69%	8.39%	-2.86%	-12.41%	-3.90%
UL.8M_5.60-1	2.69%	4.74%	-8.94%	1.87%	16.21%	5.99%	-4.52%	2.58%
UM.4R_4.19-1	1.84%	1.17%	-2.27%	13.40%	30.73%	17.66%	5.96%	9.78%
UM.4R_4.61-1	4.44%	4.45%	-7.10%	1.84%	15.74%	6.47%	-0.79%	3.58%
UM.4R_4.61-2	1.89%	0.79%	-17.50%	-6.78%	-4.86%	-29.78%	-66.96%	-17.60%
UM.4R_5.06-1	2.57%	0.04%	-9.88%	4.07%	20.03%	8.33%	-3.51%	3.09%
UM.8R_4.19-1	3.94%	4.59%	-9.05%	5.74%	21.54%	9.02%	-0.72%	5.01%
UM.8R_4.61-1	2.98%	4.50%	-11.48%	0.86%	14.30%	3.04%	-4.80%	1.34%
UM.8R_5.06-1	4.23%	5.56%	-6.06%	8.02%	24.83%	10.93%	-0.97%	6.65%

Tabella 33. Valori percentuali di scostamento e valore medio delle curve granulometriche

Dai risultati ottenuti si può osservare che la maggior parte delle miscele presentano un'ottima curva granulometrica che si avvicina a quella Target da Capitolato ANAS (moltissimi risultati presentano colore verde) o risultano essere accettabili, mentre 1 conglomerato presenta una curva che si discosta in maniera significativa.

I valori ottenuti permettono di concludere che le proporzioni di aggregato adottate nella miscela realizzata in impianto e le proporzioni di materiale inerte adottate per le miscele realizzate in laboratorio sono valide e consentono di ottenere curve granulometriche simili a quella Target di ANAS.

4.1.2 Percentuale di bitume

Come già raccontato nel paragrafo 3.3.3, la percentuale di bitume è stata calcolata mediante il processo di ignizione; i risultati ottenuti sono stati inseriti nella Tabella 34, in cui sono presenti sia i valori teorici ottenuti e i valori di percentuale di bitume sulla miscela e sugli aggregati ottenuti da Carbolite. Ottenuti questi valori, è stato calcolato il valore di variazione percentuale di bitume rispetto alla miscela.

Anche in questa situazione, 3 categorie sono state realizzate per visualizzare la bontà dei risultati ottenuti:

- <5%: colore verde → Ottima qualità → le percentuali di bitume non si discostano in maniera significativa da quelle teoriche;
- 5%-15%: colore giallo → Buona qualità → le percentuali di bitume presentano leggeri scostamenti da quelli teorici ma risultano essere accettabili;
- >15%: colore rosso → Qualità insufficiente → le percentuali di bitume si discostano in maniera significativa da quelle teoriche.

Mix ID	BWPR.M [%]	%Bitume _{mix} Carbolite	Variazione Bitume _{mix} [%]
UI.0_5.06-1	5.65	5.695	0.87%
UM.0_4.19-1	4.89	4.878	-0.15%
UM.0_4.61-1	5.27	5.115	-2.96%
UM.0_5.06-1	5.67	5.536	-2.42%
UM.4M_4.19-1	5.27	5.493	4.33%
UM.4M_4.19-2	5.27	5.493	4.33%
UM.4M_4.61-1	5.65	5.438	-3.75%
UM.4M_4.61-2	5.65	5.249	-7.09%
UM.4M_5.06-1	6.05	5.947	-1.71%
UM.8M_4.19-1	5.65	5.428	-3.87%
UM.8M_4.61-1	6.02	5.738	-4.76%
UM.8M_5.06-1	6.43	5.952	-7.39%
UM.8M_4.19-2	5.65	5.428	-3.87%
UM.8M_4.61-2	6.02	5.738	-4.76%
UM.8M_5.06-2	6.43	5.952	-7.39%
UL.8M_5.60-1	6.91	6.910	0.05%
UM.4R_4.19-1	5.27	5.418	2.89%
UM.4R_4.61-1	5.65	5.484	-2.86%
UM.4R_4.61-2	5.65	5.653	0.14%
UM.4R_5.06-1	6.05	5.748	-4.99%
UM.8R_4.19-1	5.65	5.663	0.29%
UM.8R_4.61-1	6.02	5.750	-4.56%
UM.8R_5.06-1	6.43	6.254	-2.69%

Tabella 34. Percentuali di bitume su miscela e aggregati

Si osserva che la maggior parte dei valori percentuali ottenuti risultano avere un'ottima qualità, con soltanto 3 valori che risultano essere di buona qualità; si può affermare che i valori teorici di bitume totale sulla miscela sono stati ritrovati dopo aver effettuato il processo di ignizione. I risultati ottenuti sono stati inseriti in un grafico in cui sono riportati i valori di fase legante sulla miscela teorici (asse delle ascisse) e i valori di bitume ottenuti da Carbolite (asse delle ordinate).

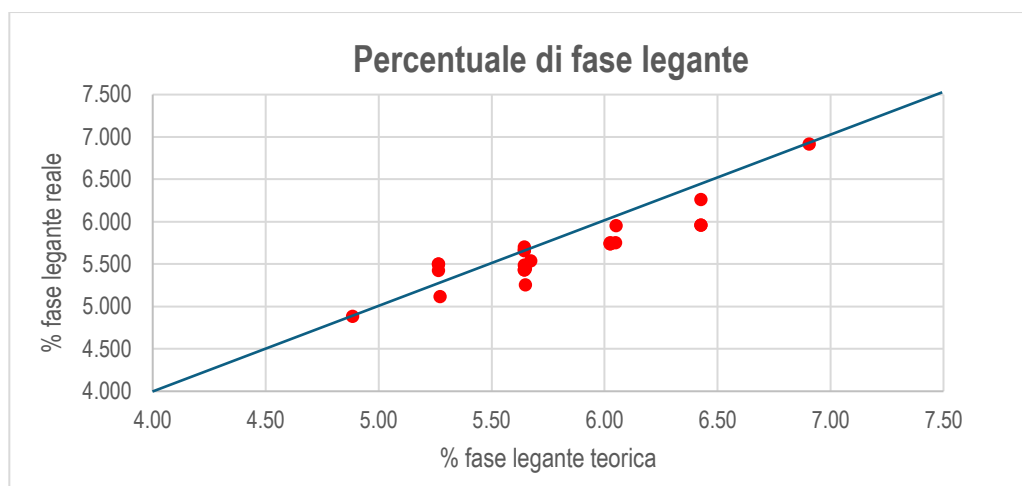


Figura 68. Percentuale di fase legante

4.1.3 Massima Massa Volumica Teorica

La Massima Massa Volumica Teorica è una proprietà molto importante delle miscele ed è influenzata dalle densità di tutti gli elementi presenti, per cui aggregati, RAP, bitume e plastica. Nella Tabella 35 sono riportati i valori di MMVT ottenuti da metodo dei picnometri delle miscele realizzate e i valori teorici di MMVT che si sarebbero dovuti ottenere (indicata nella tabella con

MMVT analitica) considerando i valori di densità degli aggregati, del RAP, del bitume, del rejuvenator e del materiale plastico, nelle adeguate proporzioni; viene indicato con WP.M il contenuto percentuale di Waste Plastics sul peso totale della miscela, con BA.A la percentuale di bitume di apporto su aggregati e RAP, con B.M il bitume totale sulla miscela, con BWPR.M la fase legante sulla miscela (composta da bitume, WP e RAP).

Dai due valori di MMVT ottenuti è stata calcolata la variazione percentuale della MMVT con picnometro da quella teorica.

Anche in questo caso i risultati ottenuti sono stati suddivisi in tre categorie:

- <5%: colore verde → Ottima qualità → MMVT non si discosta in maniera significativa da quella teorica;
- 5%-15%: colore giallo → Buona qualità → MMVT presenta un leggero scostamento da quella teorica ma risulta essere accettabile;
- >15%: colore rosso → Qualità insufficiente → MMVT si discosta in maniera significativa da quella teorica.

Mix ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT analitica [Mg/m ³]	Variazione [%]
UI.0_5.06-1	2.535	2.528	0.30%
UM.0_4.19-1	2.524	2.562	-1.49%
UM.0_4.61-1	2.530	2.542	-0.46%
UM.0_5.06-1	2.512	2.528	-0.65%
UM.4M_4.19-1	2.513	2.549	-1.40%
UM.4M_4.19-2	2.513	2.549	-1.40%
UM.4M_4.61-1	2.514	2.531	-0.67%
UM.4M_4.61-2	2.527	2.532	-0.19%
UM.4M_5.06-1	2.491	2.518	-1.05%
UM.8M_4.19-1	2.514	2.534	-0.80%
UM.8M_4.61-1	2.500	2.521	-0.84%
UM.8M_5.06-1	2.492	2.503	-0.42%
UM.8M_4.19-2	2.514	2.534	-0.80%
UM.8M_4.61-2	2.500	2.521	-0.84%
UM.8M_5.06-2	2.492	2.503	-0.42%
UL.8M_5.60-1	2.456	2.484	-1.12%
UM.4R_4.19-1	2.529	2.539	-0.41%
UM.4R_4.61-1	2.518	2.521	-0.13%
UM.4R_4.61-2	2.521	2.521	0.01%
UM.4R_5.06-1	2.503	2.508	-0.20%
UM.8R_4.19-1	2.521	2.514	0.29%
UM.8R_4.61-1	2.499	2.501	-0.09%
UM.8R_5.06-1	2.490	2.484	0.22%

Tabella 35. MMVT delle miscele realizzate

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può notare che tutte le miscele presentano un'ottima qualità per quanto concerne il valore di MMVT, con una variazione massima del -1.49%; ciò significa che c'è un'ottima corrispondenza tra il valore atteso di MMVT e quello trovato con il metodo dei picnometri.

Nella

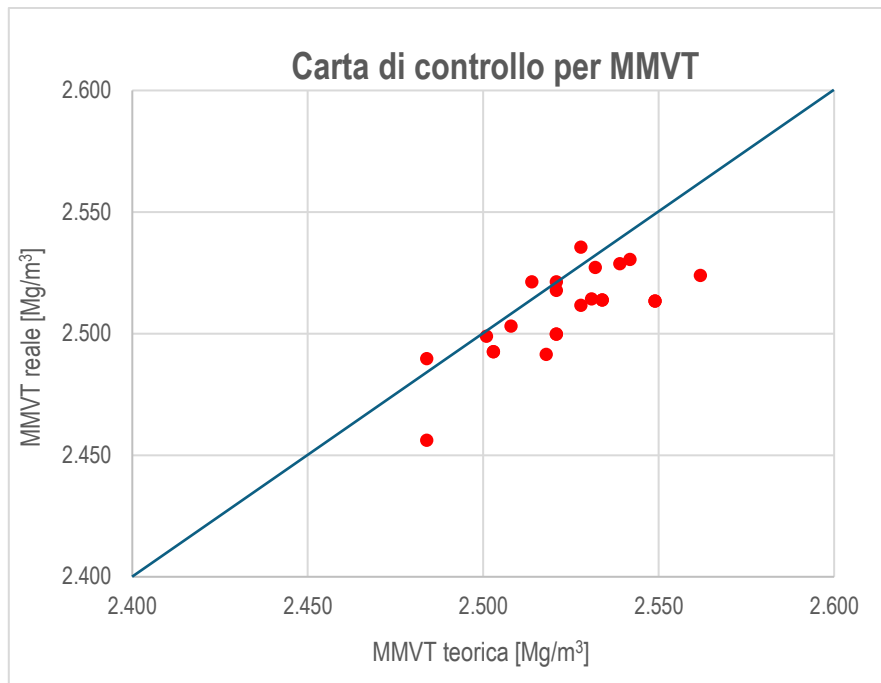


Figura 69. MMVT

4.2 Caratteristiche volumetriche

Le caratteristiche volumetriche hanno una rilevanza molto importante nella progettazione e produzione dei conglomerati bituminosi, dal momento che nel capitolato ANAS sono presenti una serie di prescrizioni riguardanti proprio le proprietà volumetriche, come il numero di vuoti percentuali che deve rispettare la miscela a 10, 120 e 210 giri.

Nei grafici non saranno presenti i valori relativi alle miscele UL0_5.06-1 e UL0_5.60-1 perché, nel primo caso, farebbero riferimento a un solo punto, mentre nel secondo caso il bitume è troppo elevato e non ha senso confrontarlo con le altre miscele.

A differenza del paragrafo 4.1 "Composizione" in cui sono stati presi i valori facenti riferimento alla singola miscela (anche perché su una porzione della miscela totale sono state effettuate le prove per determinare MMVT, contenuto di bitume e granulometria), in questo paragrafo, dal momento che per ciascun provino si dispone dei valori di percentuale di vuoti, VMA e VFB, sono state realizzate delle tabelle in cui sono riportati tutti i valori a livello "disaggregato" (tutti i valori di ogni provino) e, successivamente, sono stati realizzati dei grafici in cui sono stati riportati soltanto alcuni dati, special modo per le miscele contenenti le plastiche.

L'analisi delle caratteristiche volumetriche sarà fondamentale per analizzare il comportamento delle plastiche all'interno delle miscele (se agisce come legante o aggregato) e come le proprietà volumetriche vengono influenzate dalla loro aggiunta.

4.2.1 Percentuale dei vuoti

La percentuale dei vuoti riveste un ruolo fondamentale nella progettazione delle miscele, in quanto rappresenta un indice della porosità della miscela e influenza direttamente le proprietà e la durabilità del conglomerato. È necessario che esse rispettino una serie di prescrizioni riguardanti i valori di percentuale dei vuoti, legati principalmente ad alcune caratteristiche:

- *Resistenza meccanica e stabilità.* Valori elevati di percentuale di vuoti portano ad avere un conglomerato meno compatto e più debole, riducendo la sua capacità di resistere al traffico e ai carichi pesanti; tutto ciò può portare alla formazione di deformazioni permanenti come l'ormaiamento o fessure. D'altra parte, una percentuale di vuoti troppo bassa può causare un eccesso di bitume libero tra gli aggregati, rendendo il conglomerato più sensibile alle alte temperature e meno resistente alla deformazione, poiché il bitume agisce come un lubrificante.
- *Permeabilità e resistenza all'acqua.* I vuoti rappresentano la principale porta d'ingresso per l'acqua nel conglomerato; elevati valori di percentuale dei vuoti portano ad avere un conglomerato molto poroso, consentendo all'acqua di penetrare facilmente e causare una serie di problemi quali il danneggiamento del legame aggregato-bitume e danni da gelo-disgelo.
- *Durabilità e invecchiamento.* I vuoti permettono all'aria e all'ossigeno di entrare in contatto con il bitume, il cui processo di ossidazione lo rende più rigido e fragile nel tempo, riducendo la sua capacità di connettere gli aggregati e di resistere alle sollecitazioni termiche. Una porosità controllata rallenta questo processo di invecchiamento.
- *Adesione/coesione.* Una corretta percentuale di vuoti garantisce che il bitume rivesta in modo ottimale gli aggregati della miscela, creando un forte legame coesivo all'interno del conglomerato. Maggiore adesione e coesione garantiscono stabilità, resistenza o distacco superficiale degli aggregati.

Tutte queste sono alcune ragioni per cui è essenziale progettare e realizzare miscele con una giusta percentuale di vuoti d'aria.

Nella Tabella 36 e Tabella 37 sono riportati i valori percentuali di vuoti d'aria a 10, 120 e 210 giri, rispettivamente N1, N2, N3 per il capitolato ANAS, delle miscele contenenti M e R; si vuole precisare che i valori che rispettano i valori limite prescritti da capitolato sono stati contrassegnati da una cella colore verde, mentre quelli che non rispettano le prescrizioni presentano un colore della cella rosso.

È possibile notare che nelle due tabelle sono presenti due colonne con il nome "*Numero di rotazioni*": è utile specificare che le prime 3 colonne prendono in considerazione i valori di percentuale di vuoti dei singoli campioni, per cui per ogni singolo provino (che si trova nella colonna "*Test ID*") è presente un valore percentuale, mentre le altre 3 colonne considerano i valori medi, ottenuti come media aritmetica dei valori dei campioni appartenenti alla stessa miscela e allo stesso lotto di produzione. In pratica, le prime 3 colonne considerano le percentuali di vuoti dei singoli provini, le altre 3 colonne le percentuali riferite alla miscela.

Nell'analisi della percentuale di vuoti i valori a cui si fa maggior riferimento sono quelli a numeri di rotazione pari a 120 giri e 210 giri, i quali vengono anche chiamati, rispettivamente, N_{design} e N_{max} . In particolare, come verrà anche specificato più avanti in questo argomento di Tesi, è buona norma cercare di realizzare miscele con vuoti d'aria a 120 giri pari a 4%.

Come già riportato all'inizio del paragrafo, quello che è stato fatto è stato quello di scegliere soltanto alcuni campioni delle miscele, ottenendo alla fine i grafici riportati nelle pagine successive; questo è stato fatto perché alcuni dati ottenuti si discostano molto dalla linea di tendenza, alterando il risultato finale. Nelle tabelle successive sono stati contrassegnati i provini utilizzati nella realizzazione dei grafici, distinguendoli da quelli non presi in considerazione mediante la presenza di una scritta "*OK*" nella colonna "*Plot*".

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Numero di rotazioni			Numero di rotazioni			Plot
						10	120	210	10	120	210	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.01	1.39	12.97	3.34	1.73	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.40	3.66	2.07				
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.07	3.52	1.92				
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.16	1.54				
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	14.68	5.08	3.42	14.88	4.86	3.12	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	15.07	4.64	2.83				OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	13.55	3.52	1.78				OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.08	3.78	2.19	13.81	3.65	1.99	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	11.32	1.71	0.45				OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	12.88	2.99	1.23				OK
UM.4M 4.19-1-1	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	12.84	3.54	2.08	12.59	1.88	1.64	
UM.4M 4.19-1-2	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	12.34	2.69	1.19				
UM.4M 4.19-2-1	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	12.10	3.49	2.16				OK
UM.4M 4.19-2-2	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	11.07	2.17	1.07	11.66	2.86	1.56	
UM.4M 4.19-2-3	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	11.83	2.93	1.45				OK
UM.4M 4.61-1-1	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	12.85	3.27	1.67				OK
UM.4M 4.61-1-2	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.23	3.38	1.90	13.04	3.32	1.79	
UM.4M 4.61-2-1	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	12.29	3.28	1.80				OK
UM.4M 4.61-2-2	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	12.66	3.39	2.05				OK
UM.4M 4.61-2-3	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	14.57	5.22	2.63	13.17	3.97	2.16	
UM.4M 5.06-1-1	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.65	1.98	0.47				OK
UM.4M 5.06-1-2	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	12.02	2.08	0.56				OK
UM.8M 4.19-1-1	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	14.65	5.13	3.59	14.55	5.31	3.85	OK
UM.8M 4.19-1-2	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	14.45	5.50	4.10				OK
UM.8M 4.61-1-1	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.39	2.90	1.55				
UM.8M 4.61-1-2	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.87	3.91	2.59	12.63	3.41	2.07	OK
UM.8M 5.06-1-1	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.12	2.60	1.37				OK
UM.8M 5.06-1-2	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.83	3.43	1.96				OK
UM.8M 4.19-2-1	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.68	3.54	2.08	12.63	3.42	1.95	OK
UM.8M 4.19-2-2	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.70	3.35	1.87				OK
UM.8M 4.19-2-3	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.51	3.36	1.89				OK
UM.8M 4.61-2-1	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	12.35	3.29	1.80	12.87	3.42	1.48	OK
UM.8M 4.61-2-2	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	12.16	2.49	1.12				OK
UM.8M 4.61-2-3	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	14.10	4.49	1.53				
UM.8M 5.06-2-1	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.50	2.62	0.96	12.52	2.55	0.97	OK
UM.8M 5.06-2-2	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.54	2.49	0.98				OK
UM.8M 5.06-2-3	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.24	2.48	0.96				OK
UL.8M 5.60-1-1	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.69	1.93	0.53	10.54	1.42	0.25	
UL.8M 5.60-1-2	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.59	1.28	0.14				
UL.8M 5.60-1-3	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.33	1.07	0.08				

Tabella 36. Percentuali di vuoti a 10, 120 e 210 giri delle miscele contenenti M

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Numero di rotazioni			Numero di rotazioni			Plot
						10	120	210	10	120	210	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.01	1.39	12.97	3.34	1.73	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.40	3.66	2.07				
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.07	3.52	1.92				
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.16	1.54				
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	11.32	1.71	0.45	12.10	2.35	0.84	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	12.88	2.99	1.23				OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.68	5.08	3.42				OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	15.07	4.64	2.83	14.88	4.86	3.12	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	13.55	3.52	1.78				OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.08	3.78	2.19				OK
UM.4R 4.19-1-1	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	11.34	2.65	1.70	11.99	3.26	1.99	OK
UM.4R 4.19-1-2	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	11.50	2.63	1.68				OK
UM.4R 4.19-1-3	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	13.14	4.49	2.61				
UM.4R 4.61-1-1	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.68	3.81	2.22	13.91	4.24	2.62	
UM.4R 4.61-1-2	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.71	4.44	2.88				
UM.4R 4.61-1-3	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	14.34	4.45	2.75				
UM.4R 4.61-2-1	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.67	2.40	1.31	11.67	2.57	1.35	OK
UM.4R 4.61-2-2	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.64	2.44	1.21				OK
UM.4R 4.61-2-3	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.69	2.88	1.53				OK
UM.4R 5.06-1-1	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.64	2.53	1.15	11.64	2.19	0.85	
UM.4R 5.06-1-2	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.56	1.88	0.63				OK
UM.4R 5.06-1-3	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.72	2.16	0.77				
UM.8R 4.19-1-1	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	12.51	3.47	2.28	12.25	3.27	2.13	OK
UM.8R 4.19-1-2	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	11.98	3.06	1.99				OK
UM.8R 4.19-1-3	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	13.18	4.46	3.16				
UM.8R 4.61-1-1	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.80	3.26	1.93	12.70	3.06	1.65	OK
UM.8R 4.61-1-2	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.59	2.86	1.37				OK
UM.8R 4.61-1-3	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	13.30	4.08	2.64				
UM.8R 5.06-1-1	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	10.99	1.85	1.03	11.16	2.02	1.13	OK
UM.8R 5.06-1-2	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	11.33	2.19	1.23				OK
UM.8R 5.06-1-3	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.27	3.43	2.09				

Tabella 37. Percentuali di vuoti a 10, 120 e 210 giri delle miscele contenenti R

Nei grafici è possibile notare la presenza di una curva facente riferimento alle miscele UM.8M_X.XX-2, le quali presentano temperature di miscelazione e compattazioni maggiori rispetto a UM.8M_X.XX-1 (175° temperatura di miscelazione, 165°C temperatura di compattazione); esse saranno oggetto di studio per l'analisi del comportamento delle plastiche all'interno dei conglomerati bituminosi con variazione di temperature di miscelazione e compattazione.

Per studiare il comportamento delle plastiche all'interno delle miscele, si analizza l'andamento della percentuale di vuoti a 120 rotazioni in funzione della percentuale di bitume totale sulla miscela e sulla fase legante della miscela, e poi si cerca di vedere se i risultati ottenuti vengono confermati anche dai vuoti che si ottengono a 10 rotazioni e 210 rotazioni.

Partendo dalla percentuale di vuoti a 120 rotazioni delle miscele realizzate con M, si può osservare che, inserendo lo 0.4% di plastica, si ha una diminuzione della percentuale di vuoti rispetto alla miscela senza WP, probabile sinonimo del fatto che la plastica fonde, comportandosi come legante, e tende a chiudere maggiormente i vuoti (a parità di bitume totale sulla miscela). Aggiungendo lo 0.8% di plastica (curva rossa), invece, si osserva che i vuoti tendono ad aumentare rispetto alla miscela senza WP, portando alla conclusione che la plastica non fonde completamente e si comporta sia come legante sia come aggregato; il fatto che non tutta la plastica fonde fa sì che nella miscela ci sia meno fase legante, portando ad ottenere una struttura più "aperta". Inserendo 0.8% di M ma aumentando la temperatura (curva verde), si osserva che i vuoti tendono a diminuire ed essere uguali ai valori che si ottengono con 0.4% di WP; ciò potrebbe vuol dire che l'aumento di temperatura permette alla plastica di fondere in quantità maggiore e di agire interamente come fase legante.

I risultati ottenuti a 120 rotazioni sono confermati anche dal grafico in cui, sull'asse delle ascisse, è presente la fase legante sulla miscela, in cui, a parità di fase legante, si osserva la miscela con 0.8% di WP più "aperta", e successivamente, le altre 3 tipologie di miscele.

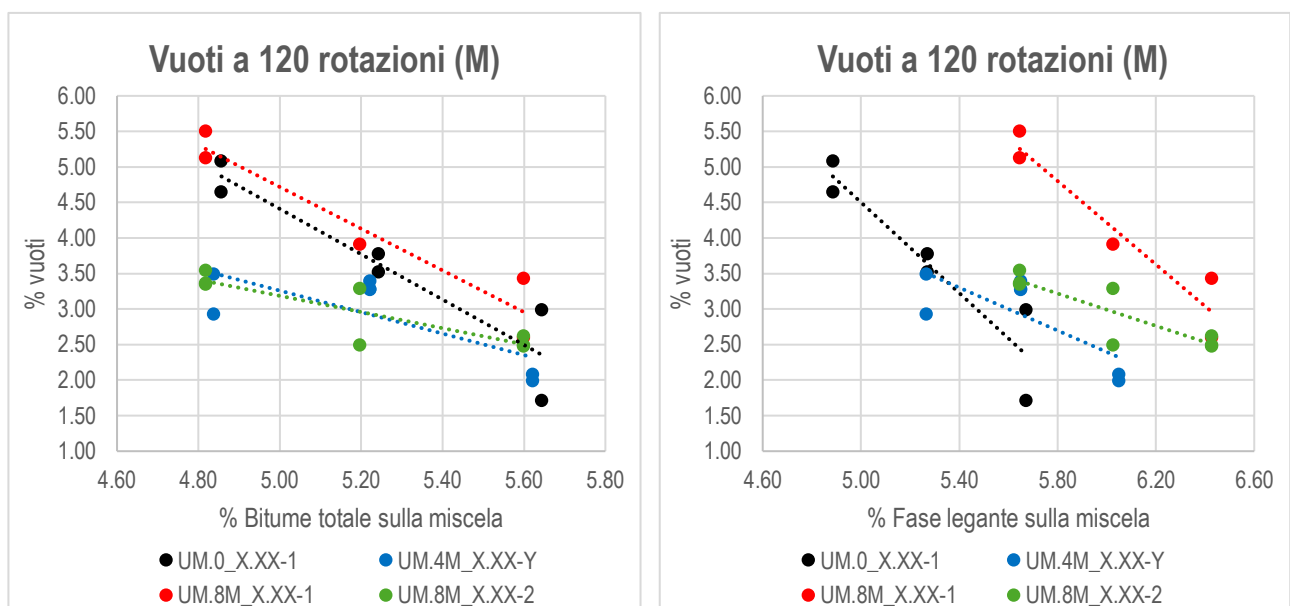


Figura 70. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele M

I risultati che sono stati ottenuti a 120 rotazioni per le miscele M sono confermati anche dai valori ottenuti a 10 rotazioni e 210 rotazioni.

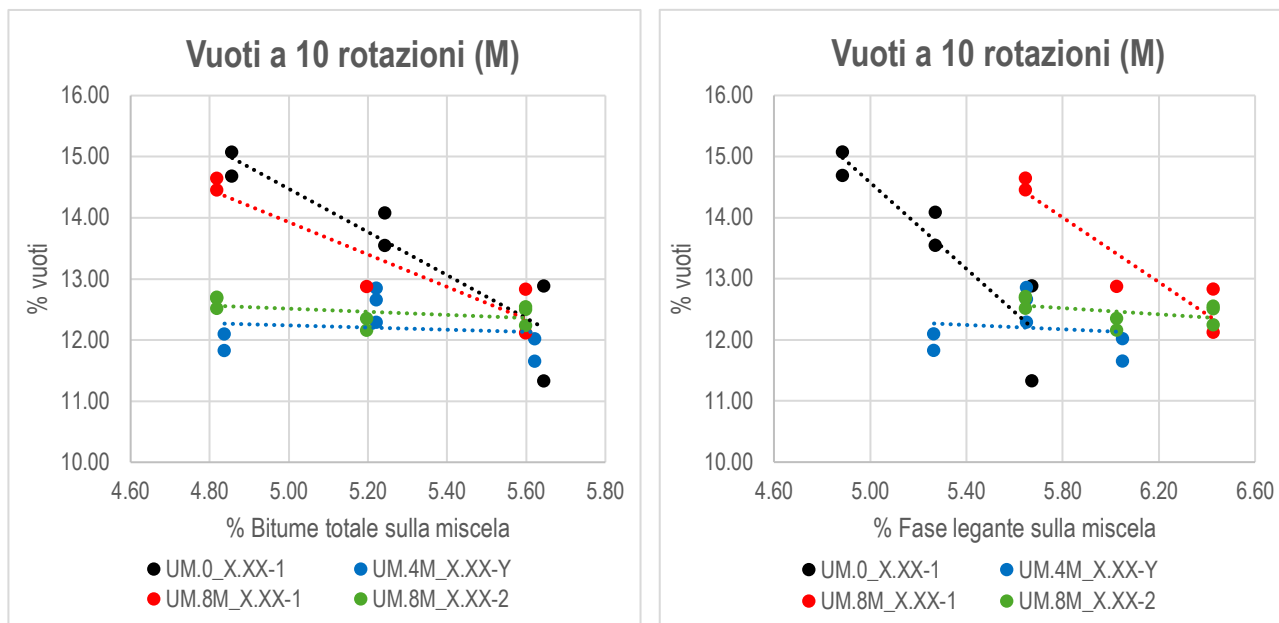


Figura 71. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele M

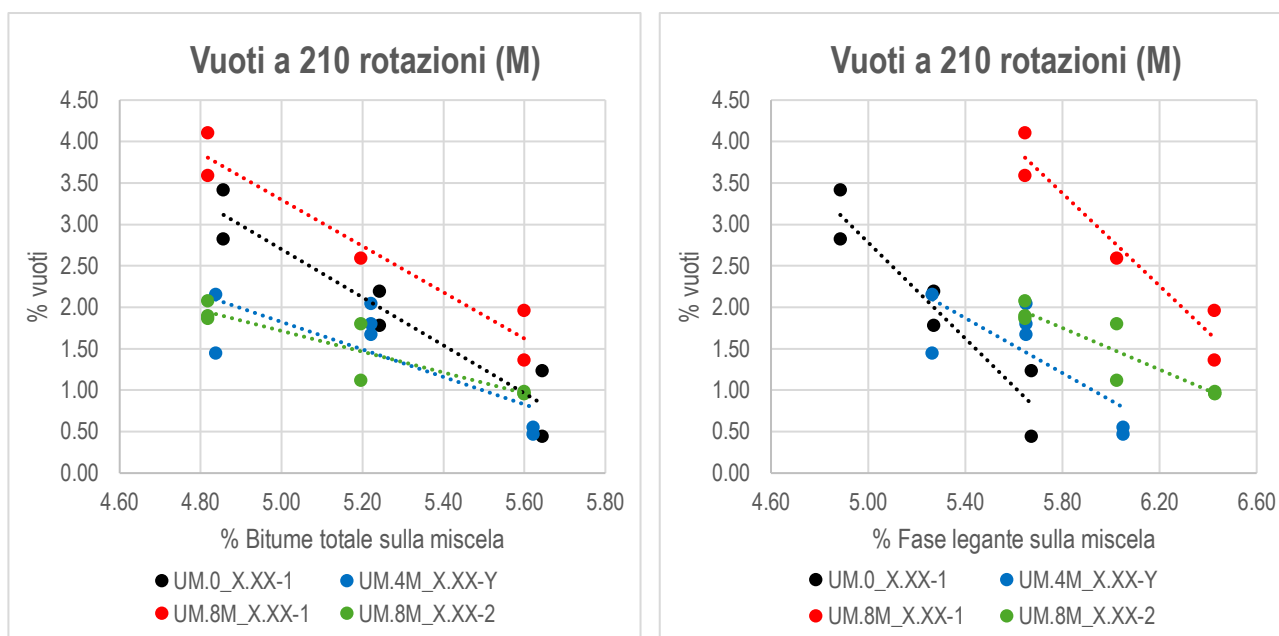


Figura 72. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele M

Passando allo studio della percentuale di vuoti a 120 rotazioni delle miscele realizzate con R, si può osservare che, inserendo sia 0.4% che 0.8% di plastica, si ha una diminuzione della percentuale di vuoti rispetto alla miscela senza WP, probabile sinonimo del fatto che tutta la plastica fonde e si comporta come legante (a parità di bitume totale sulla miscela) e rende la struttura meno “aperta”; questa differenza di comportamento rispetto alle miscele con M conferma un po’ quello che era stato osservato nella caratterizzazione qualitativa delle plastiche, in cui si osservava che con M si aveva, oltre alla fase legante, anche porzioni che si mischiavano agli aggregati e si comportavano come inerte, mentre R tendeva maggiormente a creare fase legante.

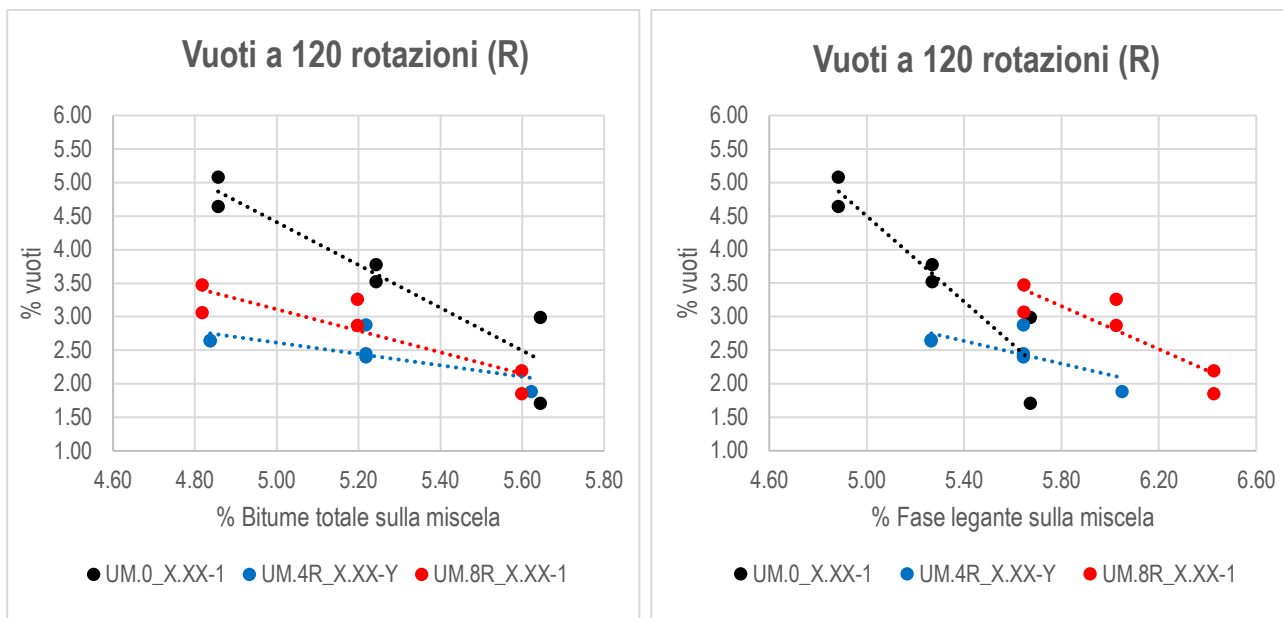


Figura 73. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele R

I risultati che sono stati ottenuti a 120 rotazioni per le miscele R sono confermati anche dai valori ottenuti a 10 rotazioni e 210 rotazioni.

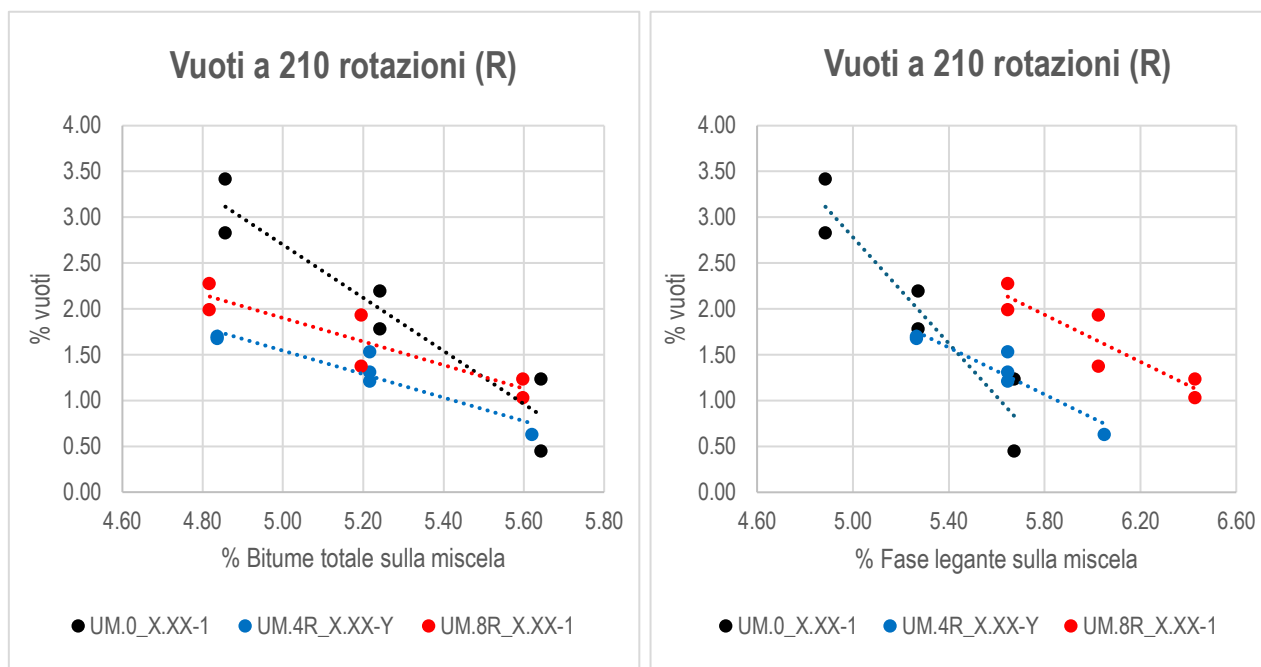


Figura 74. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele R

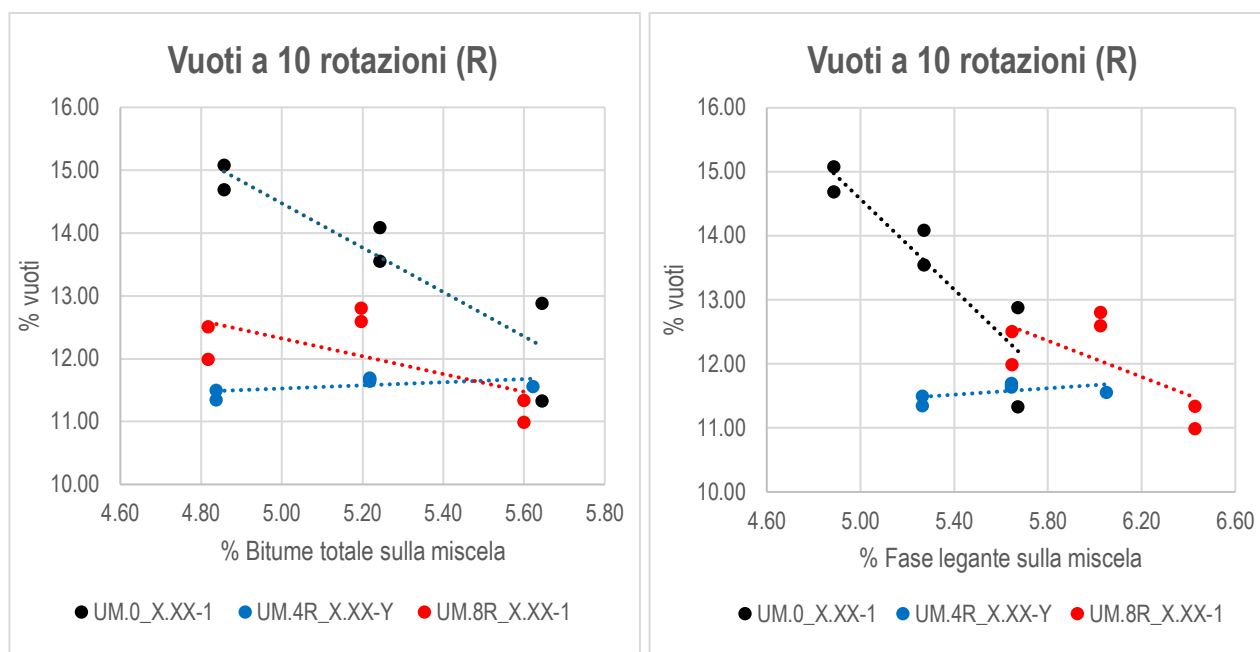


Figura 75. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscela R

È possibile osservare nei grafici successivi un confronto diretto tra le miscele contenenti le plastiche M e le miscele contenenti le plastiche R in funzione del bitume totale sulla miscela; si possono cogliere le seguenti considerazioni:

- con lo 0.4% di WP le linee di tendenza delle miscele risultano essere molto simili e quasi coincidenti, sinonimo di un probabile uguale comportamento delle plastiche quando aggiunte in tale quantità;
- con lo 0.8% di WP le percentuali di vuoti dei conglomerati contenenti M sono maggiori rispetto a quelle dei composti contenenti R, dal momento che la percentuale di plastica M che fonde è minore rispetto a R, per cui vi è maggiore porzione di plastica che rimane solida e funge da aggregato, aumentando il numero di vuoti.

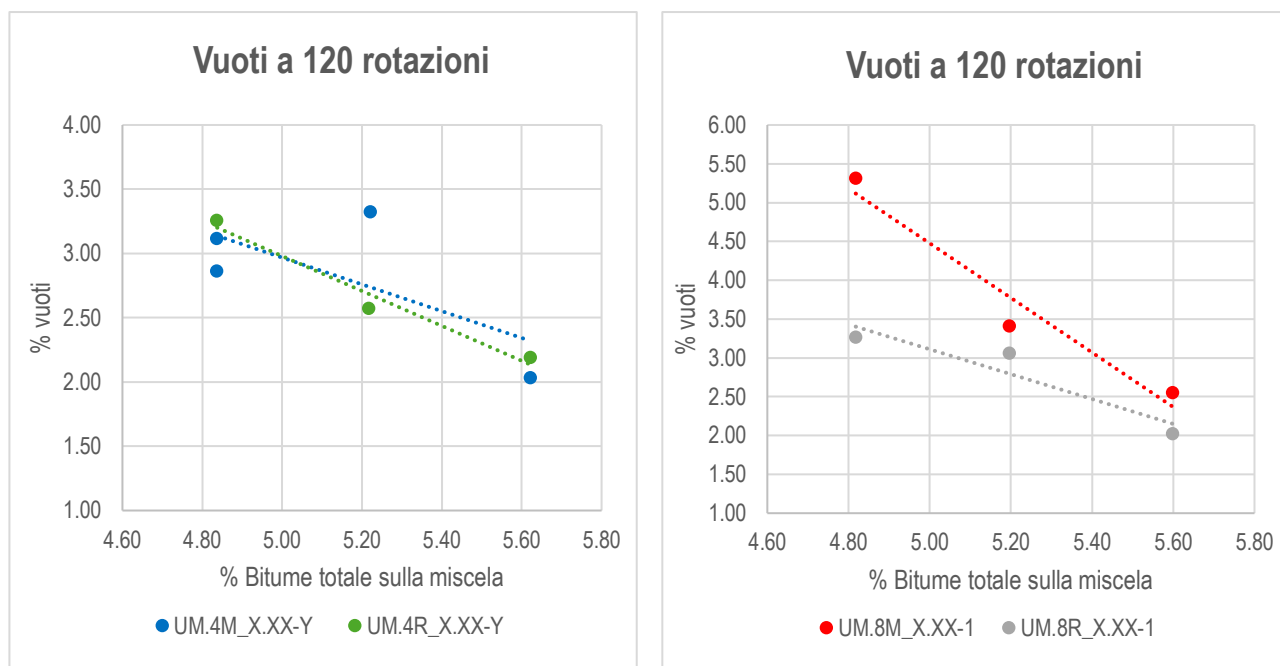


Figura 76. Confronto percentuale di vuoti a 120 rotazioni

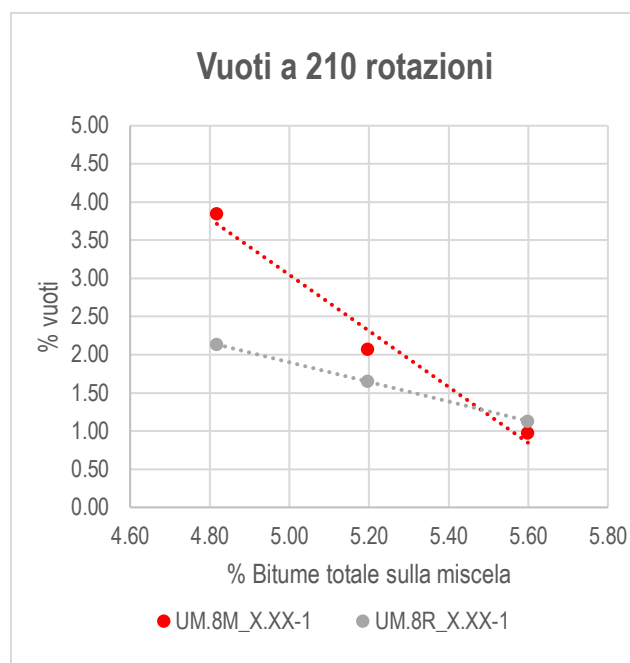
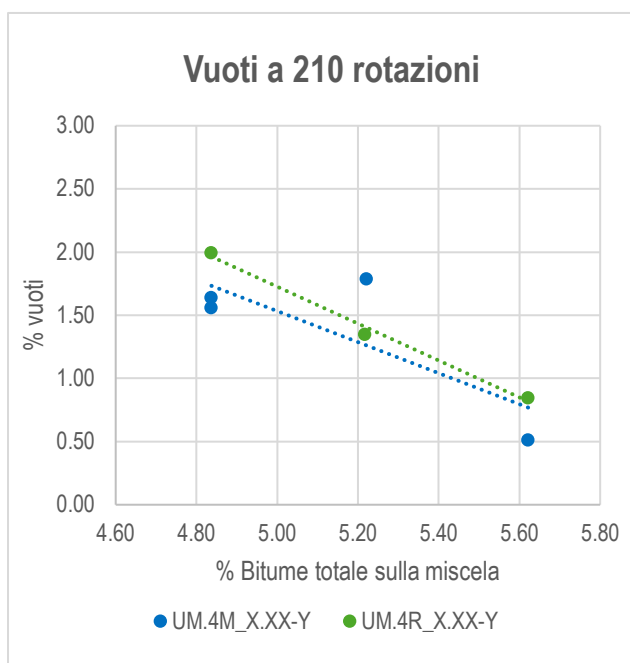


Figura 78. Confronto percentuale di vuoti a 210 rotazioni

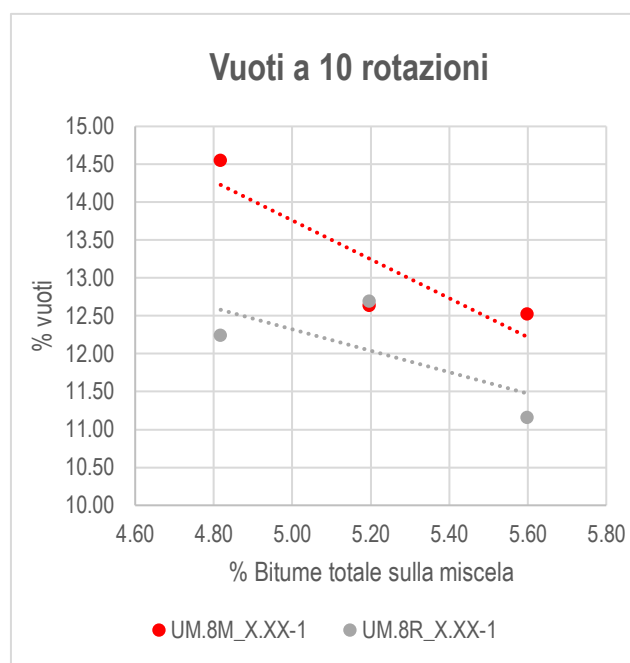
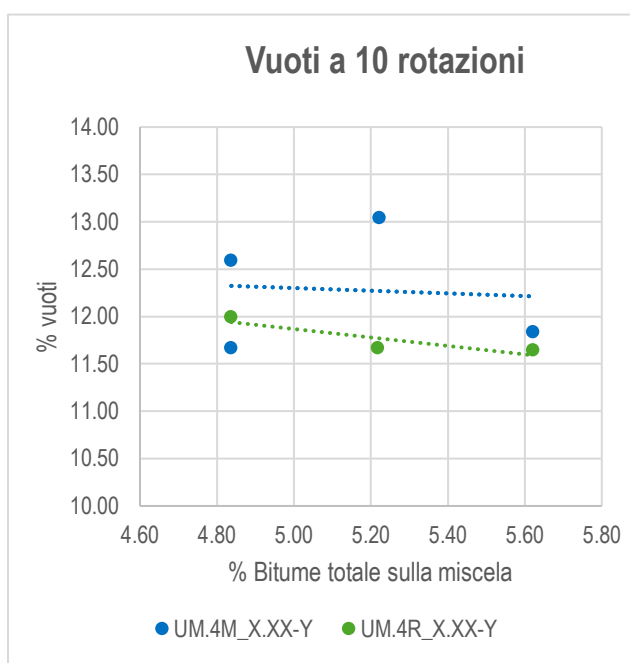


Figura 77. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele R

4.2.2 VMA e VFB

L'analisi di VMA e VFB deve tenere conto di alcuni aspetti teorici importanti riguardanti questi due parametri: come riportato nel documento dell'Asphalt Institute [10], la proprietà più difficile da ottenere nella progettazione della miscela è una quantità minima di vuoti nell'aggregato minerale. Normalmente, la curva che mostra l'andamento di VMA presenta una forma a U appiattita, per cui si ha un andamento decrescente da sinistra verso destra fino a un valore minimo, e poi si ha un andamento crescente con l'aumentare del contenuto di bitume.

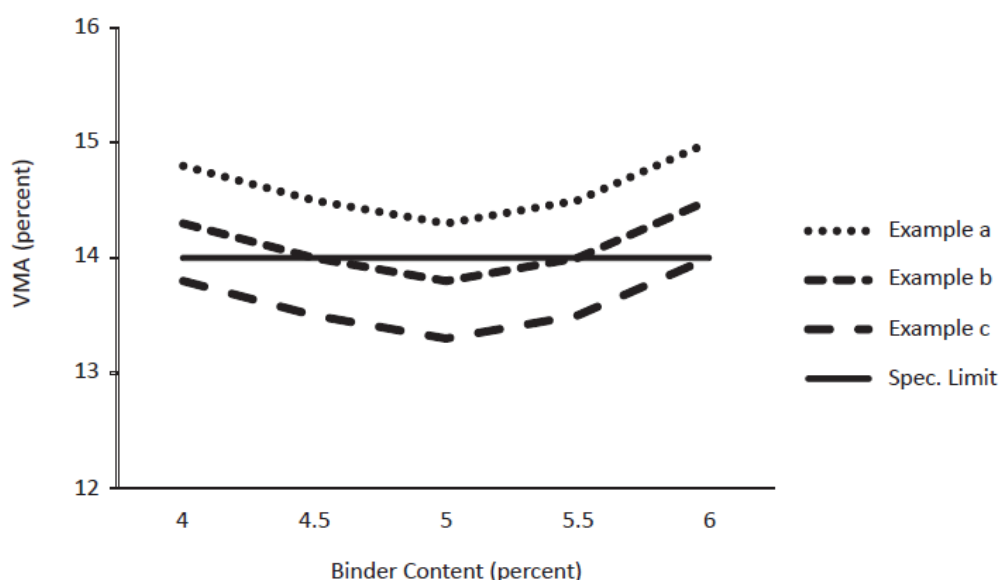


Figura 79. Esempio di curva di VMA [10]

Dietro questa curva c'è un significato fisico ben preciso: con l'aumento del bitume la miscela diventa effettivamente più lavorabile e si compatta più facilmente, il che significa che è possibile comprimere più peso nell'unità di volume. Pertanto, fino a un certo punto, la bulk density della miscela aumenta e VMA diminuisce.

Ad un certo punto, con l'aumento del contenuto di legante (la parte inferiore della curva a forma di U), VMA inizia ad aumentare perché il materiale con peso specifico relativamente più elevato (aggregato) viene spostato dal materiale con peso specifico inferiore (bitume).

In alcune miscele, la parte inferiore della curva VMA U è molto piatta, il che significa che la miscela compattata non è così sensibile al contenuto di bitume in questo intervallo [10].

Per quanto concerne VFB, il trend che ci si aspetta nel grafico è quello di una curva monotona crescente, ovvero all'aumentare del contenuto di bitume il valore di VFB tende ad aumentare; questo risulta essere in linea con la definizione di VFB, dal momento che esso rappresenta il numero percentuale di vuoti in una miscela riempita dal bitume e, ovviamente, maggiore è il contenuto di bitume, maggiore è il numero di vuoti interstiziali riempiti dal legante.

Passando allo studio di VMA e VFB delle miscele prodotte in laboratorio, si è deciso di utilizzare i valori di VMA e VFB facenti riferimento ai singoli campioni delle miscele. Così come è stato fatto nel caso della percentuale di vuoti, anche qui sono stati presi alcuni valori, mentre altri non sono stati presi in considerazione perché considerati "outlier", ovvero troppo distanti dalla linea di tendenza, con conseguente influenza negativa sul risultato finale. È possibile notare che le

miscele i cui valori di VMA e VFB sono stati selezionati sono identiche a quelle viste nel paragrafo precedente per le percentuali di vuoti; il motivo dietro tale scelta sta nel fatto che la selezione dei campioni per lo studio di percentuale di vuoti, VMA e VFB deve essere omogenea per tutte e tre le caratteristiche volumetriche, altrimenti vi sarebbe una lettura errata dei risultati ottenuti se si andassero a scegliere alcuni campioni per una caratteristica e altri campioni per le altre caratteristiche.

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	N _{max}		Plot
						VMA [%]	VFB [%]	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.1	90.5	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.7	86.4	
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.5	87.7	
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.1	90.3	
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	15.1	77.2	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	14.5	80.9	OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.4	87.5	OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.8	84.8	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.2	96.2	OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.8	91.6	OK
UM.4M 4.19-1-1	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	14.4	85.7	
UM.4M 4.19-1-2	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	13.7	90.9	
UM.4M 4.19-2-1	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	14.4	85.7	OK
UM.4M 4.19-2-2	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	13.6	91.7	
UM.4M 4.19-2-3	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	13.8	90.0	OK
UM.4M 4.61-1-1	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	15.1	88.5	OK
UM.4M 4.61-1-2	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	15.2	87.7	
UM.4M 4.61-2-1	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	15.2	88.3	OK
UM.4M 4.61-2-2	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	15.5	86.3	OK
UM.4M 4.61-2-3	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	15.9	83.7	
UM.4M 5.06-1-1	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	14.8	97.1	OK
UM.4M 5.06-1-2	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	14.9	96.4	OK
UM.8M 4.19-1-1	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	16.6	78.1	OK
UM.8M 4.19-1-2	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	17.0	75.9	OK
UM.8M 4.61-1-1	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	15.7	90.0	
UM.8M 4.61-1-2	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	16.6	84.2	OK
UM.8M 5.06-1-1	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	16.5	91.3	OK
UM.8M 5.06-1-2	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	16.9	88.7	OK
UM.8M 4.19-2-1	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	15.3	86.1	OK
UM.8M 4.19-2-2	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	15.1	87.4	OK
UM.8M 4.19-2-3	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	15.1	87.4	OK
UM.8M 4.61-2-1	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	15.9	88.6	OK
UM.8M 4.61-2-2	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	15.3	92.8	OK
UM.8M 4.61-2-3	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	15.6	90.6	
UM.8M 5.06-2-1	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	16.0	94.6	OK
UM.8M 5.06-2-2	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	16.1	94.0	OK
UM.8M 5.06-2-3	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	16.0	94.6	OK
UL.8M 5.60-1-1	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	16.7	96.8	
UL.8M 5.60-1-2	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	16.3	99.6	
UL.8M 5.60-1-3	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	16.3	99.7	

Tabella 38. Elenco dei campioni contenenti M selezionati per VMA e VFB

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	N _{max}		Plot
						VMA [%]	VFB [%]	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.1	90.5	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.7	86.4	
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.5	87.7	
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	15.1	90.3	
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	14.2	96.2	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	14.8	91.6	OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	15.1	77.2	OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.5	80.9	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.4	87.5	OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.8	84.8	OK
UM.4R 4.19-1-1	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	14.2	87.8	OK
UM.4R 4.19-1-2	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	14.2	87.8	OK
UM.4R 4.19-1-3	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	15.0	82.4	
UM.4R 4.61-1-1	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	15.5	85.9	
UM.4R 4.61-1-2	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	16.1	82.1	
UM.4R 4.61-1-3	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	16.0	82.7	
UM.4R 4.61-2-1	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	14.8	90.9	OK
UM.4R 4.61-2-2	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	14.7	91.6	OK
UM.4R 4.61-2-3	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	14.9	90.1	OK
UM.4R 5.06-1-1	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	15.5	92.5	
UM.4R 5.06-1-2	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	15.0	96.1	OK
UM.4R 5.06-1-3	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	15.2	94.7	
UM.8R 4.19-1-1	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	15.5	85.1	OK
UM.8R 4.19-1-2	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	15.2	87.0	OK
UM.8R 4.19-1-3	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	16.3	80.1	
UM.8R 4.61-1-1	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	16.0	87.9	OK
UM.8R 4.61-1-2	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	15.6	90.7	OK
UM.8R 4.61-1-3	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	16.6	84.1	
UM.8R 5.06-1-1	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	16.1	93.8	OK
UM.8R 5.06-1-2	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	16.3	92.5	OK
UM.8R 5.06-1-3	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	17.0	87.9	

Tabella 39. Elenco dei campioni contenenti R selezionati per VMA e VFB

Iniziando dal grafico di VMA delle miscele contenenti M, riportato in Figura 79, si può notare che le uniche due curve che mostrano un andamento coerente con la teoria di VMA sono quelle relative a UM.0_X.XX-1 e UM.8M_X.XX-1; in particolare, per la curva relativa alla miscela con 0% di WP, si osserva un andamento decrescente dei valori, per cui VMA diminuisce, ed è come se ci si trovasse nella parte a sinistra della parabola. Questo andamento è sinonimo del fatto che il conglomerato risulta essere più lavorabile man mano che aumenta il contenuto di bitume, ed è confermato anche dal fatto che i valori di Bulk Density tendono ad aumentare con l'aumento del contenuto di legante: infatti, si ha che per:

- ρ_{SSD} (UM.0_4.19-1): 2.445 Mg/m³;
- ρ_{SSD} (UM.0_4.61-1): 2.480 Mg/m³;
- ρ_{SSD} (UM.0_5.06-1): 2.491 Mg/m³.

Passando alla curva relativa a UM.8M_X.XX-1, si può notare come esista un punto di minimo quasi in corrispondenza della percentuale di fase legante pari a 6.02%, ovvero 4.61% di bitume di apporto su aggregati e RAP, per cui esso rappresenta il punto con VMA più basso per le miscele con 0.8% di WP pari a M; nella parte a sinistra della parabola i valori di Bulk Density aumentano passando da UM.8M_4.19-1 (ρ_{SSD} =2.417 Mg/m³) a UM.8M_4.61-1 (ρ_{SSD} =2.448 Mg/m³).

Per quanto riguarda le curve relative a UM.4M_X.XX-Y e UM.8M_X.XX-2, esse presentano un andamento parabolico ma con concavità rivolta verso il basso, il che non risulta essere coerente con la teoria di VMA (confermato anche dalle equazioni riportate nei riquadri dell'omonimo colore).

Analizzando i valori ottenuti, si può notare che per la curva UM.8M_X.XX-1 si hanno i valori di VMA maggiori, segno del fatto che non tutta la plastica fonde e non si lega agli aggregati, rendendo i vuoti tra gli aggregati maggiori nella miscela, confermando quanto detto nella percentuale di vuoti; aumentando le temperature (UM.8M_X.XX-2), si ha un abbassamento dei valori di VMA, facendo sì che la plastica fonda in quantità maggiore e risulti essere maggiormente legata

agli aggregati. Con 0.4% di WP si hanno valori di VMA simili a quelli che si ottengono con la miscela senza WP e UM.8M_X.XX-2.

Per quanto concerne il grafico di VFB, tutte le curve risultano essere monotone crescenti all'aumentare del contenuto di fase legante, ovvero all'aumentare del contenuto di bitume; ciò risulta essere in linea con quanto è stato riportato all'inizio del paragrafo (confermato dalle equazioni delle rette presenti nel grafico).

I valori ottenuti per VFB confermano quanto detto in precedenza, perché si osserva che, a parità di fase legante, i vuoti riempiti da bitume delle miscele con 0.4% sono maggiori di quelli delle miscele con 0.8% (a T maggiore) e di quelli dei conglomerati con 0.8%, dal momento che con 0.4% tutta la plastica fonde e si lega maggiormente agli aggregati. I risultati risultano essere coerenti perché le miscele del gruppo UM.8M_X.XX-1 che hanno i valori di VMA maggiori hanno poi i valori di VFB minori.

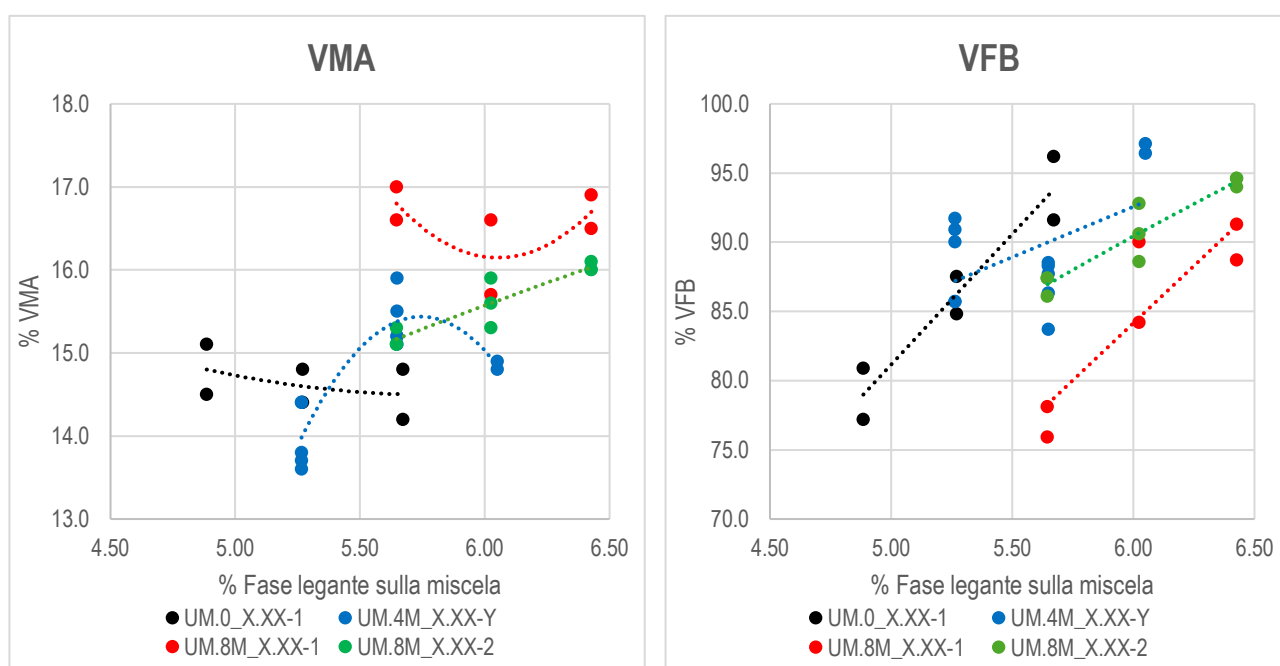


Figura 79. VMA e VFB delle miscele contenenti M

Analizzando invece il grafico di VMA delle miscele contenenti R riportato in Figura 80, si può osservare che, tralasciando la curva relativa a UM.0_X.XX-1 che è stata spiegata in precedenza, le altre due curve relative a UM.4R_X.XX-Y e UM.8R_X.XX-1 presentano andamenti non coerenti con la teoria di VMA, dal momento che sono due parabole con concavità rivolta verso il basso.

Osservando i valori ottenuti di VMA, si può osservare che le miscele con 0.8% di WP presentano i valori maggiori, seguite poi da quelle con 0.4% e quelle senza WP; i valori crescenti di VMA passando da UM.0_X.XX-1 a UM.8R_X.XX-1 possono essere dovuti al fatto che aumenta il volume di bitume nella miscela, confermando la teoria secondo cui R si comporta come legante e che tenda a legare maggiormente gli aggregati.

Passando invece allo studio di VFB dei conglomerati con R, si può osservare che l'andamento delle curve risulta essere monotono crescente, in linea con quanto riportato nella teoria. I valori ottenuti mostrano che, a parità di fase legante, VFB delle miscele con 0.8% di WP sono minori rispetto alle altre, in coerenza con quanto detto per il comportamento della plastica come fase legante, dal momento che esse presentano i valori di VMA maggiori.

Sia nel caso con M che con R, si osserva che l'aggiunta del polimero nella miscela in quantità pari a 0.8% influenza in maniera evidente VMA, ottenendo valori maggiori rispetto agli altri casi che, invece, risultano essere più simili.

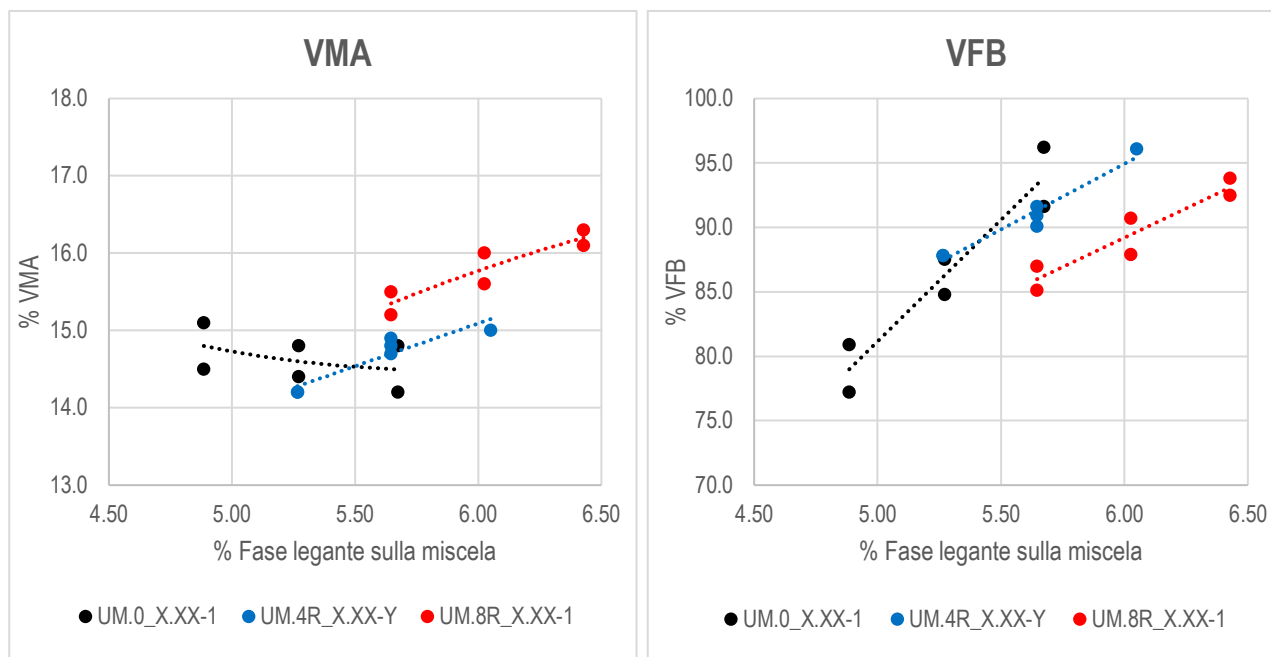


Figura 80. VMA e VFB delle miscele contenenti R

4.2.3 Curve di compattazione

L'analisi delle curve di compattazione serve per capire se e come i materiali polimerici introdotti nei conglomerati influiscono sulla compattazione del materiale una volta che, dopo esser stato inserito nelle fustelle, viene introdotto nella pressa taglio-giratoria per essere compattato.

Per analizzare l'influenza delle WP ci si è avvalsi dell'utilizzo del software Matlab con cui sono stati realizzati una serie di grafici in cui si è analizzato l'effetto dell'introduzione delle plastiche da rifiuto nei conglomerati (nelle percentuali di bitume di apporto pari a 4.19%, 4.61%, 5.06%); l'analisi è stata fatta sia in termini di percentuale di vuoti che in termini di pendenza della retta di compattazione delle varie miscele realizzate.

Nei grafici riportati in Figura 81 è possibile analizzare l'effetto dovuto all'aggiunta delle plastiche M. Osservando i 3 grafici a sinistra è possibile affermare che, con una percentuale di bitume pari al 4.19%, si riscontrano importanti variazioni di percentuali di vuoti tra le miscele con 0.4% e le miscele con 0.8% di WP, con i primi che risultano essere inferiori rispetto ai secondi, mentre invece a 4.61% e 5.06% non si hanno grandi variazioni di valori e le curve tendono a sovrapporsi. Questi risultati possono essere anche analizzati nei grafici visti nel paragrafo 4.2.1, dove si può notare come i punti, a 4.19%, siano distanti tra loro, mentre man mano che il contenuto di bitume aumenta la differenza tende a diminuire, arrivando ad avere valori molto simili a 5.06% di legante. Questo comportamento è facilmente correlabile al contenuto di bitume, in quanto maggiore è il contenuto, maggiore è la presenza di bitume tra gli aggregati e minori sono gli interstizi tra aggregati.

Osservando invece i 3 grafici a destra, in cui si analizza la pendenza delle curve di compattazione dei materiali, si può notare che non vi sono grandi differenze tra le miscele con diverso contenuto di plastica, ma le curve tendono a sovrapporsi ed essere quasi coincidenti; questo risultato porta alla conclusione che, con l'aggiunta di plastiche M, non si verificano variazioni del processo di compattazione rispetto alle miscele senza WP e che il materiale plastico non altera il processo.

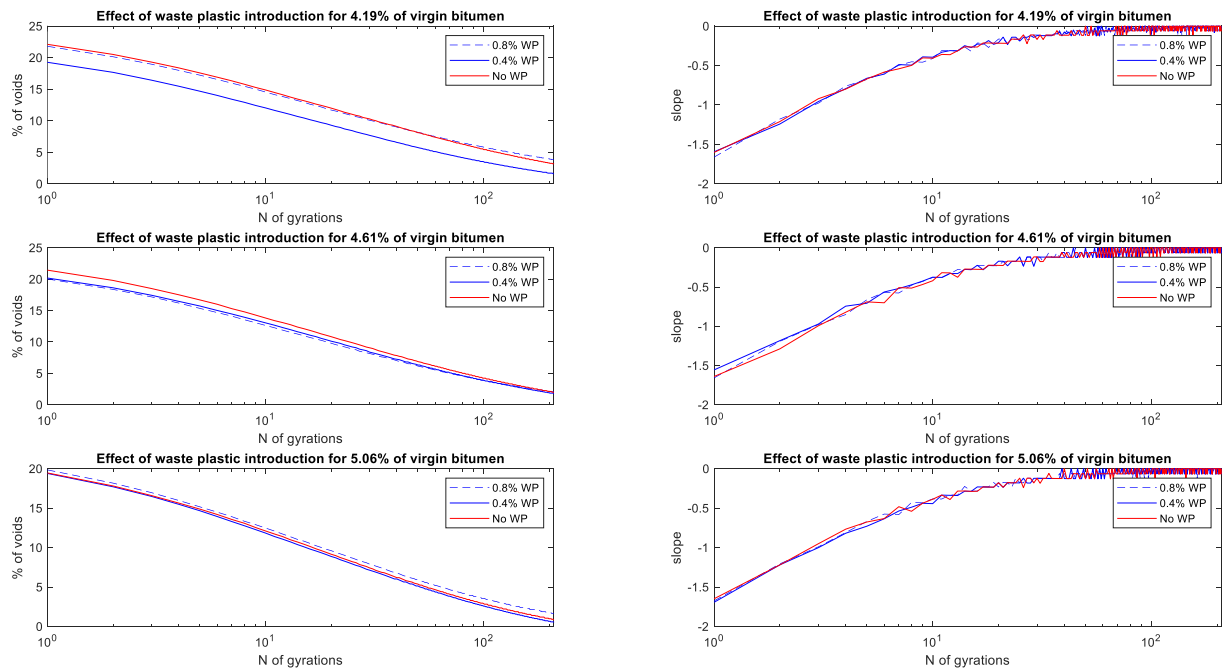


Figura 81. Effetto dell'introduzione delle plastiche M sulla miscela in termini di percentuali di vuoti e pendenza della curva di compattazione

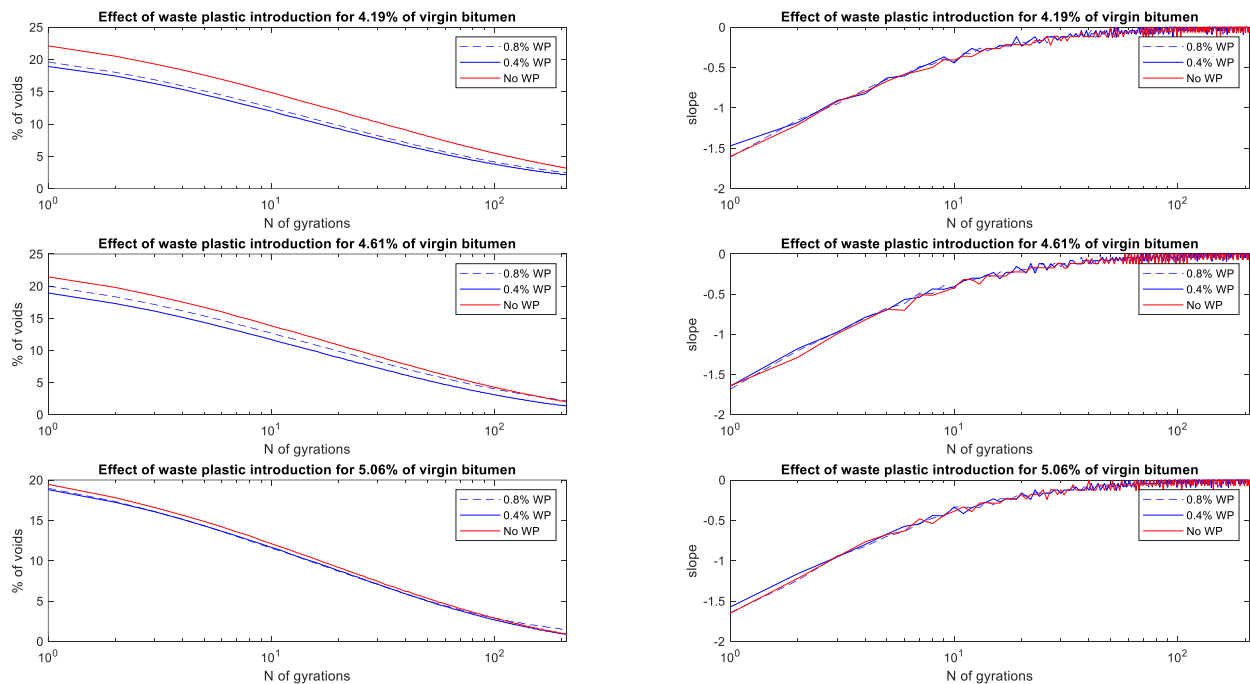


Figura 82. Effetto dell'introduzione delle plastiche R sulla miscela in termini di percentuali di vuoti e pendenza della curva di compattazione

Nei grafici riportati in Figura 82 è possibile analizzare l'effetto dovuto, in questo caso, all'aggiunta delle plastiche R. Analizzando i 3 grafici a sinistra si possono riscontrare effetti simili a quelli ottenuti con M: con una percentuale di bitume pari al 4.19% si riscontrano importanti variazioni di percentuali di vuoti tra le miscele con 0.4% e le miscele con 0.8% di WP, a 4.61% le variazioni sono meno marcate rispetto al punto precedente ma ancora evidenti, mentre a 5.06% non si hanno grandi variazioni di valori e le curve tendono a sovrapporsi. Come già visto per M, questi risultati possono essere anche analizzati nei grafici visti nel paragrafo 4.2.1, dove si ha un abbassamento dei valori dei vuoti all'aumentare del contenuto di bitume, e le differenze tra le percentuali tendono ad essere più accentuate a 4.19%, mentre man mano che il contenuto di bitume aumenta la differenza tende a diminuire, arrivando ad avere valori molto simili a 5.06% di legante. Anche in questo caso la causa dei valori ottenuti è facilmente riconducibile al quantitativo di bitume, in quanto maggiore è il contenuto, maggiore è la presenza di bitume tra gli aggregati e minori sono gli interstizi tra aggregati.

Osservando invece i 3 grafici a destra, in cui si analizza la pendenza delle curve di compattazione dei materiali, anche con le plastiche R si può notare che non vi sono grandi differenze tra le miscele con diverso contenuto di plastica, ma le curve tendono a sovrapporsi ed essere quasi coincidenti; anche con l'aggiunta di R, non si verificano variazioni del processo di compattazione rispetto alle miscele senza WP e il materiale plastico non altera il processo.

Nei grafici successivi è possibile osservare un confronto tra le pendenze di diverse miscele a diverso contenuto di bitume e diverso contenuto di WP, sia con M che con R, su scala maggiore. Osservando i plot presenti si può confermare quello che è stato detto in precedenza, ovvero che non vi sono grandi differenze tra le curve di compattazione e che non c'è alterazione del processo da parte del materiale polimerico. È importante specificare che nel grafico riportato in Figura 83 è presente la curva di compattazione relativa allo strato di Collegamento prodotta in impianto, la quale mostra un andamento differente rispetto a quelli relativi agli strati di Usura; il motivo è dovuto essenzialmente a un differente scheletro litico che influenza la compattazione della miscela.

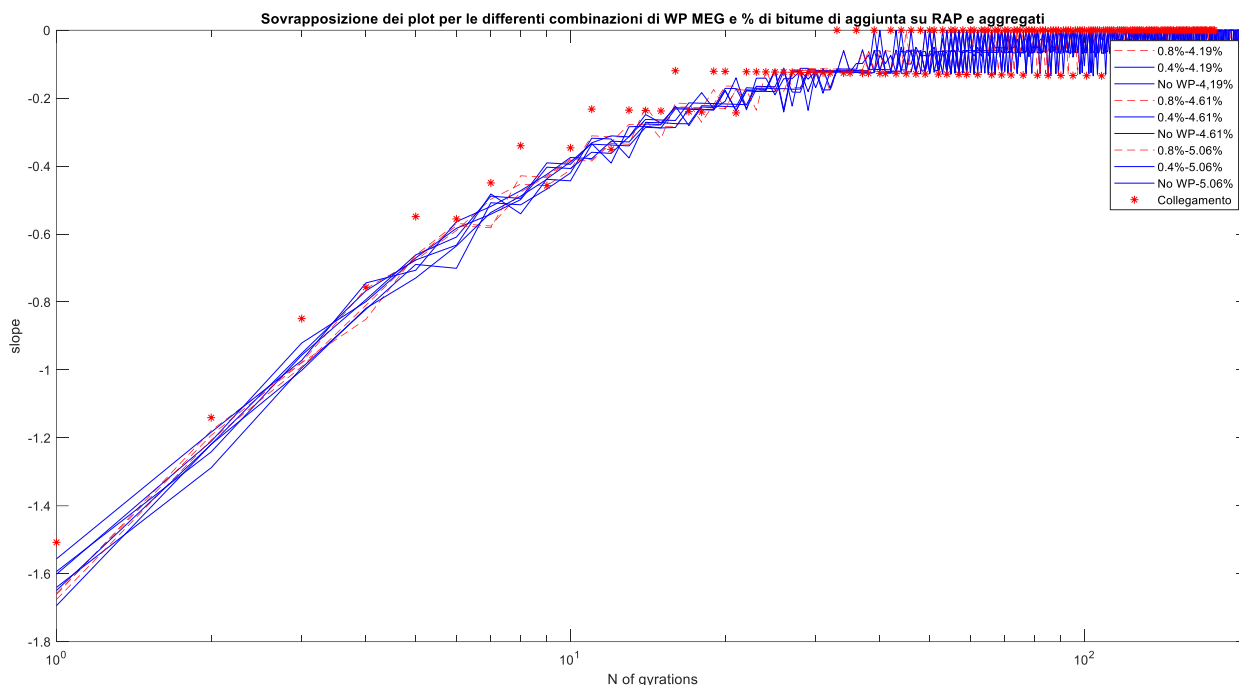


Figura 83. Curve di compattazione sovrapposte per diverse miscele con M

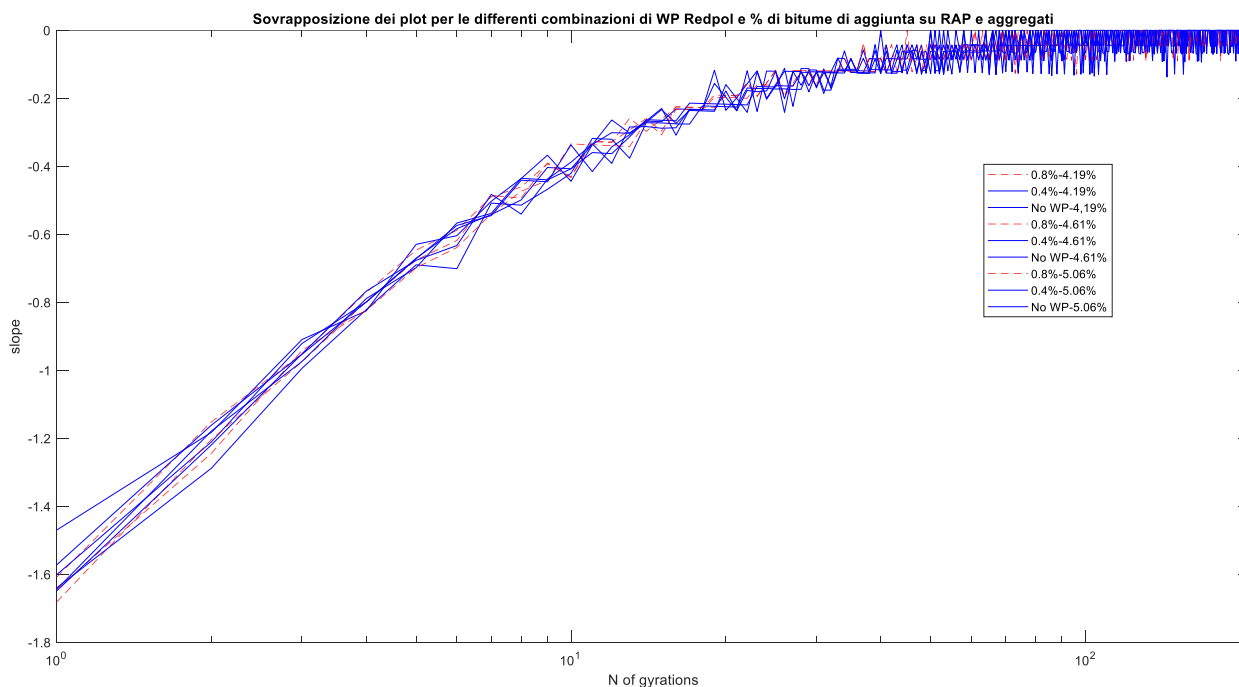


Figura 84. Curve di compattazione sovrapposte per diverse miscele con R

4.3 Caratteristiche meccaniche

Così come le proprietà volumetriche, anche le caratteristiche meccaniche hanno una rilevanza molto importante nella progettazione e produzione dei conglomerati bituminosi, dal momento che nel Capitolo ANAS sono presenti una serie di prescrizioni riguardanti proprio le proprietà meccaniche.

Così come fatto nel paragrafo 4.2, nei grafici non saranno presenti i valori relativi alle miscele UI.0_5.06-1 e UL.0_5.60-1; inoltre, come già accennato in precedenza nella spiegazione dei risultati dei valori di VMA e VFB, anche nello studio delle proprietà meccaniche sono stati presi i valori di alcuni campioni, i quali risultano essere gli stessi utilizzati per le caratteristiche volumetriche.

Nelle due tabelle successive sono riportati i valori delle caratteristiche meccaniche dei campioni contenenti M e R e, come stato fatto per l'analisi delle caratteristiche volumetriche, anche in questo caso sono stati selezionati alcuni campioni delle miscele realizzate, mentre altri non sono stati considerati perché "outlier".

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Proprietà meccaniche			Plot
						Stiffness [MPa]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.565	252.4	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.555	223.1	
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5199	1.554	157.6	
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5180	1.706	304.8	
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3613	1.254	102.4	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3853	1.436	269.7	OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3510	1.375	143.8	OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3634	1.353	133.8	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3588	1.511	256.6	OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3427	1.314	167.9	OK
UM.4M 4.19-1-1	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5233	1.764	253.5	
UM.4M 4.19-1-2	UM.4M 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	4752	1.589	152.3	
UM.4M 4.19-2-1	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	3811	1.524	213.5	OK
UM.4M 4.19-2-2	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	4088	1.511	191.4	
UM.4M 4.19-2-3	UM.4M 4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	4264	1.606	234.2	OK
UM.4M 4.61-1-1	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3988	1.472	166.9	OK
UM.4M 4.61-1-2	UM.4M 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3366	1.248	127.0	
UM.4M 4.61-2-1	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3663	1.370	164.0	OK
UM.4M 4.61-2-2	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3523	1.306	136.2	OK
UM.4M 4.61-2-3	UM.4M 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4282	1.377	128.1	
UM.4M 5.06-1-1	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3855	1.524	169.0	OK
UM.4M 5.06-1-2	UM.4M 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3675	1.527	181.6	OK
UM.8M 4.19-1-1	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	5403	1.736	321.9	OK
UM.8M 4.19-1-2	UM.8M 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	4214	1.676	334.5	OK
UM.8M 4.61-1-1	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4816	1.704	197.5	
UM.8M 4.61-1-2	UM.8M 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4485	1.507	155.4	OK
UM.8M 5.06-1-1	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4404	1.558	196.8	OK
UM.8M 5.06-1-2	UM.8M 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4450	1.589	208.0	OK
UM.8M 4.19-2-1	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	4521	1.563	195.0	OK
UM.8M 4.19-2-2	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	4948	1.651	233.9	OK
UM.8M 4.19-2-3	UM.8M 4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	6021	1.803	274.0	OK
UM.8M 4.61-2-1	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	3457	1.443	203.5	OK
UM.8M 4.61-2-2	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	4386	1.723	295.4	OK
UM.8M 4.61-2-3	UM.8M 4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	4367	1.501	152.9	
UM.8M 5.06-2-1	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	3545	1.461	165.1	OK
UM.8M 5.06-2-2	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	4484	1.635	182.4	OK
UM.8M 5.06-2-3	UM.8M 5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	4340	1.595	212.3	OK
UL.8M 5.60-1-1	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	2821	1.277	137.5	
UL.8M 5.60-1-2	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	2970	1.348	128.6	
UL.8M 5.60-1-3	UL.8M 5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	3138	1.371	127.0	

Tabella 40. Elenco dei campioni contenenti M selezionati per Proprietà Meccaniche

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Proprietà meccaniche			Plot
						Stiffness [MPa]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	
UI.0 5.06-1-1	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.565	252.4	
UI.0 5.06-1-2	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.555	223.1	
UI.0 5.06-1-3	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5199	1.554	157.6	
UI.0 5.06-1-4	UI.0 5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5180	1.706	304.8	
UM.0 5.06-1-1	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3588	1.511	256.6	OK
UM.0 5.06-1-2	UM.0 5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3427	1.314	167.9	OK
UM.0 4.19-1-1	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3613	1.254	102.4	OK
UM.0 4.19-1-2	UM.0 4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3853	1.436	269.7	OK
UM.0 4.61-1-1	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3510	1.375	143.8	OK
UM.0 4.61-1-2	UM.0 4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3634	1.353	133.8	OK
UM.4R 4.19-1-1	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5489	1.753	238.4	OK
UM.4R 4.19-1-2	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	4857	1.687	245.6	OK
UM.4R 4.19-1-3	UM.4R 4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5069	1.690	267.4	
UM.4R 4.61-1-1	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3876	1.362	158.0	
UM.4R 4.61-1-2	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3578	1.244	132.8	
UM.4R 4.61-1-3	UM.4R 4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	4022	1.374	150.0	
UM.4R 4.61-2-1	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3876	1.431	200.3	OK
UM.4R 4.61-2-2	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4027	1.446	172.9	OK
UM.4R 4.61-2-3	UM.4R 4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4043	1.387	190.4	OK
UM.4R 5.06-1-1	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3357	1.306	166.7	
UM.4R 5.06-1-2	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3570	1.326	130.9	OK
UM.4R 5.06-1-3	UM.4R 5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3830	1.440	167.0	
UM.8R 4.19-1-1	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	3842	1.677	254.0	OK
UM.8R 4.19-1-2	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	3019	1.481	192.2	OK
UM.8R 4.19-1-3	UM.8R 4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	4351	1.579	230.2	
UM.8R 4.61-1-1	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02		1.494	211.6	OK
UM.8R 4.61-1-2	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4213	1.524	211.6	OK
UM.8R 4.61-1-3	UM.8R 4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4236	1.375	168.3	
UM.8R 5.06-1-1	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4202	1.450	183.4	OK
UM.8R 5.06-1-2	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4179	1.466	188.9	OK
UM.8R 5.06-1-3	UM.8R 5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	3658	1.364	156.2	

Tabella 41. Elenco dei campioni contenenti R selezionati per Proprietà Meccaniche

Anche in questo caso, i valori di ITS e CTI che rispettano i limiti stabiliti da Capitolato ANAS presentano una cella di colore verde, mentre con la cella di colore rosso sono contrassegnati i valori che non rispettano le prescrizioni.

È importante far notare che in alcune caselle non sono presenti valori del Modulo di Rigidezza (indicato nelle tabelle con il termine *Stiffness*): la ragione sta nel fatto che il secondo valore ottenuto per quel campione non rientra nell'intervallo tra +10% e -20% del primo valore calcolato, per cui il valore medio è stato rigettato.

4.3.1 Modulo di Rigidezza

Come ben risaputo, il Modulo di Rigidezza è una grandezza che esprime il rapporto tra la tensione che si sviluppa nel materiale in seguito all'applicazione di un carico e la sua relativa deformazione, in caso di condizioni di carico monoassiale e comportamento di tipo "elastico" del materiale. In funzione delle definizioni di tensione e deformazione, si può definire anche come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che ne consegue.

Iniziando dallo studio delle miscele contenenti M, nei grafici successivi sono riportati i risultati ottenuti dalla prova effettuata nella macchina UTM-30. Dalle curve riportate si possono trarre i seguenti risultati.

- A parità di percentuale di bitume, le miscele contenenti WP presentano moduli di rigidezza maggiori rispetto alla miscela senza WP; si può dire che l'aggiunta di plastica aumenta la rigidezza del conglomerato bituminoso, con conseguente aumento delle proprietà meccaniche, diventando più rigido e resistente alle deformazioni.
- Le miscele con M a 0.8% mostrano una rigidezza superiore rispetto alla miscela con M a 0.4%; ciò indica che c'è una proporzionalità diretta tra la quantità di plastica aggiunta e

l'aumento della rigidezza: maggiore è il quantitativo percentuale di plastica, maggiore è l'irrigidimento del conglomerato.

- All'aumentare del contenuto di bitume si ha una diminuzione della rigidezza per tutte le miscele riportate nei grafici; questo comportamento è normale per i conglomerati bituminosi, dal momento che la miscela tende a diventare meno rigida e più duttile all'aumentare del contenuto di bitume, e ciò potrebbe influire negativamente sulla resistenza alle deformazioni permanenti.

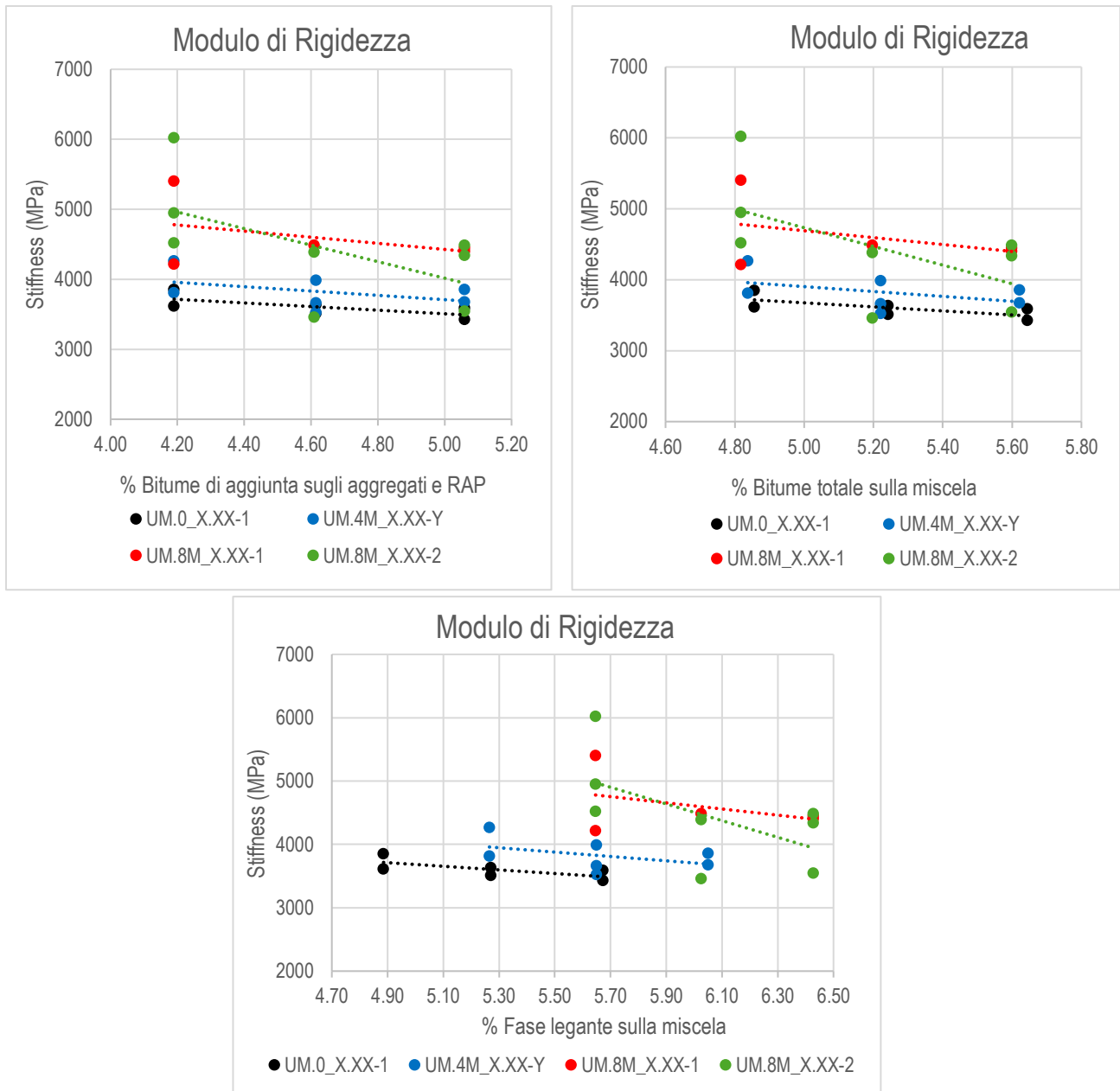


Figura 85. Modulo di Rigidezza delle miscele contenenti M

Passando allo studio del Modulo di Rigidezza delle miscele contenenti R, analizzando i grafici si possono trarre le seguenti conclusioni.

- Le tendenze ottenute risultano essere parecchio differenti rispetto a quelle ottenute per le miscele contenenti M; a basse percentuali di bitume, il conglomerato con 0.4% WP è più rigido rispetto alla miscela senza WP e anche, soprattutto, rispetto a quella con 0.8% WP,

che mostra i valori di rigidezza minori; questo potrebbe essere dovuto a una eccessiva viscosità della miscela con 0.8% WP.

- Con valori di bitume pari a 4.61% i valori risultano essere simili tra loro;
- Ad alte percentuali di bitume, invece, la miscela con 0.8% di WP è più rigida rispetto alle altre due miscele.

I risultati ottenuti per i conglomerati contenenti R risultano essere parecchio diversi, dovuto probabilmente alla diversa natura del polimero o da altri fattori; in particolare, risulta essere molto interessante il trend relativo alla miscela UM.8R_X.XX-1, in quanto è l'unica di tutte quelle prodotte che mostra un aumento del valore del modulo di rigidezza all'aumentare del contenuto di bitume, il quale risulta essere un po' in contrasto con quanto detto prima, ovvero che all'aumentare del contenuto di legante diminuisce la rigidezza. Questa variazione di andamento dei risultati di UM.8R_X.XX-1 potrebbe essere dovuta alle temperature di miscelazione che influiscono sul comportamento della plastica in relazione al quantitativo presente di essa.

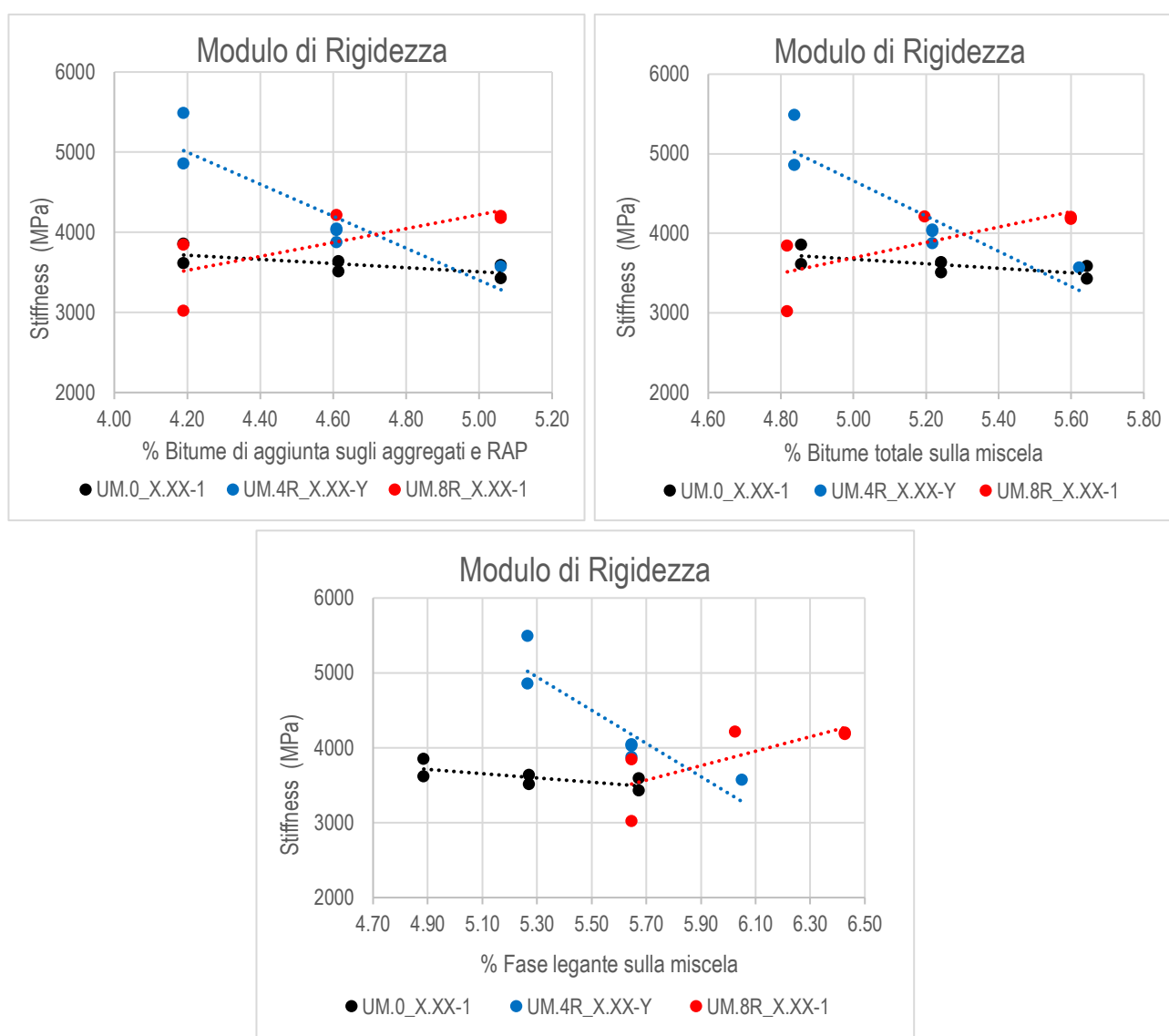


Figura 86. Modulo di Rigidezza delle miscele contenenti R

Nei due grafici successivi è invece possibile osservare un confronto diretto tra i moduli di rigidezza delle miscele, a parità di contenuto di plastica; da essi si può notare come la plastica M permetta

di avere moduli di rigidezza maggiori, eccezion fatta per il caso delle miscele con 0.4% di WP e contenuto di bitume di apporto su aggregati e RAP pari a 4.19%.

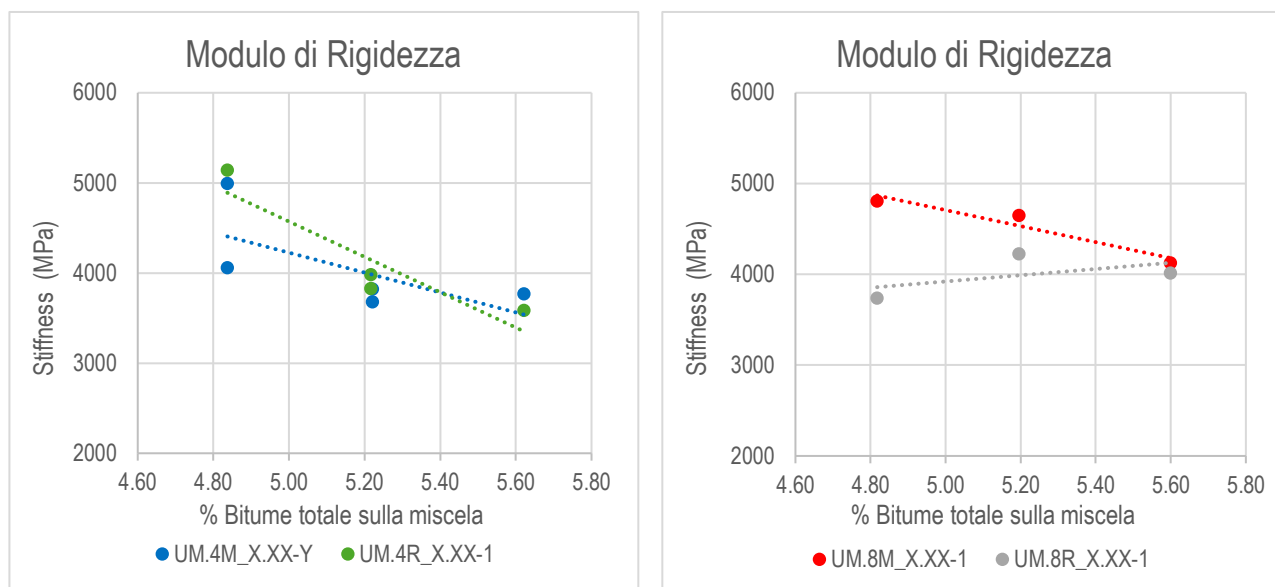


Figura 87. Confronto Modulo di Rigidezza

4.3.2 Resistenza a Trazione Indiretta

La Resistenza a Trazione Indiretta è un parametro importante nella progettazione e realizzazione delle miscele, in quanto esso deve rispettare certi valori limite prescritti da ANAS e riportati nel proprio Capitolato; in particolare, nel caso dello strato di usura, il valore di RTI/ITS deve essere compreso tra 0.72 MPa e 1.60 MPa.

I valori che sono stati utilizzati per la realizzazione dei grafici sono quelli riportati nella Tabella 40 e Tabella 41; nonostante nelle due tabelle siano anche presenti i valori di CTI (Coefficiente a Trazione Indiretta), essi non sono stati presi in considerazione nella realizzazione dei grafici, in quanto risulta essere di maggiore interesse lo studio di ITS, il quale, insieme al Modulo di Rigidezza, rappresenta la caratteristica meccanica più importante nella progettazione e realizzazione di conglomerati bituminosi.

Cominciando dall'analisi dei valori di ITS ottenuti per le miscele contenenti la plastica M, si possono trarre le seguenti considerazioni.

- Le miscele con WP mostrano valori di ITS superiori rispetto alla miscela senza WP (nero); in particolare, le miscele con 0.8% di WP sono quelle che raggiungono i valori più elevati, superando sia la miscela senza plastica sia quella con lo 0.4% di WP.
- La miscela di riferimento (curva nera) mostra i valori di ITS più bassi di tutto il grafico, con il trend che risulta essere crescente all'aumentare del contenuto di bitume; ciò indica che senza l'additivo plastico, la miscela ha una coesione e resistenza inferiori.
- Aggiungendo lo 0.4% di WP si ha un evidente miglioramento dell'ITS rispetto alla miscela senza plastica, ma i valori ottenuti mostrano che, all'aumentare del contenuto di legante, si ha una riduzione del valore di ITS.

- Anche con l'aggiunta di 0.8% di plastica si ha un miglioramento del valore di ITS (si raggiungono i valori più alti), ma anche in questo caso all'aumentare del contenuto di legante si ha una riduzione di ITS.

Tutto ciò porta ad affermare che l'aumento della percentuale di plastica, da 0% a 0.4% fino a 0.8%, porta a un progressivo e significativo miglioramento dei valori di ITS, con massimo beneficio in termini di ITS in corrispondenza dello 0.8% di plastica.

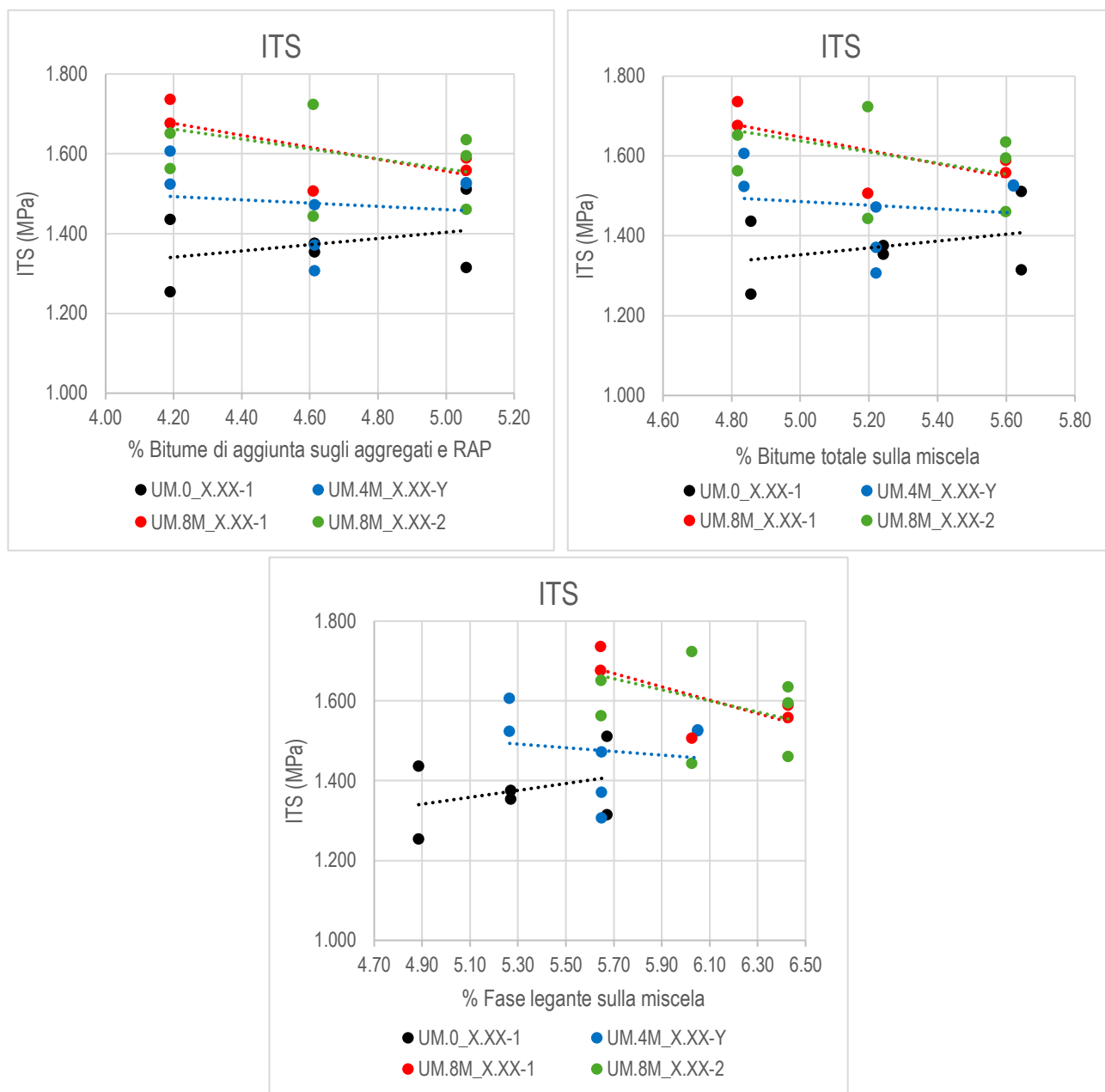


Figura 88. ITS delle miscele contenenti M

Passando all'analisi delle miscele contenenti R, anche in questo caso, come visto per il Modulo di Rigidezza, i risultati non risultano essere regolari come nel caso dei conglomerati con M. Infatti:

- Se con l'aggiunta di 0.8% di WP si ha un aumento dei valori di ITS rispetto alla miscela senza plastica, ciò non si può dire per quelle con 0.4% di WP, perché ad alti valori percentuali di bitume i valori di ITS risultano essere i più bassi del lotto.

- Con valori percentuali di bitume bassi (4.19% di bitume di aggiunta), i valori di ITS delle miscele con plastiche sono maggiori rispetto a quelli della miscela di riferimento (in linea con quanto visto anche precedentemente con M).
- Quando il valore di bitume è pari al 4.61% i valori di ITS delle miscele con 0.4% di WP si abbassano drasticamente, mentre con lo 0.8% di WP i valori continuano a essere elevati e superiori alla miscela senza WP.
- Per valori percentuali di bitume più alti i valori di ITS si abbassano ancora di più, con la miscela con 0.4% che mostra i valori più bassi e quella con 0.8% di WP che mostra valori simili a quelli della miscela di riferimento.
- Anche in questo caso, all'aumentare del contenuto di bitume si abbassa il valore di ITS.

Si può dire che il polimero R influisce in una maniera molto diversa rispetto a M per quanto riguarda le proprietà meccaniche; tutto questo potrebbe essere dovuto alla natura del polimero.

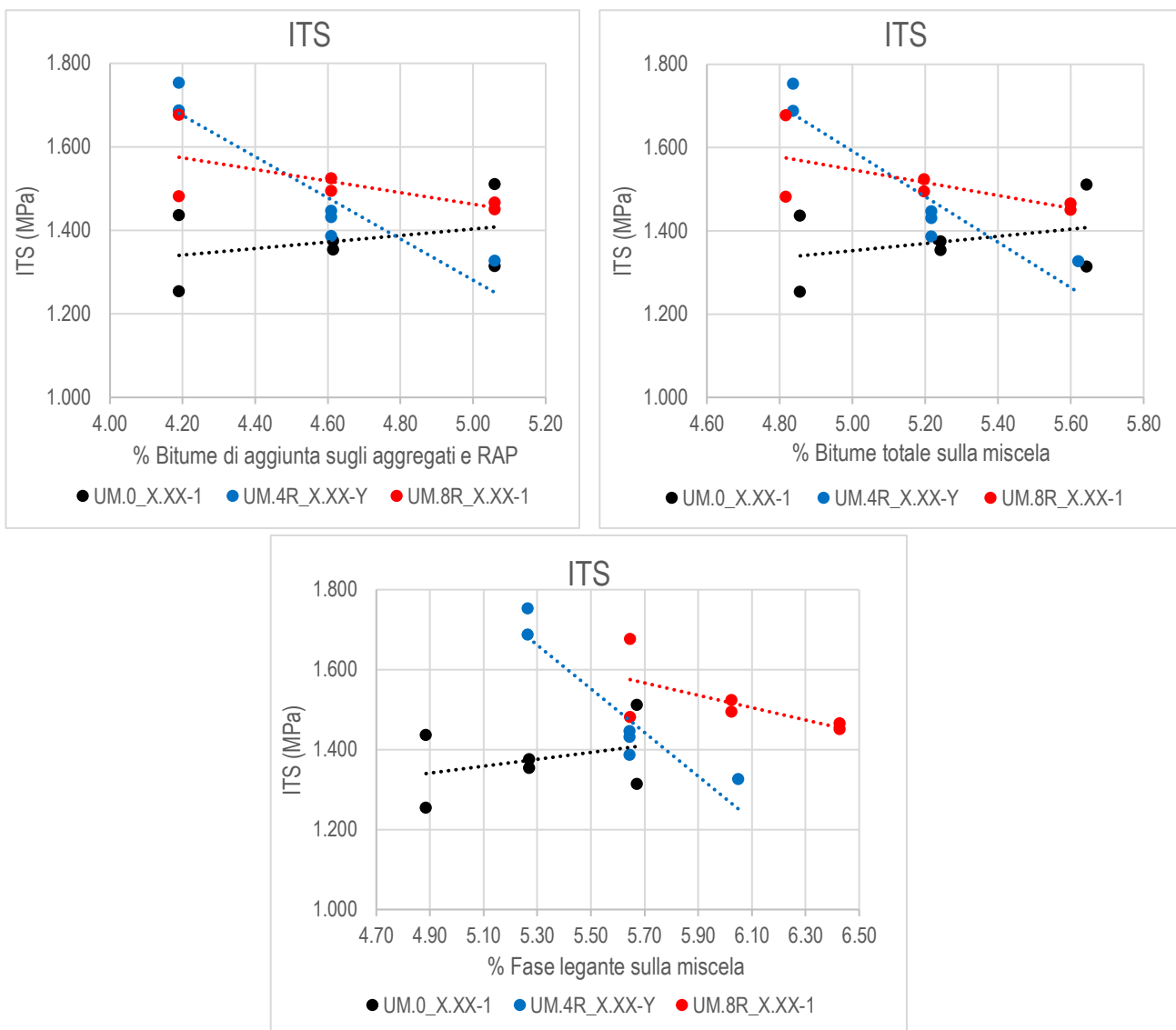


Figura 89. ITS delle miscele contenenti R

Nei due grafici successivi è possibile osservare un confronto diretto tra i valori di ITS delle miscele, a parità di contenuto di plastica; da essi si può notare come, eccezion fatta per il caso di UM.4R_X.XX-Y in cui la pendenza della retta risulta essere importante, negli altri casi le pendenze

delle rette di tendenza risultano essere non importanti, sinonimo del fatto che i valori alle diverse percentuali di bitume non si discostano tanto.

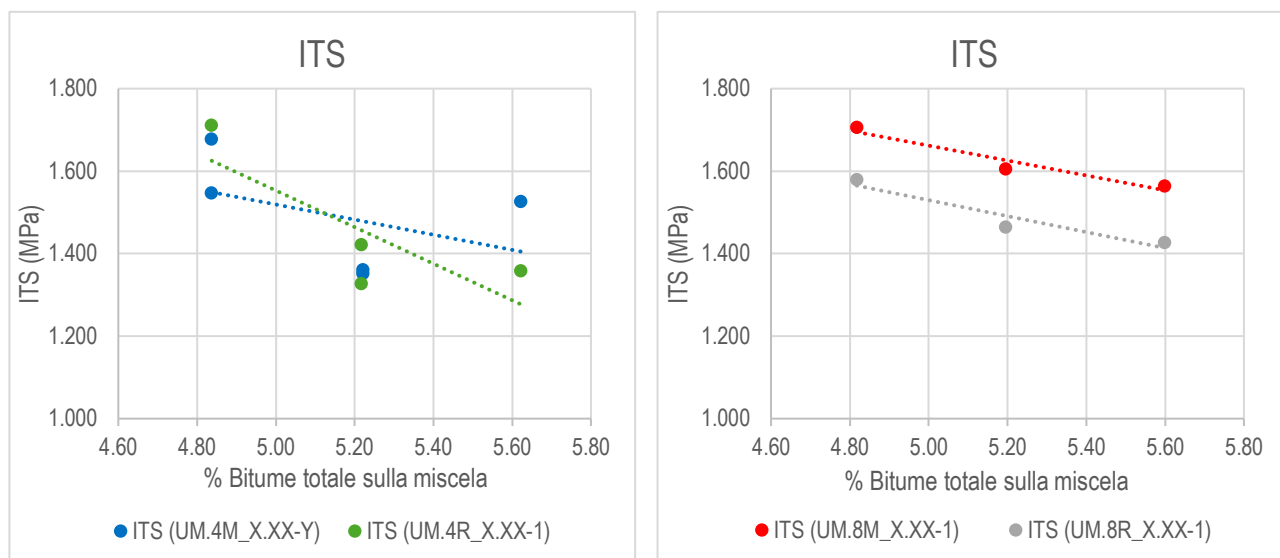


Figura 90. Confronto ITS

4.4 Definizione delle miscele ottimali

Dopo aver analizzato tutti i dati riguardanti la composizione, le caratteristiche volumetriche e meccaniche delle miscele progettate e realizzate in laboratorio, oltre a quella di riferimento senza plastica prodotta in impianto, si passa a determinare le miscele ottimali dello strato di usura con 3 diversi contenuti di plastica (0%, 0.4% e 0.8%) che continueranno a essere oggetto di studio.

La prima cosa che è stata fatta è stata quella di definire, per tutte le miscele prodotte con M e R, il contenuto ottimale di bitume con i diversi dosaggi di plastica, e successivamente si è passati alla definizione delle miscele di riferimento, la cui determinazione è stata fatta considerando principalmente la percentuale di vuoti.

Partendo dalle miscele contenenti M, nei grafici successivi sono stati ripresi i valori di percentuale di vuoti a 10, 120 e 210 rotazioni in cui sono stati inseriti i valori limite da Capitolato ANAS.

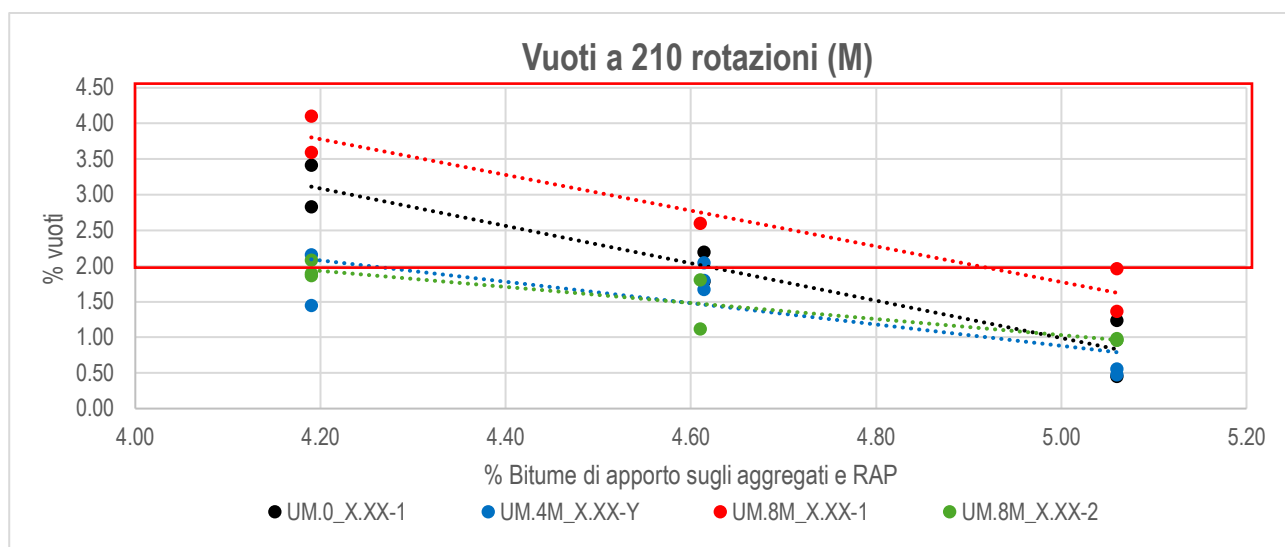


Figura 91. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscela M con valori limite da Capitolato ANAS (>2%)

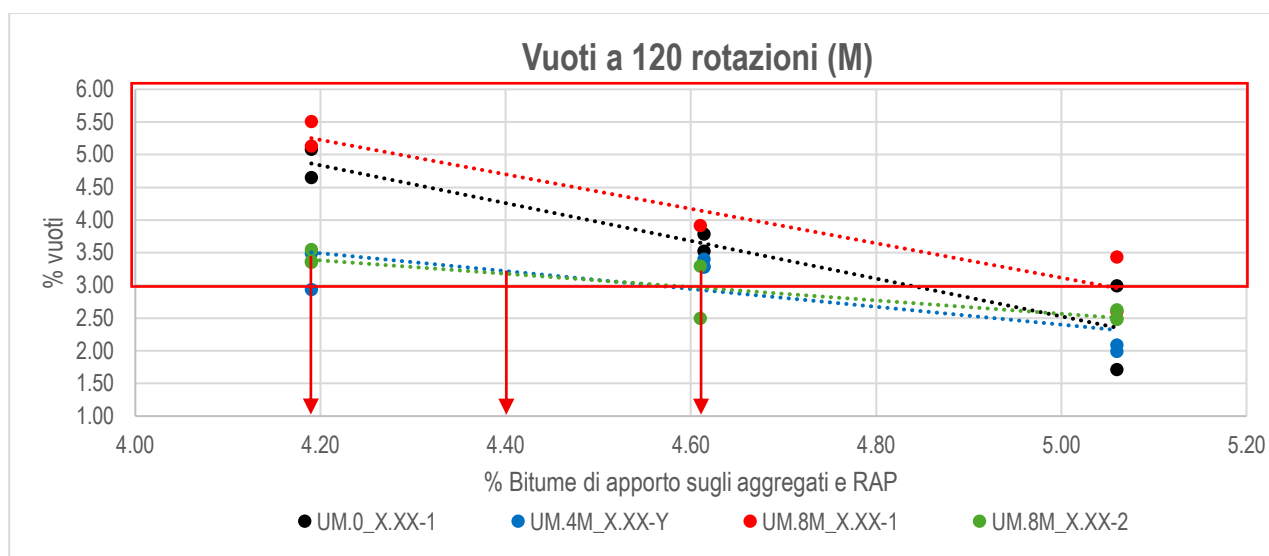


Figura 92. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscela M con valori limite da Capitolato ANAS (3%-6%)

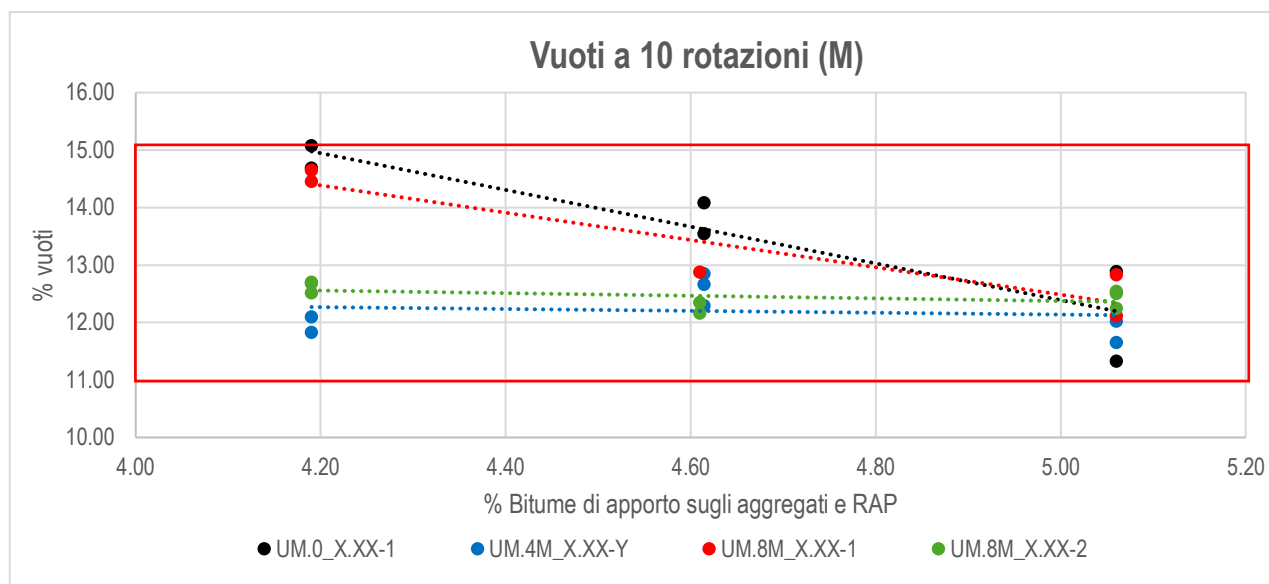


Figura 93. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscela M con valori limite da Capitolato ANAS (11%-15%)

Analizzando i valori, in particolar modo quelli ottenuti a 120 rotazioni (N_{design}), scegliendo come target una %v pari a 3.5%, come contenuti ottimali di bitume sono stati selezionati rispettivamente:

- 4.19% per le miscele con 0.8% di WP;
- 4.40% per le miscele con 0.4% di WP;
- 4.61% per le miscele senza WP.

In funzione di questi contenuti ottimali, le miscele di riferimento risultano essere le seguenti:

- UM.0M_4.61;
- UM.4M_4.40;
- UM.8M_4.19.

Passando ai conglomerati contenenti R, nei grafici successivi sono stati ripresi i valori di percentuale di vuoti a 10, 120 e 210 rotazioni in cui sono stati inseriti i valori limite da Capitolato ANAS.

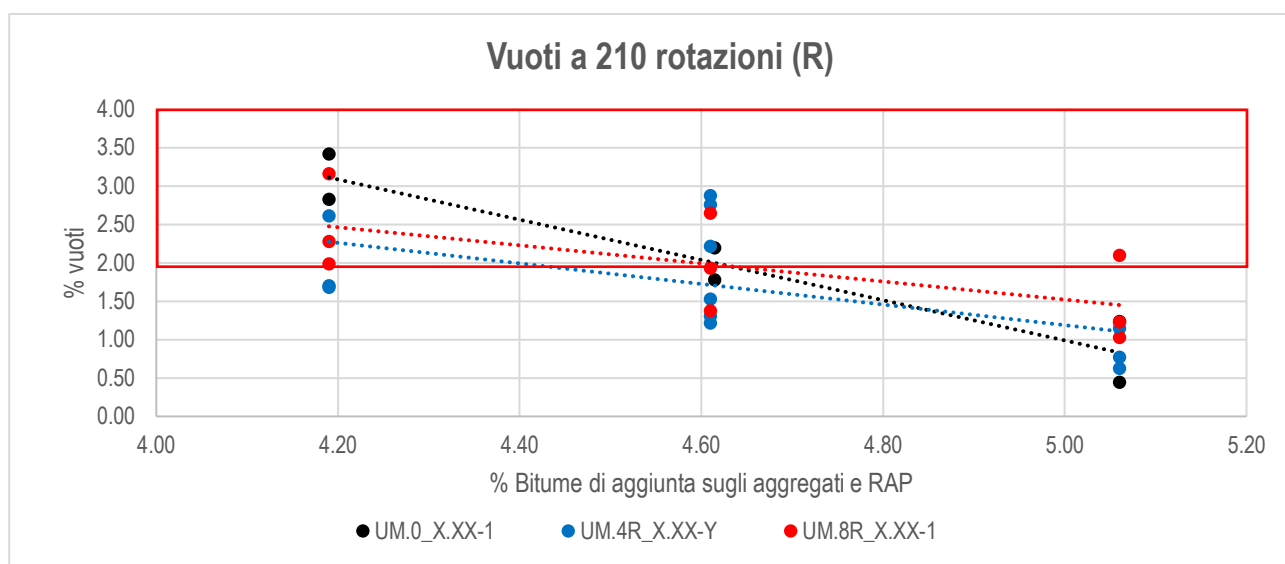


Figura 94. Percentuale di vuoti a 210 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (>2%)

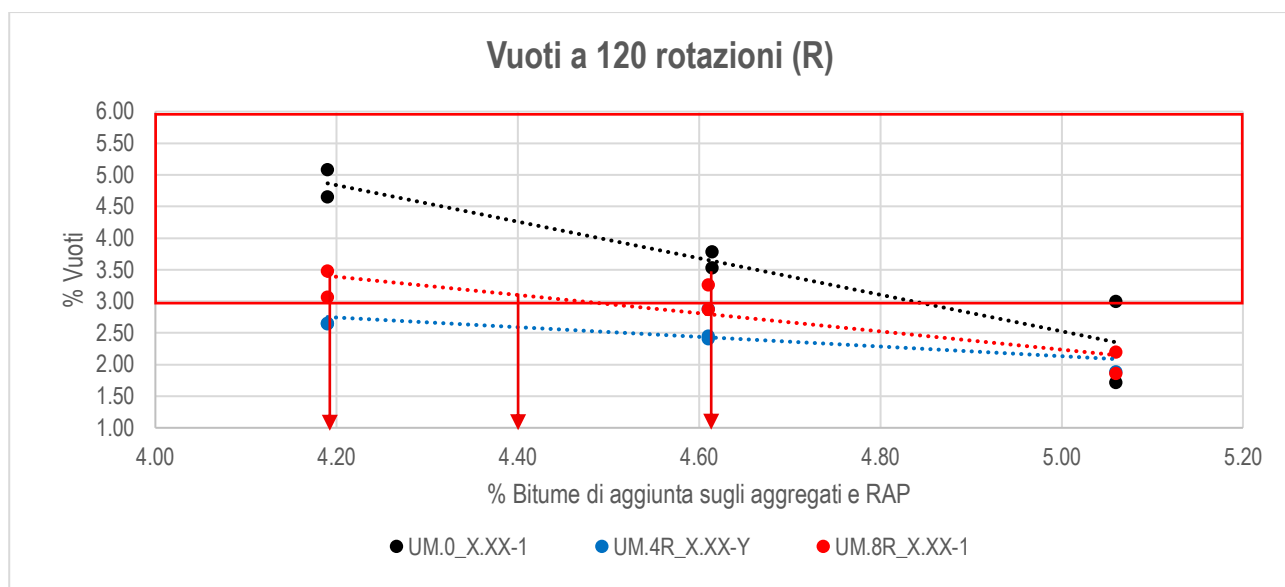


Figura 95. Percentuale di vuoti a 120 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (3%-6%)

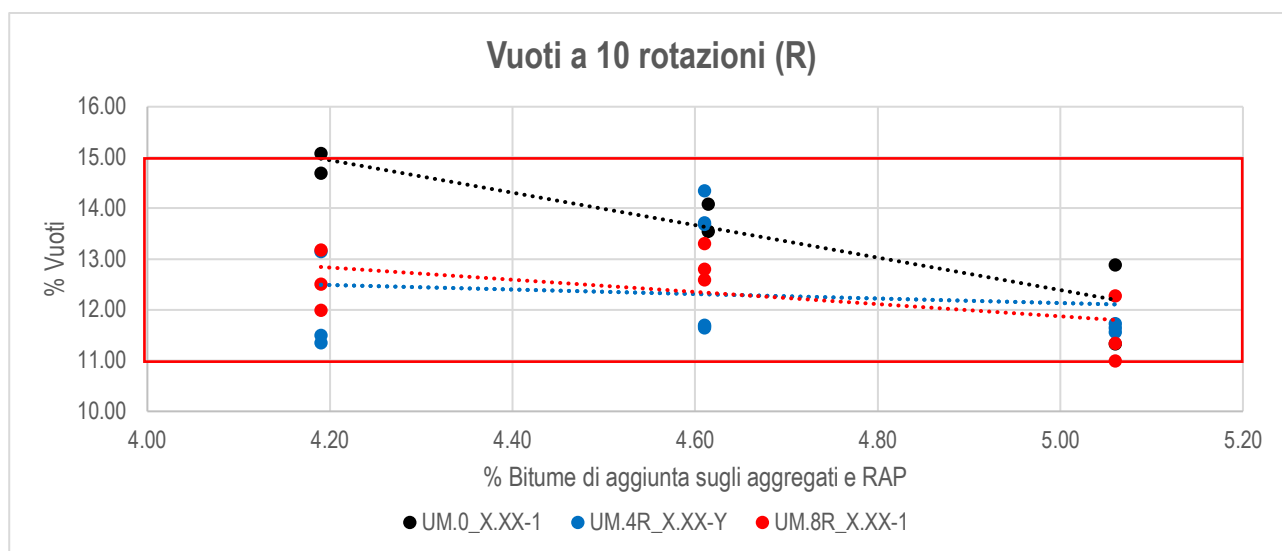


Figura 96. Percentuale di vuoti a 10 rotazioni miscele R con valori limite da Capitolato ANAS (11%-15%)

Analizzando i valori, in particolar modo quelli ottenuti a 120 rotazioni (N_{design}), scegliendo come target una %v pari a 3.5%, come contenuti ottimali di bitume sono stati selezionati rispettivamente:

- 4.19% per le miscele con 0.8% di WP;
- 4.40% per le miscele con 0.4% di WP;
- 4.61% per le miscele senza WP.

In funzione di questi contenuti ottimali, le miscele di riferimento risultano essere le seguenti:

- UM.0R_4.61;
- UM.4R_4.40;
- UM.8R_4.19.

Nella determinazione delle miscele ottimali è importante definire quale tipologia di plastica da rifiuto utilizzare; dopo analisi dei risultati ottenuti, revisioni sul materiale plastico a disposizione e alcune riflessioni, si è deciso di optare per l'utilizzo delle plastiche M. Le ragioni dietro tale scelta sono riportate di seguito.

- A livello di granulometria, le plastiche M presentano dimensioni maggiori rispetto a R, con la possibilità di un loro utilizzo all'interno dei conglomerati in sostituzione di una parte degli aggregati (in particolare le particelle che vanno da 8mm a 2mm); questo è rafforzato anche dal fatto che, durante le prove effettuate per valutare l'interazione delle plastiche con gli aggregati, si è notato che una parte della frazione fusa ingloba e agglomera le plastiche inerti, comportandosi come aggregato, a differenza di R dove tutto il materiale fuso unisce le particelle fungendo da legante;
- A livello di caratteristiche volumetriche, le miscele con 0.8% di plastica M presentano valori maggiori rispetto a R, rispettando con più facilità i valori limite presenti nel Capitolato ANAS; a 0.4% le curve sono molto simili.
- Se per VFB i trend sono tutti monotoni crescenti e si rispetta la teoria, ciò non si può dire di VMA, con le miscele R che non risultano essere coerenti con gli aspetti teorici di VMA sia con 0.4% che con 0.8% di plastica, mentre con M a 0.8% si ottiene una parabola con concavità rivolta verso l'alto e tutto viene rispettato (a 0.4% invece non si rispetta).
- Per le caratteristiche meccaniche la presenza di M nei conglomerati permette di ottenere valori di Modulo di Rigidezza e ITS maggiori rispetto alla miscela senza WP, con curve chiari

e lineari, a differenza delle miscele R che mostrano andamenti non chiari e di difficile comprensione.

- La plastica R presenta un odore sgradevole allo stato naturale e, durante la lavorazione, può essere causa di rilascio di sostanze più pericolose rispetto a M; inoltre, R tende ad appiccicarsi al contenitore in cui viene messa a differenza di M, creando problemi durante la miscelazione, soprattutto se il contenitore fosse di acciaio.
- M rispetto a R ha un campo di applicazione come materiale da riciclo molto più grande.

Tutte queste ragioni hanno portato a scegliere M come materiale plastico definitivo, portando alla definizione delle seguenti miscele di riferimento.

- UM.0M_4.61;
- UM.4M_4.61;
- UM.8M_4.19.

Queste miscele saranno contraddistinte dalla lettera "D" dopo il numero indicante il lotto di produzione (visualizzabile nella Tabella 23 alle ultime 6 righe).

Una volta delineate le miscele di riferimento, esse sono state riprodotte in laboratorio (sempre con miscelazione a mano) e sono state sottoposte a una prova per valutare la suscettibilità all'acqua.



Figura 97. Panoramica dei campioni realizzati per le 3 miscele ottimali

4.5 Suscettibilità all'acqua

La suscettibilità all'acqua indica la tendenza di un materiale a reagire all'acqua, influenzando le sue proprietà e il suo comportamento; nel caso dei conglomerati bituminosi si può manifestare come la valutazione degli effetti negativi dell'acqua sulle prestazioni dei materiali stradali, valutato attraverso prove di resistenza e condizionamento.

Nel caso in questione, la valutazione della suscettibilità all'acqua viene fatta attraverso la determinazione dell'indice ITSR, il quale esprime la perdita di resistenza dovuta alla presenza d'acqua e viene calcolato come il rapporto tra i valori di ITS ottenuti su campioni bagnati e quelli ottenuti su campioni asciutti.

La norma a cui si fa riferimento per la determinazione di ITSR è la BS EN 12697-12, secondo cui esistono diversi metodi per valutare la suscettibilità all'acqua; il metodo che è stato preso in considerazione è il Metodo A, che consiste nella valutazione della resistenza a trazione indiretta

di provini di conglomerato bituminoso. I provini cilindrici che appartengono alla stessa miscela vengono suddivisi in due sottoinsiemi di uguali dimensioni e sottoposti a condizionamento. Un sottogruppo viene mantenuto asciutto, mentre l'altro sottogruppo subisce un trattamento che lo porta ad essere conservato in acqua; dopo il condizionamento, la resistenza a trazione indiretta di ciascuno dei due sottogruppi viene determinata a una temperatura di prova definita, a seconda del grado di bitume, e poi si determina il valore di ITSR di ogni miscela in percentuale.

I risultati ottenuti sono importanti per la valutazione delle prestazioni di un conglomerato bituminoso:

- *Valore ITSR elevato* (tendente a 1). Indica un'ottima resistenza del conglomerato all'azione dell'acqua; il legame tra bitume e aggregati non è compromesso dalla presenza dell'acqua, garantendo una maggiore durabilità della pavimentazione in presenza di umidità e pioggia. Un valore superiore a 0.80 è spesso considerato accettabile.
- *Valore ITSR basso*. Indica uno scarso legame tra bitume e aggregati in presenza di acqua; quest'ultima, penetrando nella miscela, tende a separare il bitume dagli aggregati, riducendo drasticamente la resistenza meccanica del conglomerato e causando un rapido degrado della pavimentazione.

Passando al processo adottato per la valutazione di ITSR, come già detto precedentemente, per ognuna delle 3 miscele ottimali sono stati realizzati due lotti "1D" e "2D", producendo 6 provini tra conglomerato 1D e 2D e ricavando in totale 18 provini, come mostrato in Figura 97.

Questi provini sono stati realizzati allo stesso modo di come è stato raccontato nel capitolo 3, eccezion fatta per la fase di compattazione che è stata fatta con un numero di giri massimo pari a 50, per cercare di ottenere una miscela più "aperta".

Successivamente, dopo aver determinato i valori delle altezze di ciascun campione e la Bulk Density, si è passati alla suddivisione dei provini in due sottoinsiemi per ognuna delle 3 miscele; questa suddivisione è stata fatta in funzione della percentuale di vuoti di ciascun provino.

Nella Tabella 42 sono riportati i valori di percentuale di vuoti a 10 e 50 rotazioni, per ogni campione, per ogni lotto di miscela e per ogni miscela intera (espresso come valore medio in questi ultimi due casi); inoltre, in essa è possibile individuare i campioni che hanno subito un condizionamento "asciutto" ($D=dry$) o "bagnato" ($W=wet$), contrassegnato da un colore grigio o azzurro.

Analizzando i risultati ottenuti si può notare come le miscele con 0.8% WP presentano i vuoti maggiori, seguita dalla miscela con 0.4% WP e poi da quella senza WP.

Per quanto concerne i valori di VMA e VFB i risultati sono coerenti con quanto visto nell'analisi dei valori ottenuti per tutte le miscele al paragrafo 4.2.2, dove i valori di VMA aumentano all'aumentare del contenuto di bitume ($0.8\% > 0.4\% > 0\%$), mentre VFB è più basso per UM.8M_4.19-D e aumenta per le miscele UM.0_4.61-D e UM.4M_4.61-D.

Test ID	Mix ID	WP.M [%]	BAA [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Condizionamento	Numero di rotazioni		Numero di rotazioni		Numero di rotazioni	
							10	50	10	50	10	50
UM.0M_4.61-1D-1	UM.0M_4.61-1D	0.00	4.61	5.24	5.27	W	10.97	4.22	11.60	5.06	11.74	5.21
UM.0M_4.61-1D-2	UM.0M_4.61-1D	0.00	4.61	5.24	5.27	W	11.91	5.61				
UM.0M_4.61-1D-3	UM.0M_4.61-1D	0.00	4.61	5.24	5.27	W	11.91	5.35				
UM.0M_4.61-2D-1	UM.0M_4.61-2D	0.00	4.61	5.24	5.27	D	11.19	4.64	11.88	5.35		
UM.0M_4.61-2D-2	UM.0M_4.61-2D	0.00	4.61	5.24	5.27	D	12.33	6.21				
UM.0M_4.61-2D-3	UM.0M_4.61-2D	0.00	4.61	5.24	5.27	D	12.11	5.21				
UM.4M_4.61-1D-1	UM.4M_4.61-1D	0.40	4.61	5.22	5.65	W	12.12	5.51	12.36	5.91	12.06	5.54
UM.4M_4.61-1D-2	UM.4M_4.61-1D	0.40	4.61	5.22	5.65	W	11.78	5.18				
UM.4M_4.61-1D-3	UM.4M_4.61-1D	0.40	4.61	5.22	5.65	D	13.18	7.04				
UM.4M_4.61-2D-1	UM.4M_4.61-2D	0.40	4.61	5.22	5.65	D	11.86	5.22	11.76	5.17		
UM.4M_4.61-2D-2	UM.4M_4.61-2D	0.40	4.61	5.22	5.65	D	11.65	5.02				
UM.4M_4.61-2D-3	UM.4M_4.61-2D	0.40	4.61	5.22	5.65	W	11.76	5.28				
UM.8M_4.19-1D-1	UM.8M_4.19-1D	0.80	4.19	4.82	5.65	W	13.17	6.95	12.41	5.98	13.09	6.70
UM.8M_4.19-1D-2	UM.8M_4.19-1D	0.80	4.19	4.82	5.65	W	11.39	5.03				
UM.8M_4.19-1D-3	UM.8M_4.19-1D	0.80	4.19	4.82	5.65	W	12.68	5.97				
UM.8M_4.19-2D-1	UM.8M_4.19-2D	0.80	4.19	4.82	5.65	D	13.50	7.08	13.76	7.41		
UM.8M_4.19-2D-2	UM.8M_4.19-2D	0.80	4.19	4.82	5.65	D	14.34	8.16				
UM.8M_4.19-2D-3	UM.8M_4.19-2D	0.80	4.19	4.82	5.65	D	13.43	6.99				

Tabella 42. Elenco dei campioni per determinazione ITSR e percentuale di vuoti

Test ID	Mix ID	N max		N max		N max	
		VMA [%]	VFB [%]	VMA [%]	VFB [%]	VMA [%]	VFB [%]
UM.0M_4.61-1D-1	UM.0M_4.61-1D	16.5	74.5	17.1	71.5	17.3	70.3
UM.0M_4.61-1D-2	UM.0M_4.61-1D	17.7	68.5				
UM.0M_4.61-1D-3	UM.0M_4.61-1D	17.1	71.4				
UM.0M_4.61-2D-1	UM.0M_4.61-2D	16.8	72.9	17.6	69.1		
UM.0M_4.61-2D-2	UM.0M_4.61-2D	18.2	66.1				
UM.0M_4.61-2D-3	UM.0M_4.61-2D	17.7	68.4				
UM.4M_4.61-1D-1	UM.4M_4.61-1D	18.4	70.2	18.7	69.1	18.3	70.6
UM.4M_4.61-1D-2	UM.4M_4.61-1D	18.2	71.2				
UM.4M_4.61-1D-3	UM.4M_4.61-1D	19.4	65.8				
UM.4M_4.61-2D-1	UM.4M_4.61-2D	18.1	71.5	18.0	72.1		
UM.4M_4.61-2D-2	UM.4M_4.61-2D	18.0	72.1				
UM.4M_4.61-2D-3	UM.4M_4.61-2D	17.9	72.6				
UM.8M_4.19-1D-1	UM.8M_4.19-1D	19.5	64.2	18.7	67.9	19.3	65.3
UM.8M_4.19-1D-2	UM.8M_4.19-1D	17.9	71.4				
UM.8M_4.19-1D-3	UM.8M_4.19-1D	18.6	68.0				
UM.8M_4.19-2D-1	UM.8M_4.19-2D	19.6	63.8	19.9	62.7		
UM.8M_4.19-2D-2	UM.8M_4.19-2D	20.6	60.0				
UM.8M_4.19-2D-3	UM.8M_4.19-2D	19.5	64.2				

Tabella 43. VMA e VFB dei campioni realizzati

Il condizionamento dei provini, sia in modalità dry che modalità wet, avviene a una certa temperatura funzione del bitume; come mostrato nella tabella successiva, avendo a che fare con un bitume TQ 70/100, la temperatura di condizionamento, e per cui anche di prova, deve essere pari a 10°C.

Nominal grade of binder	Test temperature °C
Penetration at 25 °C (0,1 mm) ≤ 70	15 ± 1
Penetration at 25 °C (0,1 mm) > 70	10 ± 1
Kinematic viscosity at 60 °C (mm ² /s) > 4000 ^a	10 ± 1
^a Soft bitumens: bitumens designated and specified by kinematic viscosity at 60 °C.	

Tabella 44. Temperatura di prova per determinazione ITSR

Se il condizionamento dry dei campioni avviene prima mantenendoli a una temperatura pari a 20±5°C, si inseriscono direttamente in una cella climatica settata alla temperatura di prova per un periodo pari ad almeno 4 ore e poi vengono sottoposti a prova ITS, per il condizionamento wet la procedura risulta essere un po' più laboriosa.

- I provini vengono inseriti in un contenitore sottovuoto riempito con acqua con temperatura pari a $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Il livello dell'acqua deve essere almeno 20 mm sopra la superficie superiore dei provini di prova.
- Una volta inserita l'acqua, si applica il vuoto all'interno del contenitore per ottenere una pressione assoluta (residua) di $6,7 \pm 0,3$ kPa, facendola diminuire lentamente per evitare danni ai campioni. Una volta raggiunta la pressione target, si mantiene la condizione di vuoto per 30 ± 5 minuti.
- Passata mezz'ora di vuoto, si aumenta leggermente la pressione fino a raggiungere la pressione atmosferica e si lasciano i campioni immersi in acqua per altri 30 ± 5 minuti.
- Una volta finita la procedura, si rimuovono i campioni dall'acqua, si misurano le dimensioni dei campioni bagnati e si calcola il volume del provino.
- Successivamente, si mettono i campioni bagnati in una vasca a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ per un periodo di 72 ± 2 ore.
- Passate le 72 ± 2 ore, si posizionano i provini bagnati su un piano per un tempo pari a 30 minuti e, successivamente, si inseriscono in un bagno d'acqua alla temperatura di prova per un periodo almeno pari a 4 ore.
- Dopo il condizionamento alla temperatura di prova, si estraggono i provini, si asciugano con un panno e si sottopongono a prova ITS.



Figura 98. Sistema di deaerazione per campioni wet



Figura 99. Campione inserito nel contenitore con acqua prima della deaerazione



Figura 101. Campioni su piano dopo il condizionamento di 72 ore



Figura 100. Condizionamento dei campioni in acqua alla temperatura di prova

Successivamente, nella stessa giornata, come raccomandato nella norma, i provini dry e wet sono stati sottoposti a test per valutare ITS e, dopo aver ottenuto i valori, è stato calcolato il valore di ITS_R per le miscele UM.0_4.61-1D, UM.0_4.61-2D, UM.4M_4.61-1D, UM.4M_4.61-2D, UM.8M_4.19-1D e UM.8M_4.19-2D.

Nella Tabella 45 sono riportati i valori delle proprietà meccaniche di ciascun provino e i valori medi delle miscele realizzate; si vuole sottolineare che per i campioni che hanno subito un processo di condizionamento "dry" sono stati ottenuti anche i valori del Modulo di Rigidezza, sempre alla temperatura di prova pari a 10°C, prima di essere sottoposti a prova per la determinazione del valore di ITS.

Test ID	Condizionamento	Proprietà meccaniche				
		Stiffness [MPa]	ITS _{dry} [MPa]	ITS _{wet} [MPa]	ITSR	CTI [MPa]
UM.0M_4.61-1D-1	W	7383	2.385	2.267	95%	208.2
UM.0M_4.61-1D-2	W					
UM.0M_4.61-1D-3	W					
UM.0M_4.61-2D-1	D					
UM.0M_4.61-2D-2	D					
UM.0M_4.61-2D-3	D					
UM.4M_4.61-1D-1	W	8143	2.428	2.578	106%	265.0
UM.4M_4.61-1D-2	W					
UM.4M_4.61-1D-3	D					
UM.4M_4.61-2D-1	D					
UM.4M_4.61-2D-2	D					
UM.4M_4.61-2D-3	W					
UM.8M_4.19-1D-1	W	9728	2.456	2.541	106%	281.5
UM.8M_4.19-1D-2	W					
UM.8M_4.19-1D-3	W					
UM.8M_4.19-2D-1	D					
UM.8M_4.19-2D-2	D					
UM.8M_4.19-2D-3	D					

Tabella 45. Proprietà meccaniche delle miscele ottimali

Dall'analisi della tabella si possono trarre le seguenti considerazioni.

- I Moduli di Rigidezza delle miscele con condizionamento dry aumentano al crescere del contenuto di plastica, sottolineando l'effetto irrigidente del materiale polimerico all'interno dei conglomerati.
- I valori di ITS aumentano al crescere del contenuto di WP, ma la differenza risulta essere meno marcata passando da 0.4% a 0.8% di WP.
- Osservando i valori di ITS ottenuti, sia nel caso dry che caso wet, per le 3 miscele realizzate la differenza di valori tra massimo e minimo non è elevata, fatta eccezione per ITS_{wet} con 0.4% di WP (la differenza è maggiore di 0.5 MPa).
- Il Coefficiente a Trazione Indiretta (CTI) delle miscele, proprietà meccanica funzione diretta di ITS, è maggiore per le miscele con M e cresce all'aumentare del contenuto di WP.
- I valori di ITSR sono molto elevati, e in particolare si ha che:
 - UM.0_4.61-1D e UM.0_4.61-2D: il valore di ITSR è pari a 95%, sinonimo che i valori di ITS_{wet} e ITS_{dry} sono molto simili;
 - UM.4M_4.61-1D e UM.4M_4.61-2D: il valore di ITSR è pari a 106%, per cui la Resistenza a Trazione Indiretta è maggiore nel caso wet rispetto a dry;
 - UM.8M_4.19-1D e UM.8M_4.19-2D: anche in questo caso il valore di ITSR è pari a 106%, per cui la Resistenza a Trazione Indiretta è maggiore nel caso wet rispetto a dry.

Dai risultati ottenuti si può dedurre che le miscele realizzate mostrano un'ottima resistenza all'azione dell'acqua, garantendo una maggiore durabilità della pavimentazione in presenza di umidità e pioggia. È anche possibile osservare che l'aggiunta di plastica M all'interno delle miscele permette di aumentare il valore di ITSR del 10%, sottolineando come l'effetto della plastica sia importante, facendo sì che il conglomerato mostri una resistenza maggiore in presenza di acqua.

5.CONCLUSIONI

Il presente elaborato ha come scopo quello di valutare la possibilità di realizzare conglomerati bituminosi che presentano al loro interno plastica da rifiuto inserita in percentuale pari a 0.4% e 0.8% sul peso totale della miscela.

Le plastiche da rifiuto proposte in questo argomento di Tesi sono due tipologie, M e R, le quali, prima di essere inserite all'interno delle miscele, sono state testate in laboratorio con una serie di prove per valutare le caratteristiche e il comportamento a contatto con aggregati e alle alte temperature.

In questo elaborato di Tesi ci si è focalizzati sull'analisi dello strato di usura, che prevede da ricetta iniziale aggregati di diversa classe, 15% di RAP, 5.06% di bitume di aggiunta su aggregati e RAP; in seguito a uno studio di Mix Design in cui sono state modificate le percentuali di aggiunta delle varie classi di aggregato, sono state realizzate una serie di conglomerati con diversa tipologia e contenuto di plastica, ipotizzando che quest'ultima, all'interno delle miscele, fondesse completamente, agendo come legante tra gli inerti. Con l'aggiunta di materiale plastico in sostituzione del bitume con modalità dry, anche il contenuto di quest'ultimo è stato fatto variare, in funzione del contenuto di plastica aggiunto.

Oltre a quelle contenenti plastica da riciclo, anche una serie di miscele senza WP è stata progettata e realizzata, con l'obiettivo di migliorare la ricetta iniziale e valutare le differenze tra conglomerati con e senza materiale plastico.

Sono state analizzate alcune proprietà delle miscele quali la granulometria, la Massima Massa Volumica Teorica e la percentuale di bitume, oltre alle caratteristiche volumetriche (percentuale di vuoti, VMA, VFB) e meccaniche (Modulo di Rigidezza, ITS).

Dall'analisi di tutte le miscele realizzate, sono state definite 3 miscele ottimali con 0.0%, 0.4% e 0.8% di materiale plastico, di cui si è poi valutata la suscettibilità all'acqua mediante la determinazione di ITS.

Dall'indagine sperimentale effettuata sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Gli scarti dei processi di recupero delle plastiche da rifiuto possono essere efficacemente impiegati per la realizzazione di conglomerati bituminosi sostenibili.
- Le due plastiche M e R, in particolare, possono essere impiegate all'interno delle miscele; tuttavia, bisogna prestare particolare attenzione alle temperature di miscelazione e compattazione, dal momento che la tipologia di plastica e il relativo dosaggio sono fortemente influenzate da esse. Queste raccomandazioni risultano essere fondamentali nel momento in cui si vuole utilizzare il materiale plastico come sostituto del bitume.
- Analizzando l'interazione con gli aggregati, si può concludere che R tende maggiormente a legare i materiali inerti e comportarsi come legante, mentre M agisce sia come materiale legante unendo i vari aggregati, sia come aggregato creando cluster di materiale plastico insieme agli altri materiali inerti.
- Il comportamento delle plastiche a contatto con gli aggregati è confermato dallo studio delle caratteristiche volumetriche delle miscele realizzate, in particolar modo la percentuale dei vuoti: con 0.4% di WP si ottengono valori simili con M e R, a 0.8% M agisce

come legante aumentando le temperature di miscelazione e compattazione, mentre R fonde maggiormente e si comporta come legante. Tutto ciò porta alla conclusione che la plastica svolge soltanto in parte la funzione di legante, dal momento che la temperatura di miscelazione, essendo inferiore a quella di fusione delle plastiche, non permette lo scioglimento totale dei materiali polimerici, lasciando una frazione di essi intatta.

- I risultati di VMA e VFB ottenuti mostrano un aumento dei valori di VMA per le miscele con WP, confermando il non completo scioglimento delle plastiche, e una diminuzione dei valori di VFB.
- Le curve di compattazione mostrano simili andamenti e sovrapposizioni tra di esse, dimostrando che l'inserimento della plastica non altera significativamente il processo di compattazione.
- I Moduli di Rigidezza dei conglomerati con M e R aumentano, mostrando un effetto irrigidente della miscela con inserimento della plastica.
- Con l'aggiunta di M e R i valori di ITS aumentano rispetto alle miscele senza WP, segnalando un aumento delle caratteristiche meccaniche.
- I valori di ITSr delle miscele ottimali con WP e senza WP mostrano che la resistenza all'azione dell'acqua risulta essere valida; con inserimento di WP si ha un aumento del 10% di tale valore.

I risultati ottenuti mostrano che l'aggiunta di plastica da rifiuto all'interno dei conglomerati bituminosi permette di incrementare le caratteristiche meccaniche, mentre le caratteristiche volumetriche risultano essere inferiori rispetto alle miscele senza materiale polimerico; l'inserimento di plastica risulta essere vantaggioso non soltanto da un punto di vista delle proprietà del composto ottenuto, ma anche e soprattutto da un punto di vista ambientale, perché permette di avere due vantaggi: riutilizzare un materiale da rifiuto che non viene riciclato in altri contesti produttivi, e ridurre il quantitativo di aggregati vergini e bitume. Questi due aspetti permettono anche di ridurre il costo della produzione di conglomerato e di ridurre le emissioni di gas nocivi durante la produzione dello stesso.

Le raccomandazioni che si possono dare per il proseguo del lavoro possono essere le seguenti:

- Continuare la sperimentazione sugli strati di Collegamento e Base.
- Produrre le miscele ottimali in impianto e verificare che le proprietà ottenute risultino essere uguali o simili.
- Eseguire una caratterizzazione prestazionale delle miscele ottimali mediante la realizzazione di prove a fatica o prove di deformazione permanente.
- Eseguire campi prova con le miscele progettate, analizzando le prestazioni dei conglomerati e le proprietà.

6.BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Ritchie, H.; Samborska, V.; Roser, M. Plastic Pollution. Our World in Data. Available online: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution> (accesso il 15 Luglio 2025)
2. Bueno, I.M.; Teixeira, J.E.S.L. Waste Plastic in Asphalt Mixtures via the Dry Method: A Bibliometric Analysis. Sustainability 2024, 16, 4675. <https://doi.org/10.3390/su16114675>
3. Meijer, L.J.; Van Emmerik, T.; Van Der Ent, R.; Schmidt, C.; Lebreton, L. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. Sci. Adv. 2021, 7, eaaz5803. [[More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean | Science Advances](#)] [[More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean - PubMed](#)]
4. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., Rubio-Gámez, M., 2019. Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. Sustainability 11 (3), 646. <https://doi.org/10.3390/su11030646>.
5. Ghuzlan, K.A., Al-Khateeb, G.G., Qasem, Y.J.A.J.o.T., Engineering, 2013b. Rheological properties of polyethylene-modified asphalt binder. 10, 1-14.
6. Kalantar, Z.N., Karim, M.R., Mahrez, A.J.C., Materials, B., 2012. A review of using waste and virgin polymer in pavement. 33, 55-62.
7. Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A.C., Silva-Klein, L.T., Lastra-González, P., Castro-Fresno, D., 2019. Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. Waste Manag 87, 751-760.
8. Chen, S.; Che, T.; Mohseni, A.; Azari, H.; Heiden, P.A.; You, Z. Preliminary study of modified asphalt binders with thermoplastics: The Rheology properties and interfacial adhesion between thermoplastics and asphalt binder. Constr. Build. Mater. **2021**, 301, 124373. [CrossRef]
9. Xu, F.; Zhao, Y.; Li, K. Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review. Materials **2022**, 15, 110. <https://doi.org/10.3390/ma15010110>
10. Asphalt-Institute-MS2-7th-Edition-Asphalt-Institute-Mix-Design
11. Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Pawel Polaczyk, Rui Xiao, Miaomiao Zhang, Baoshan Huang, The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review, Cleaner Materials, Volume 2, 2021
12. Shah, Mudassar & Yousaf, Jamal & Khalid, Usama & Li, Hong & Yee, Jurng-Jae & Naqvi, Syeda. (2024). Plastic roads: asphalt mix design and performance. Discover Applied Sciences. 6. 10.1007/s42452-024-05772-x.
13. Basheet SH, Latief RH. The Impact of Using Polyethylene Polymer on the Properties of Hot Asphalt Mixture by Conducting Semi-Wet and Dry Mixing Process. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025;38(05):1108-1119.
14. ANAS, Accordo quadro quadriennale per l'esecuzione di lavori di manutenzione straordinaria della pavimentazione – Centri Manutentori – 2020, Allegato D, Capitolato Speciale di Appalto, Norme Tecniche Pavimentazioni Stradali/Autostradali, IT.PRL.05.21 – Rev.2.0
15. <https://it.wikipedia.org/wiki/Poliolefine>

16. Soheil Heydari, Ailar Hajimohammadi, Nioushasadat Haji Seyed Javadi, Nasser Khalili, The use of plastic waste in asphalt: A critical review on asphalt mix design and Marshall properties, *Construction and Building Materials*, Volume 309, 2021, 125185, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125185>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821029299>)
17. Pasetto, M.; Baliello, A.; Pasquini, E.; Poulidakos, L. Dry Addition of Recycled Waste Polyethylene in Asphalt Mixtures: A Laboratory Study. *Materials* **2022**, *15*, 4739. <https://doi.org/10.3390/ma15144739>
18. Abtahi, Mahdi & Ebrahimi, Milad & Kunt, Mehmet & Hejazi, Seyed Mahdi & Esfandiarpour, Saman. (2011). Production of Polypropylene-reinforced Asphalt Concrete Mixtures Based on Dry Procedure and Superpave Gyratory Compactor. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*. 20.
19. Lastra-González, P, Calzada-Pérez, MA, 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*, vol. 112, pp. 1133-1140. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.156>
20. Sinan Hınıslioğlu, Emine Açar, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Volume 58, Issues 3-4, 2004, Pages 267-271, ISSN 0167-577X, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0).
21. Valentina Beghetto, Noemi Bardella, Riccardo Samiolo, Vanessa Gatto, Silvia Conca, Roberto Sole, Giacomo Molin, Andrea Gattolin, Nicola Ongaro, By-products from mechanical recycling of polyolefins improve hot mix asphalt performance, *Journal of Cleaner Production*, Volume 318, 2021, 128627, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128627>.
22. Hassan Ziari, Mojtaba Hajiloo, The effect of mix design method on performance of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and recycling agents: Superpave versus balanced mix design, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, 2023, e01931, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01931>.
23. La Macchia, J.N.; Baglieri, O.; Dalmazzo, D.; Santagata, E. Engineering Properties of Road Paving Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt and Recycled Waste Plastics. *Materials* 2024, *17*, 5681. <https://doi.org/10.3390/ma17235681>
24. Carpenter, S.H.; Wolosick, J.R. Modifier Influence in the Characterization of Hot Mix Recycled Material; Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 1980.
25. Jwaida, Z.; Dulaimi, A.; Mydin, M.A.O.; Özkılıç, Y.O.; Jaya, R.P.; Ameen, A. The Use of Waste Polymers in Asphalt Mixtures: Bibliometric Analysis and Systematic Review. *J. Compos. Sci.* 2023, *7*, 415. <https://doi.org/10.3390/jcs7100415>
26. Al-Khayat, Haydar & Newcomb, David & Zhou, Fujie & Deussen, David. (2021). Evaluation of the Minnesota Asphalt Mixtures Based on Balanced Mix-Design Approach. *Journal of Transportation Engineering Part B Pavements*. 147. 10.1061/JPEODX.0000298.
27. <https://controls-group.com/it/product/accessori-per-test-su-asfalto/>
28. [Balanced mix design, recycled binder availability and how they fit - Asphalt magazine](#)
29. Ghos, Sagar & Sumter, Christopher & Arevalo, Paul & Ali, Syed & Zaman, Musharraf & Hobson, Kenneth & Kalicki, Greg & Metzger, Darin. (2022). Performance of Asphalt Mixes

- Containing Postconsumer Recycled Plastic using Balanced Mix Design Approach and Dry Process. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2676. 036119812210882. 10.1177/03611981221088200.
30. Josué Cardoso, Adelino Ferreira, Arminda Almeida, João Santos, Incorporation of plastic waste into road pavements: A systematic literature review on the fatigue and rutting performances, *Construction and Building Materials*, Volume 407, 2023, 133441, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133441>.
 31. The British Standard Institution (1997). *BS EN 932-1:1996: Tests for general properties of aggregates-Part 1: Methods for sampling*
 32. The British Standard Institution (1999). *BS EN 932-1:1998: Tests for general properties of aggregates-Part 2: Methods for reducing laboratory samples*
 33. The British Standard Institution (2012). *BS EN 933-1:2012 Test for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*
 34. The British Standard Institution (2022). *BS EN 1097-6:2022 Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 6: Determination of particle density and water absorption*
 35. The British Standard Institution (2015+A1). *BS EN 12697-2:2015+A1:2019 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 2: Determination of particle size distribution*
 36. The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-5:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 5: Determination of the maximum density*
 37. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-6:2020 Bituminous mixtures – Test methods Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*
 38. The British Standard Institution (2018): *BS EN 12697-8:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*
 39. The British Standard Institution (2018): *BS EN 12697-12:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*
 40. The British Standard Institution (2017). *BS EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures – Test methods Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*
 41. The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 26: Stiffness*
 42. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-28:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading.*
 43. The British Standard Institution (2020): *BS EN 12697-29:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 28: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*
 44. The British Standard Institution (2019). *BS EN 12697-31:2019 Bituminous mixtures – Test methods Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor*
 45. The British Standard Institution (2016). *BS EN 12697-35:2016 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 35: Laboratory Mixing*
 46. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-39:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 39: Binder content by ignition*
 47. Decreto Ministeriale del 5 agosto 2024 (modifiche al DM 256/2022). Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE). Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio

di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali (CAM Strade).

48. [https://www.plastmagazine.it/poliammidi-pa-nylon-caratteristiche-tipologie-impieghi-mercato/#:~:text=Le%20poliammidi%20\(PA\)%2C%20dette,che%20per%C3%B2%20sono%20poliammidi%20aromatiche.](https://www.plastmagazine.it/poliammidi-pa-nylon-caratteristiche-tipologie-impieghi-mercato/#:~:text=Le%20poliammidi%20(PA)%2C%20dette,che%20per%C3%B2%20sono%20poliammidi%20aromatiche.)
49. <https://it.wikipedia.org/wiki/Elastomero>

7. ALLEGATI

Vengono riportati in questo capitolo una serie di tabelle che mostrano alcuni risultati inerenti le caratteristiche degli aggregati, RAP e plastiche utilizzate.

Densità di aggregati, RAP e plastiche

- 5/17

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
P+X	891.5	2138.7	1247.2	2993.6	1304.2	21.3	20.9	0.9980	0.9980	2.771
Y+Z	876.6	2299.7	1423.1	3100.7	1311.5	21.4	26.4	0.9979	0.9967	2.773
									Media	2.772
									Dev.St.	0.002
									C.V.	0.1

- 3/8

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
Q+A	917.2	2036.4	1119.2	2981.1	1343.4	23.5	26.3	0.9975	0.9967	2.793
6+R	992.6	1894.6	902.0	2800.2	1229.3	23.6	21.1	0.9974	0.9980	2.785
									Media	2.789
									Dev.St.	0.006
									C.V.	0.2

- 0/5

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
Q+A	917.2	1392.9	475.7	2564.0	1343.4	21.1	26.3	0.9980	0.9967	2.728
6+R	992.6	1529.6	537.0	2562.1	1229.3	21.1	21.1	0.9980	0.9980	2.723
									Media	2.726
									Dev.St.	0.004
									C.V.	0.1

- Filler

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
P+X	891.5	937.0	45.5	2223.9	1304.2	21.2	20.9	0.9980	0.9980	2.638
Y+Z	876.6	931.6	55.0	2224.0	1311.5	21.6	26.4	0.9979	0.9967	2.658
Q+A	917.2	967.2	50	2292.9	1343.4	25.8	26.3	0.9969	0.9967	2.788
6+R	992.6	1043.1	50.5	2252.7	1229.3	25.9	21.1	0.9968	0.9980	2.754
									Media	2.771
									Dev.St.	0.024
									C.V.	0.9

In questo caso si vuole porre l'attenzione sul fatto che i primi due valori di densità (contrassegnati dalla scritta rossa) sono stati ottenuti mediante il procedimento classico a umidità ambiente, mentre gli altri due valori (contrassegnati in nero) sono stati ottenuti inserendo prima il materiale in una campana di vetro per rimuovere l'umidità in eccesso (mediante l'ausilio di una serie di sali presenti nella parte sottostante dell'apparecchiatura), e poi è stata calcolata la densità. I valori utilizzati alla fine sono gli ultimi due (metodo con campana di vetro), ovvero 2.788 e 2.754 con valore medio finale pari a 2.771 Mg/m³.

- RAP 0/6

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
Q+A	917.2	1278.5	361.3	2480.7	1343.4	24.2	26.3	0.9973	0.9967	2.539
6+R	992.6	1287.3	294.7	2401.1	1229.3	24.4	21.1	0.9972	0.9980	2.565
									Media	2.552
									Dev.St.	0.019
									C.V.	0.7

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
Q+A	917.2	1299.6	382.4	2506.3	1343.4	23.5	26.3	0.9975	0.9967	2.771
6+R	992.6	1357.4	364.8	2454.6	1229.3	23.6	21.1	0.9974	0.9980	2.769
									Media	2.770
									Dev.St.	0.001
									C.V.	0.0

La prima tabella fa riferimento al RAP 0/6 BLACK (con bitume), la seconda tabella si riferisce a un fresato 0/6 WHITE (a cui è stato tolto il bitume tramite processo di ignizione).

- Plastiche M e R

Pycnometer	m ₀	M _{air}	m ₁	m ₂	m ₃	T ₁	T ₃	ρ _{L1}	ρ _{L3}	ρ _p
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Mg/m ³]
Q+A	917.2	1135.5	218.3	2297.6	1343.4	23.9	26.3	0.9974	0.9968	1.195
6+R	992.6	1207.6	215.0	2257.6	1229.3	23.7	21.1	0.9974	0.9980	1.201
									Media	1.198
									Dev.St.	0.004
									C.V.	0.3

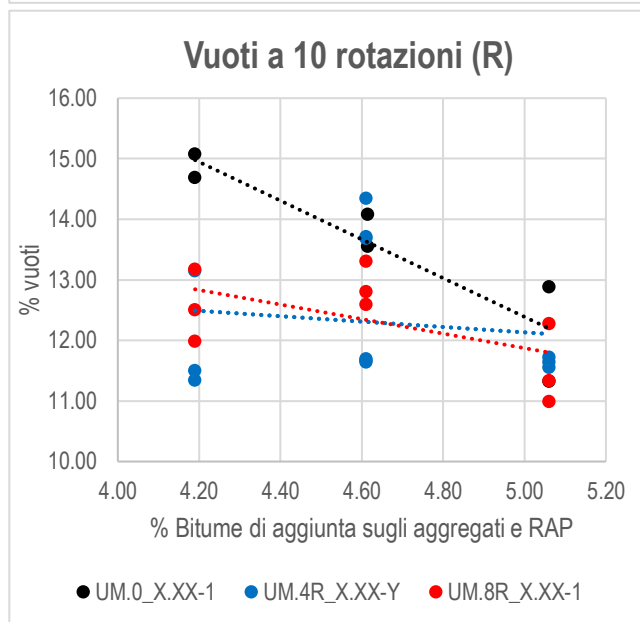
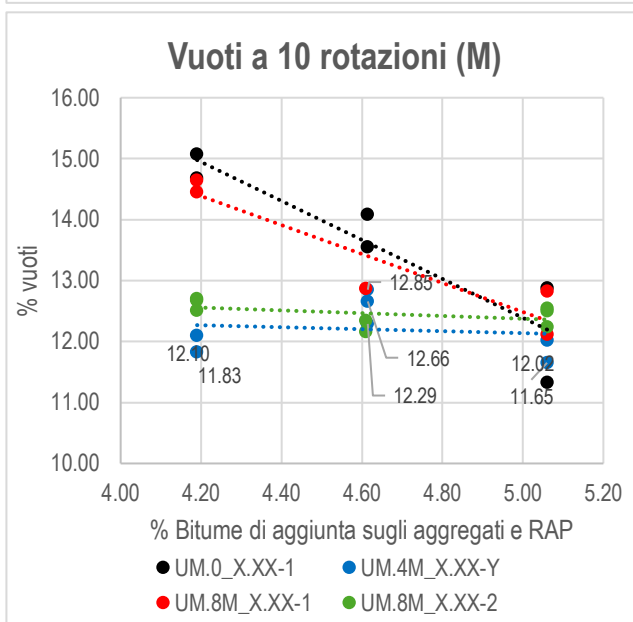
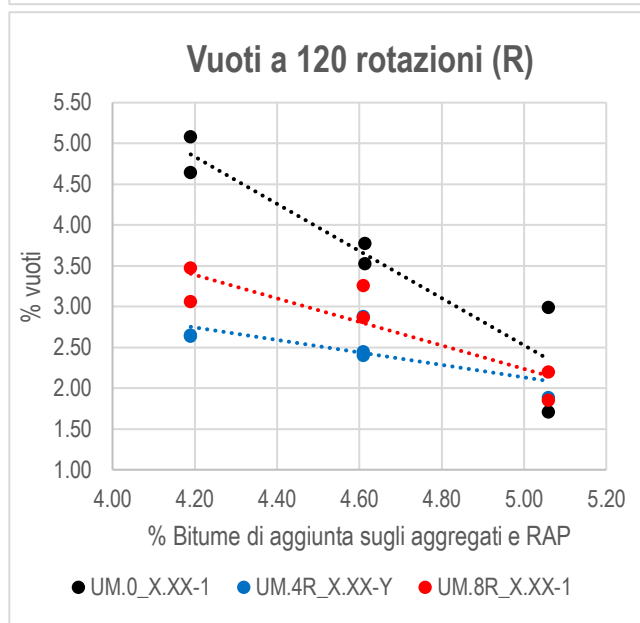
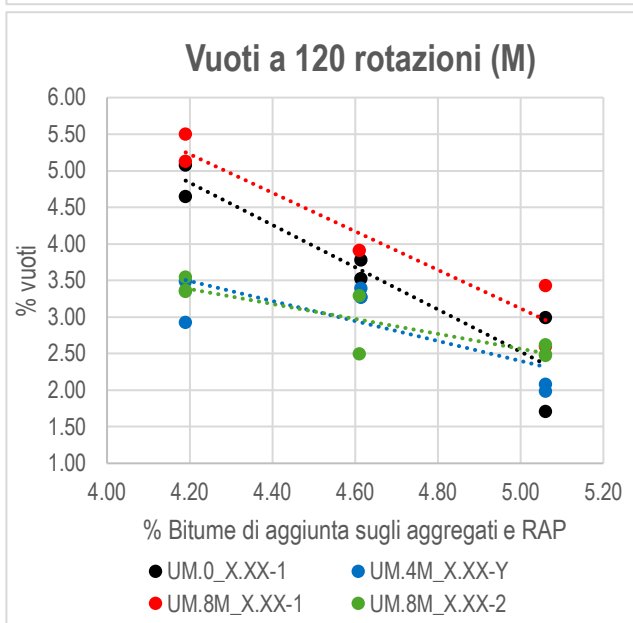
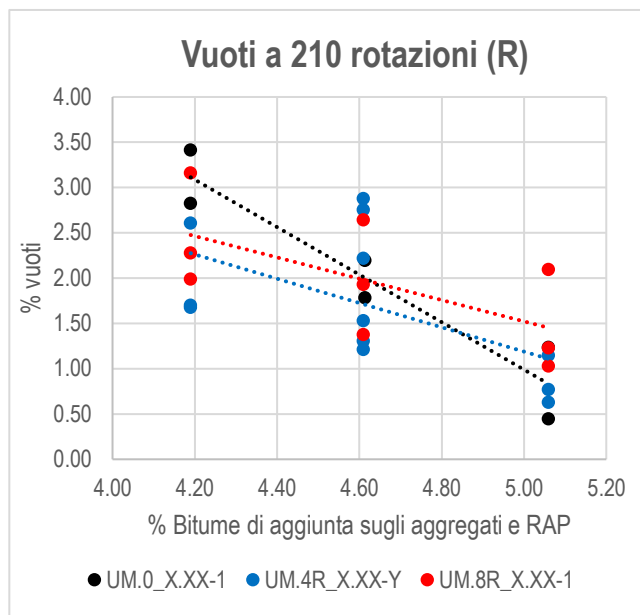
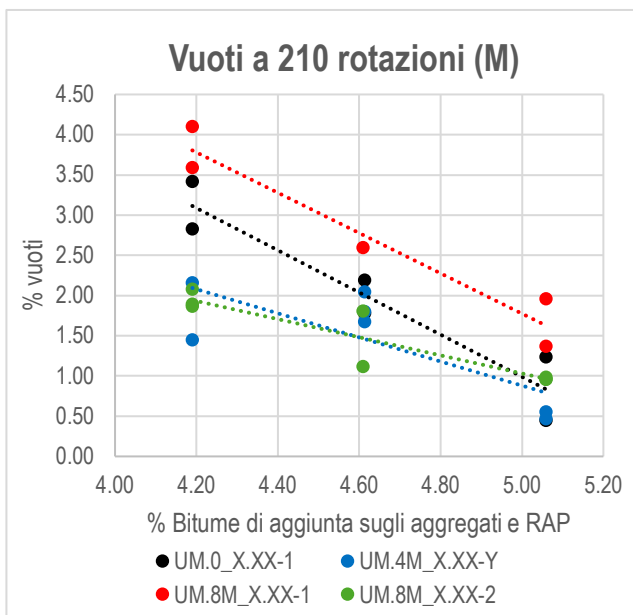
Vengono riportate di seguito le tabelle in cui sono riportati i valori delle caratteristiche volumetriche e meccaniche delle miscele oggetto di studio, e una serie di grafici in cui si mettono a confronto le caratteristiche delle miscele.

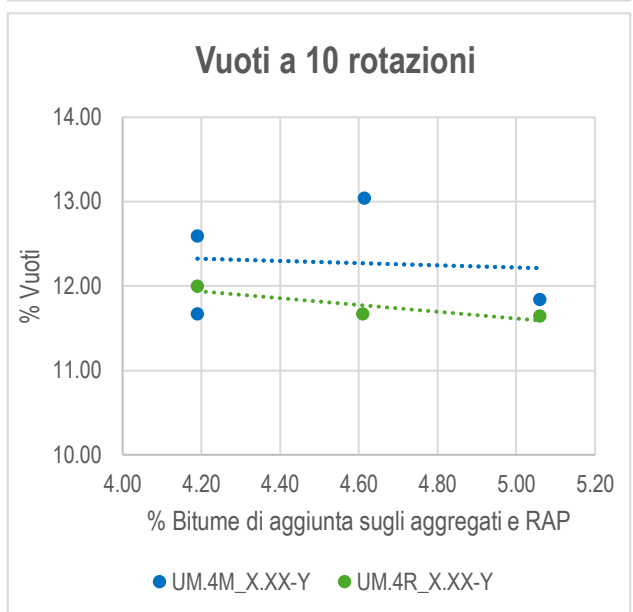
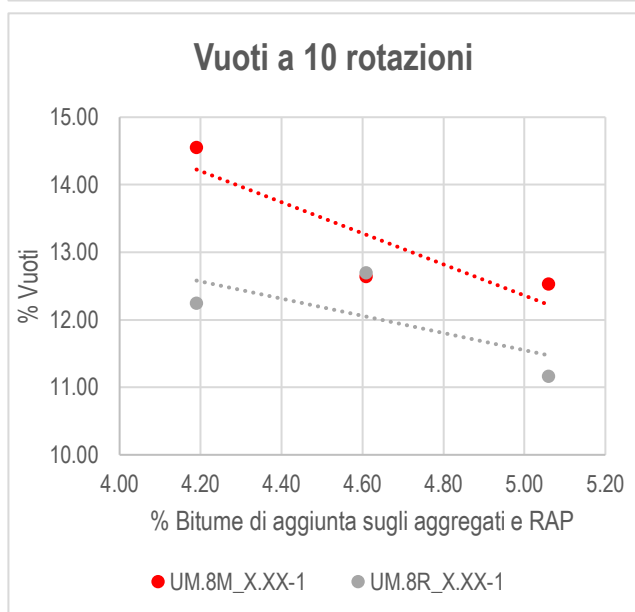
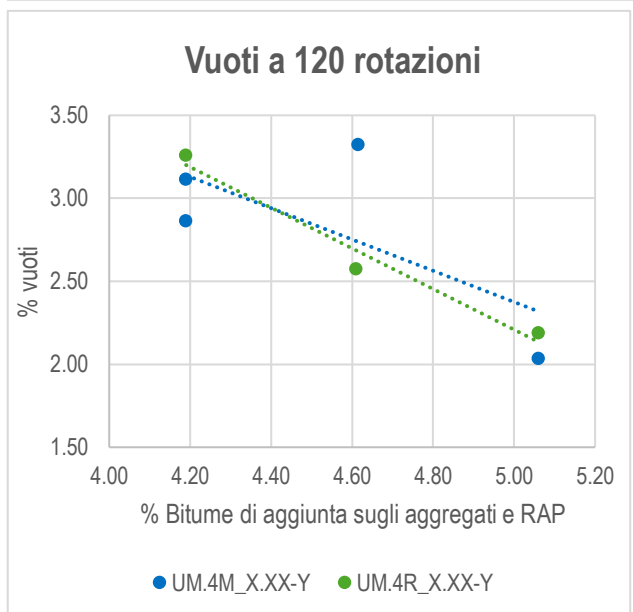
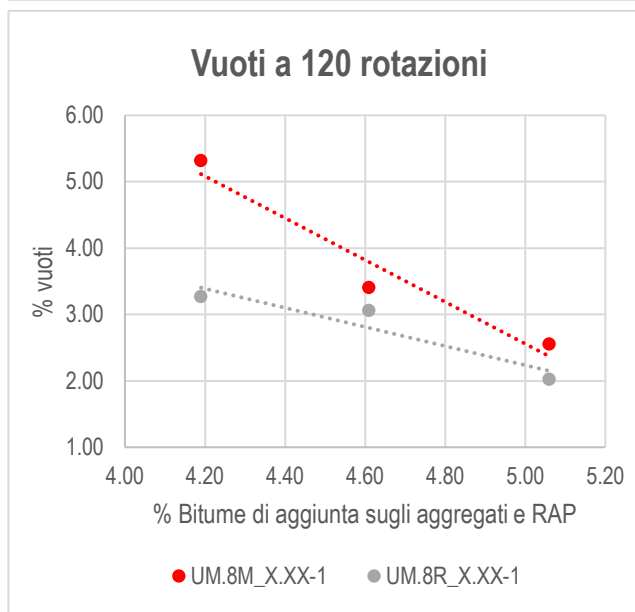
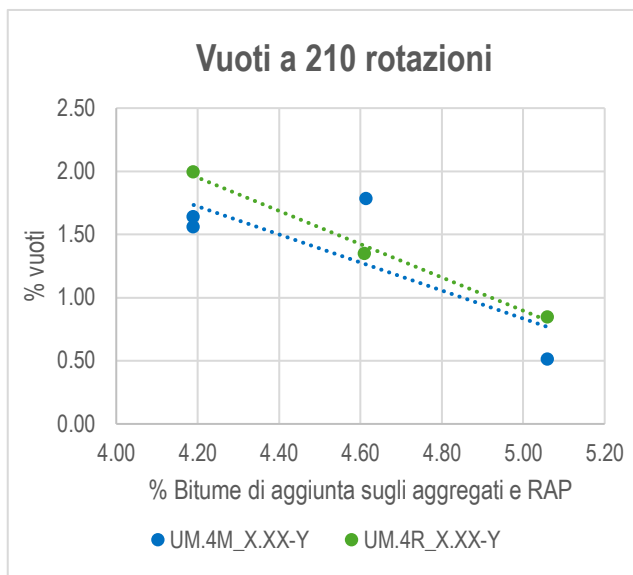
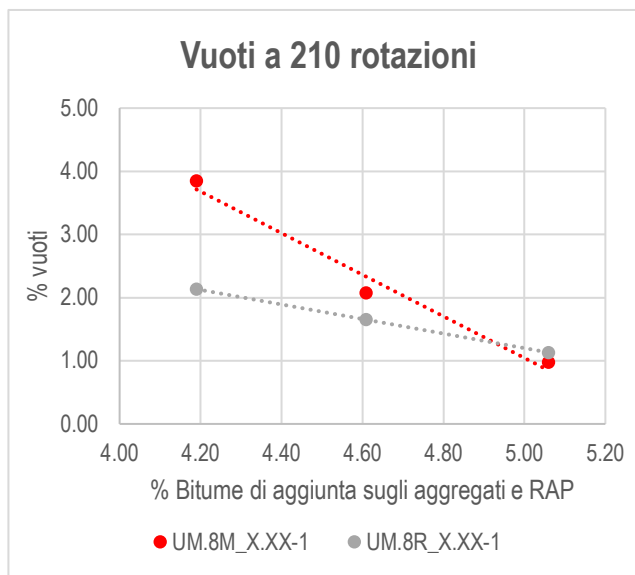
Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR.M [%]	Numero di rotazioni			Numero di rotazioni			VMA (%)	VFB (%)
						10	120	210	10	120	210		
UI.0_5.06-1-1	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.01	1.39	12.97	3.34	1.73	15.1	90.5
UI.0_5.06-1-2	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.40	3.66	2.07				15.7	86.4
UI.0_5.06-1-3	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.07	3.52	1.92				15.5	87.7
UI.0_5.06-1-4	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.16	1.54				15.1	90.3
UM.0_4.19-1-1	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.68	5.08	3.42	14.88	4.86	3.12	15.1	77.2
UM.0_4.19-1-2	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	15.07	4.64	2.83				14.5	80.9
UM.0_4.61-1-1	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	13.55	3.52	1.78	13.81	3.65	1.99	14.4	87.5
UM.0_4.61-1-2	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.08	3.78	2.19				14.8	84.8
UM.0_5.06-1-1	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	11.32	1.71	0.45	12.10	2.35	0.84	14.2	96.2
UM.0_5.06-1-2	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	12.88	2.99	1.23				14.8	91.6
UM.4M_4.19-1-1	UM.4M_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	12.84	3.54	2.08	12.59	1.88	1.64	14.4	85.7
UM.4M_4.19-1-2	UM.4M_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	12.34	2.69	1.19				13.7	90.9
UM.4M_4.19-2-1	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	12.10	3.49	2.16	11.66	2.86	1.56	14.4	85.7
UM.4M_4.19-2-2	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	11.07	2.17	1.07				13.6	91.7
UM.4M_4.19-2-3	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	11.83	2.93	1.45				13.8	90.0
UM.4M_4.61-1-1	UM.4M_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	12.85	3.27	1.67				15.1	88.5
UM.4M_4.61-1-2	UM.4M_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.23	3.38	1.90	13.04	3.32	1.79	15.2	87.7
UM.4M_4.61-2-1	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	12.29	3.28	1.80				15.5	88.3
UM.4M_4.61-2-2	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	12.66	3.39	2.05	13.17	3.97	2.16	15.9	86.3
UM.4M_4.61-2-3	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	14.57	5.22	2.63				14.8	83.7
UM.4M_5.06-1-1	UM.4M_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.65	1.98	0.47	11.84	2.03	0.51	14.8	97.1
UM.4M_5.06-1-2	UM.4M_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	12.02	2.08	0.56				14.9	96.4
UM.8M_4.19-1-1	UM.8M_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	14.65	5.13	3.59	14.55	5.31	3.85	16.6	78.1
UM.8M_4.19-1-2	UM.8M_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	14.45	5.50	4.10				17.0	75.9
UM.8M_4.61-1-1	UM.8M_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.39	2.90	1.55	12.63	3.41	2.07	15.7	90.0
UM.8M_4.61-1-2	UM.8M_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.87	3.91	2.59				16.6	84.2
UM.8M_5.06-1-1	UM.8M_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.12	2.60	1.37	12.47	3.01	1.66	16.5	91.3
UM.8M_5.06-1-2	UM.8M_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.83	3.43	1.96				16.9	88.7
UM.8M_4.19-2-1	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.68	3.54	2.08	12.63	3.42	1.95	15.3	86.1
UM.8M_4.19-2-2	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.70	3.35	1.87				15.1	87.4
UM.8M_4.19-2-3	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	12.51	3.36	1.89				15.1	87.4
UM.8M_4.61-2-1	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	12.35	3.29	1.80				15.9	88.6
UM.8M_4.61-2-2	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	12.16	2.49	1.12	12.87	3.42	1.48	15.3	92.8
UM.8M_4.61-2-3	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	14.10	4.49	1.53				15.6	90.6
UM.8M_5.06-2-1	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.50	2.62	0.96				16.0	94.6
UM.8M_5.06-2-2	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.54	2.49	0.98	12.52	2.55	0.97	16.1	94.0
UM.8M_5.06-2-3	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	12.24	2.48	0.96				16.0	94.6
UL.8M_5.60-1-1	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.69	1.93	0.53	10.54	1.42	0.25	16.7	96.8
UL.8M_5.60-1-2	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.59	1.28	0.14				16.3	99.6
UL.8M_5.60-1-3	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	10.33	1.07	0.08				16.3	99.7

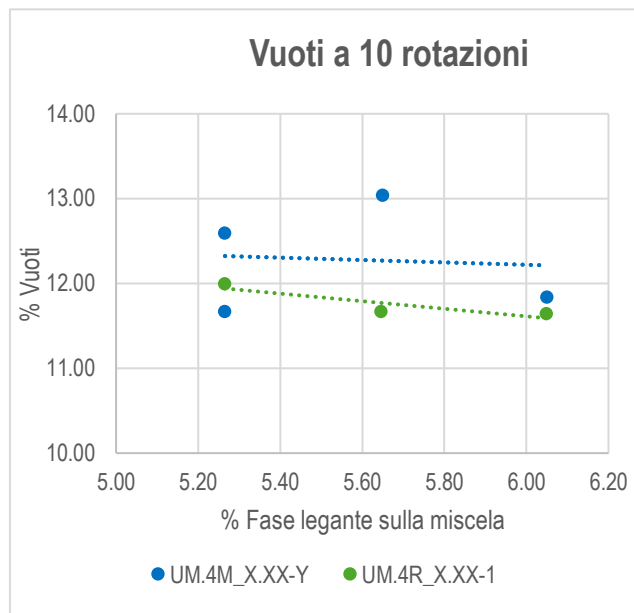
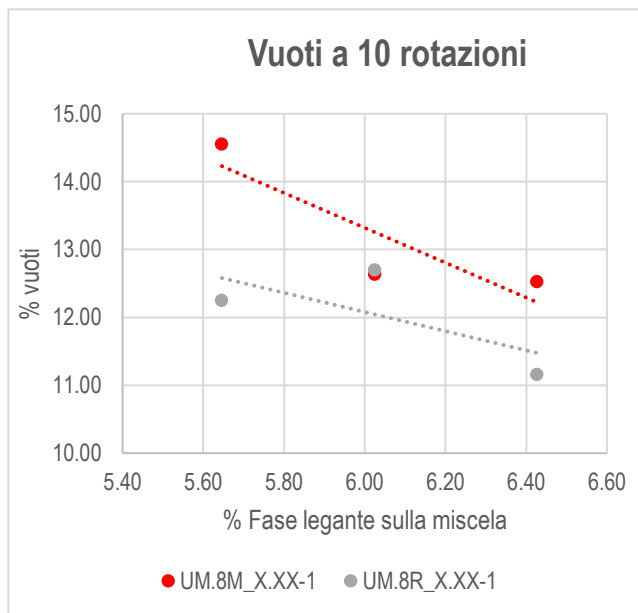
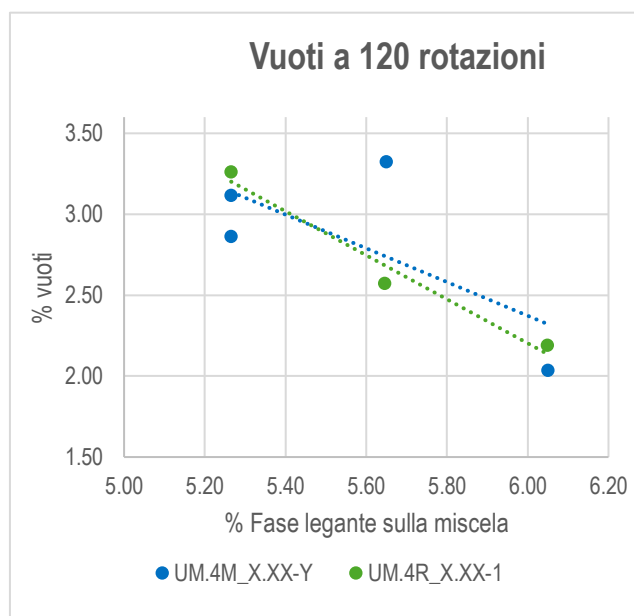
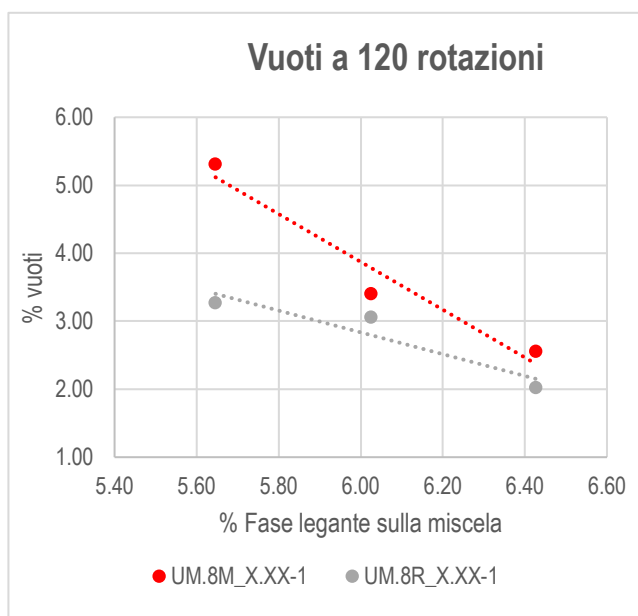
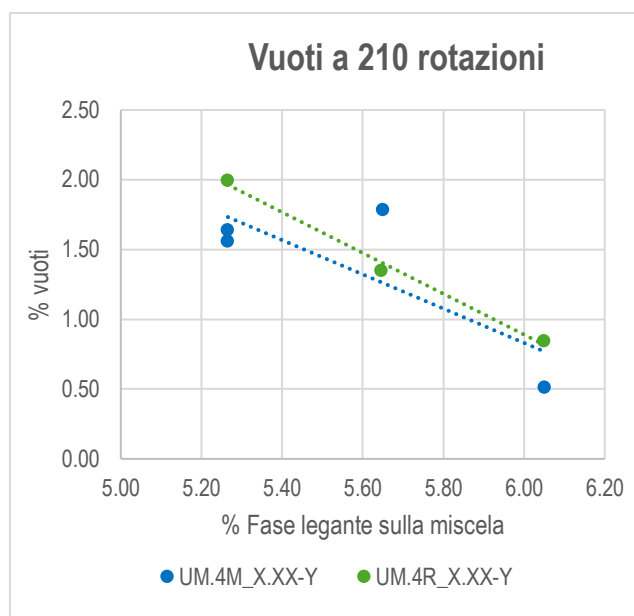
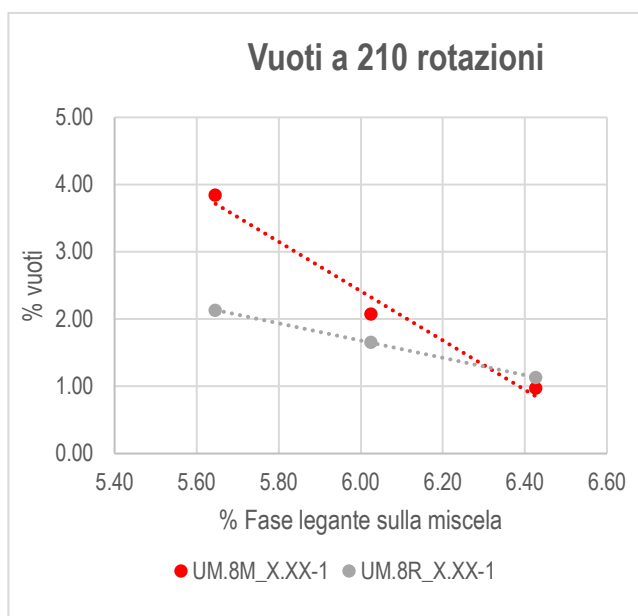
Test ID	Mix ID	WP.M [%]	BA.A [%]	B.M [%]	BWPR. M [%]	Valori disaggregati		
						Stiffness	ITS	CTI
UI.0_5.06-1-1	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.565	252.377
UI.0_5.06-1-2	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65		1.555	223.113
UI.0_5.06-1-3	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5199	1.554	157.620
UI.0_5.06-1-4	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5180	1.706	304.810
UM.0_4.19-1-1	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3613	1.254	102.37
UM.0_4.19-1-2	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3853	1.436	269.74
UM.0_4.61-1-1	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3510	1.375	143.79
UM.0_4.61-1-2	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3634	1.353	133.79
UM.0_5.06-1-1	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3588	1.511	256.56
UM.0_5.06-1-2	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3427	1.314	167.95
UM.4M_4.19-1-1	UM.4M_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5233	1.764	253.52
UM.4M_4.19-1-2	UM.4M_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	4752	1.589	152.33
UM.4M_4.19-2-1	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	3811	1.524	213.50
UM.4M_4.19-2-2	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	4088	1.511	191.44
UM.4M_4.19-2-3	UM.4M_4.19-2	0.40	4.19	4.84	5.27	4264	1.606	234.20
UM.4M_4.61-1-1	UM.4M_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3988	1.472	166.90
UM.4M_4.61-1-2	UM.4M_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3366	1.248	126.99
UM.4M_4.61-2-1	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3663	1.370	164.04
UM.4M_4.61-2-2	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3523	1.306	136.23
UM.4M_4.61-2-3	UM.4M_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4282	1.377	128.11
UM.4M_5.06-1-1	UM.4M_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3855	1.524	168.99
UM.4M_5.06-1-2	UM.4M_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3675	1.527	181.57
UM.8M_4.19-1-1	UM.8M_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	5403	1.736	321.87
UM.8M_4.19-1-2	UM.8M_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	4214	1.676	334.45
UM.8M_4.61-1-1	UM.8M_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4816	1.704	197.55
UM.8M_4.61-1-2	UM.8M_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4485	1.507	155.39
UM.8M_5.06-1-1	UM.8M_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4404	1.558	196.76
UM.8M_5.06-1-2	UM.8M_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4450	1.589	207.99
UM.8M_4.19-2-1	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	4521	1.563	194.99
UM.8M_4.19-2-2	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	4948	1.651	233.91
UM.8M_4.19-2-3	UM.8M_4.19-2	0.80	4.19	4.82	5.65	6021	1.803	273.95
UM.8M_4.61-2-1	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	3457	1.443	203.45
UM.8M_4.61-2-2	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	4386	1.723	295.42
UM.8M_4.61-2-3	UM.8M_4.61-2	0.80	4.61	5.20	6.02	4367	1.501	152.93
UM.8M_5.06-2-1	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	3545	1.461	165.06
UM.8M_5.06-2-2	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	4484	1.635	182.43
UM.8M_5.06-2-3	UM.8M_5.06-2	0.80	5.06	5.60	6.43	4340	1.595	212.33
UL.8M_5.60-1-1	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	2821	1.277	137.46
UL.8M_5.60-1-2	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	2970	1.348	128.60
UL.8M_5.60-1-3	UL.8M_5.60-1	0.80	5.60	6.08	6.91	3138	1.371	127.05

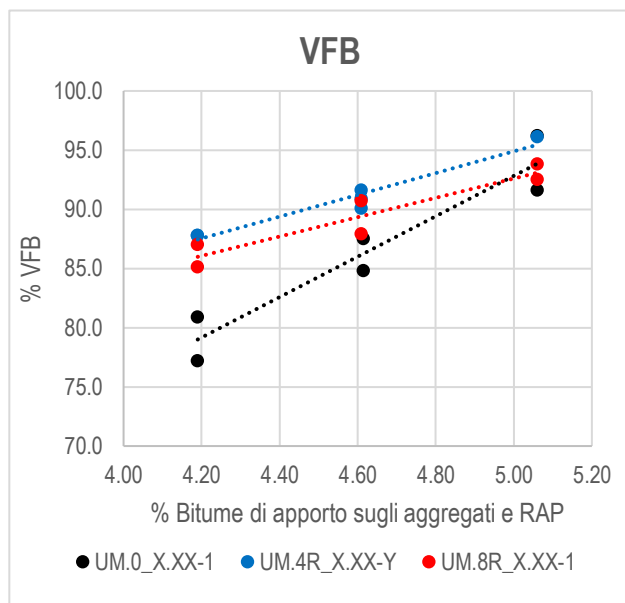
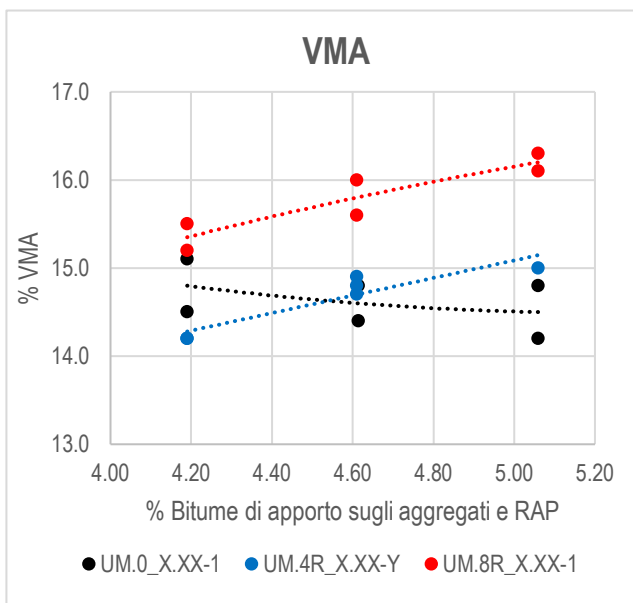
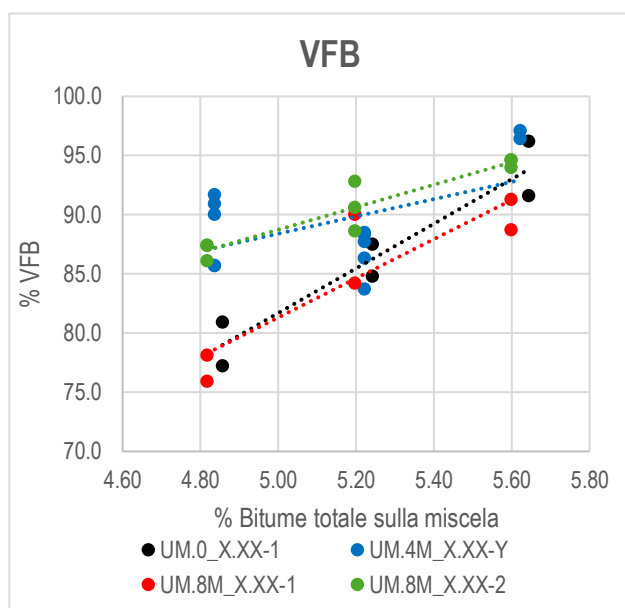
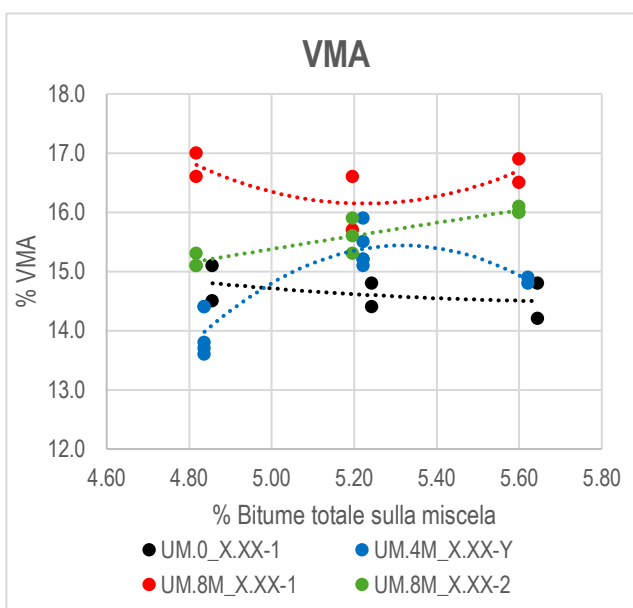
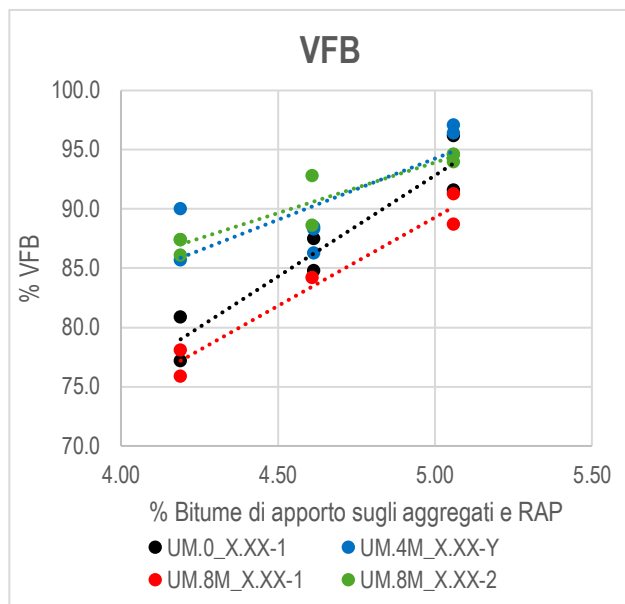
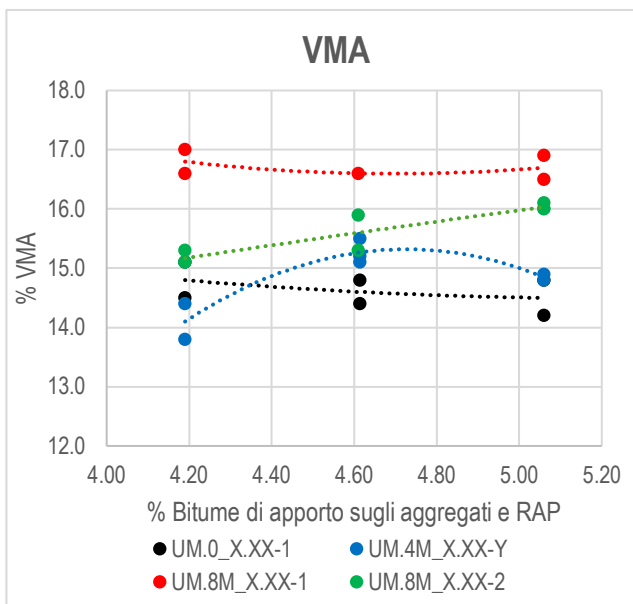
Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR. M [%]	Numero di rotazioni			Numero di rotazioni			VMA (%)	VFB (%)
						10	120	210	10	120	210		
UI.0_5.06-1-1	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.01	1.39	12.97	3.34	1.73	15.1	90.5
UI.0_5.06-1-2	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.40	3.66	2.07				15.7	86.4
UI.0_5.06-1-3	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	13.07	3.52	1.92				15.5	87.7
UI.0_5.06-1-4	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	12.71	3.16	1.54				15.1	90.3
UM.0_5.06-1-1	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	11.32	1.71	0.45	12.10	2.35	0.84	14.2	96.2
UM.0_5.06-1-2	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	12.88	2.99	1.23				14.8	91.6
UM.0_4.19-1-1	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	14.68	5.08	3.42	14.88	4.86	3.12	15.1	77.2
UM.0_4.19-1-2	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	15.07	4.64	2.83				14.5	80.9
UM.0_4.61-1-1	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	13.55	3.52	1.78	13.81	3.65	1.99	14.4	87.5
UM.0_4.61-1-2	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	14.08	3.78	2.19				14.8	84.8
UM.4R_4.19-1-1	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	11.34	2.65	1.70	11.99	3.26	1.99	14.2	87.8
UM.4R_4.19-1-2	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	11.50	2.63	1.68				14.2	87.8
UM.4R_4.19-1-3	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	13.14	4.49	2.61				15.0	82.4
UM.4R_4.61-1-1	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.68	3.81	2.22				15.5	85.9
UM.4R_4.61-1-2	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	13.71	4.44	2.88	13.91	4.24	2.62	16.1	82.1
UM.4R_4.61-1-3	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	14.34	4.45	2.75				16.0	82.7
UM.4R_4.61-2-1	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.67	2.40	1.31				14.8	90.9
UM.4R_4.61-2-2	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.64	2.44	1.21	11.67	2.57	1.35	14.7	91.6
UM.4R_4.61-2-3	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	11.69	2.88	1.53				14.9	90.1
UM.4R_5.06-1-1	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.64	2.53	1.15	11.64	2.19	0.85	15.5	92.5
UM.4R_5.06-1-2	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.56	1.88	0.63				15.0	96.1
UM.4R_5.06-1-3	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	11.72	2.16	0.77				15.2	94.7
UM.8R_4.19-1-1	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	12.51	3.47	2.28	12.25	3.27	2.13	15.5	85.1
UM.8R_4.19-1-2	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	11.98	3.06	1.99				15.2	87.0
UM.8R_4.19-1-3	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	13.18	4.46	3.16				16.3	80.1
UM.8R_4.61-1-1	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.80	3.26	1.93				16.0	87.9
UM.8R_4.61-1-2	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	12.59	2.86	1.37	12.70	3.06	1.65	15.6	90.7
UM.8R_4.61-1-3	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	13.30	4.08	2.64				16.6	84.1
UM.8R_5.06-1-1	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	10.99	1.85	1.03	11.16	2.02	1.13	16.1	93.8
UM.8R_5.06-1-2	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	11.33	2.19	1.23				16.3	92.5
UM.8R_5.06-1-3	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	12.27	3.43	2.09				17.0	87.9

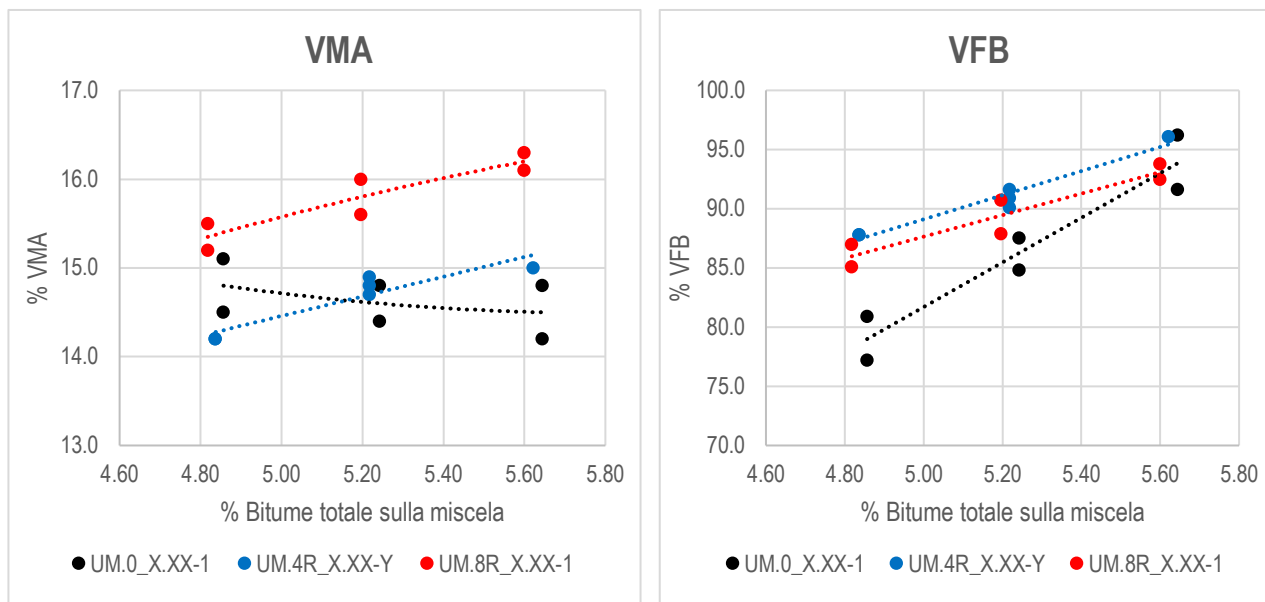
Test ID	Mix ID	WP.M [%]	B.A.A [%]	B.M [%]	BWPR. M [%]	Valori disaggregati		
						Stiffness	ITS	CTI
UI.0_5.06-1-1	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	0	1.565	252.38
UI.0_5.06-1-2	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	0	1.555	223.11
UI.0_5.06-1-3	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5199	1.554	157.62
UI.0_5.06-1-4	UI.0_5.06-1	0.00	5.06	5.65	5.65	5180	1.706	304.81
UM.0_5.06-1-1	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3588	1.511	256.56
UM.0_5.06-1-2	UM.0_5.06-1	0.00	5.06	5.64	5.67	3427	1.314	167.95
UM.0_4.19-1-1	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3613	1.254	102.37
UM.0_4.19-1-2	UM.0_4.19-1	0.00	4.19	4.86	4.89	3853	1.436	269.74
UM.0_4.61-1-1	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3510	1.375	143.79
UM.0_4.61-1-2	UM.0_4.61-1	0.00	4.61	5.24	5.27	3634	1.353	133.79
UM.4R_4.19-1-1	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5489	1.753	238.42
UM.4R_4.19-1-2	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	4857	1.687	245.63
UM.4R_4.19-1-3	UM.4R_4.19-1	0.40	4.19	4.84	5.27	5069	1.690	267.41
UM.4R_4.61-1-1	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3876	1.362	157.99
UM.4R_4.61-1-2	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	3578	1.244	132.82
UM.4R_4.61-1-3	UM.4R_4.61-1	0.40	4.61	5.22	5.65	4022	1.374	150.00
UM.4R_4.61-2-1	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	3876	1.431	200.31
UM.4R_4.61-2-2	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4027	1.446	172.87
UM.4R_4.61-2-3	UM.4R_4.61-2	0.40	4.61	5.22	5.65	4043	1.387	190.38
UM.4R_5.06-1-1	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3357	1.306	166.67
UM.4R_5.06-1-2	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3570	1.326	130.95
UM.4R_5.06-1-3	UM.4R_5.06-1	0.40	5.06	5.62	6.05	3830	1.440	167.02
UM.8R_4.19-1-1	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	3842	1.677	253.97
UM.8R_4.19-1-2	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	3019	1.481	192.15
UM.8R_4.19-1-3	UM.8R_4.19-1	0.80	4.19	4.82	5.65	4351	1.579	230.23
UM.8R_4.61-1-1	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02		1.494	211.65
UM.8R_4.61-1-2	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4213	1.524	211.61
UM.8R_4.61-1-3	UM.8R_4.61-1	0.80	4.61	5.20	6.02	4236	1.375	168.27
UM.8R_5.06-1-1	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4202	1.450	183.43
UM.8R_5.06-1-2	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	4179	1.466	188.88
UM.8R_5.06-1-3	UM.8R_5.06-1	0.80	5.06	5.60	6.43	3658	1.364	156.19











Vengono riportati di seguito una serie di allegati in cui sono riportate tutte le caratteristiche delle miscele prodotte in laboratorio.

Sono riportati di seguito una serie di sigle presenti nelle varie miscele con la rispettiva spiegazione.

- Test ID: numero del campione di una specifica miscela.
- Mix ID: nome della miscela.
- MMVT: Massima Massa Volumica Teorica, in Mg/m^3 .
- M_{air} : massa del campione in aria, in grammi (g).
- $M_{\text{H}_2\text{O}}$: massa del campione in acqua, in grammi (g).
- M_{SSD} : massa del campione Saturated Surface Dry, in grammi (g).
- T: temperatura dell'acqua, in $^{\circ}\text{C}$.
- ρ_{SSD} : Bulk Density del campione (Mg/m^3).
- v_{210} : percentuale di vuoti a 210 rotazioni.
- v_{120} : percentuale di vuoti a 120 rotazioni.
- v_{10} : percentuale di vuoti a 10 rotazioni.
- B.M: bitume totale sulla miscela, in %.
- ρ_{B} : densità del bitume (Mg/m^3).
- V_{a} : contenuto di vuoti d'aria del conglomerato bituminoso, in %;
- P_{ad} : percentuale di additivo (plastica) sul peso totale della miscela.
- ρ_{ad} : densità dell'additivo (plastica), in Mg/m^3 .
- Max P: massimo carico durante la prova ITS, in kN;
- Vertical displacement: abbassamento verticale in corrispondenza del massimo carico, in mm.

UI.0_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione impianto, 0% WP, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1, no rejuvenator.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22.1%): 2103.6 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (31%): 2950.7 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (27.2%): 2589.0 g
 - ❖ Filler (4.7%): 447.4 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 1427.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 481.6 g
 - ❖ Rejuvenator (0% su RAP): 0 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 10000 g
- } Massa totale degli aggregati: 9518.4 g

- **MMVT**

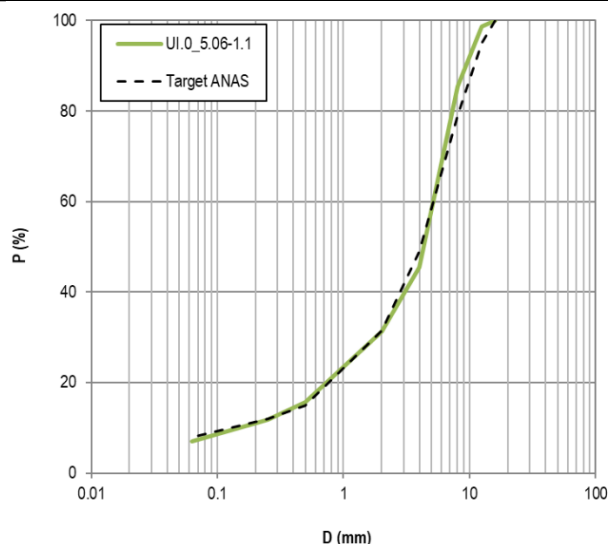
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UI.0_5.06-1.1	2.538	2.535
UI.0_5.06-1.2	2.533	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UI.0_5.06-1	5.69	6.04

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302.2	1302.2	0.0	0.0	100.00
12.5	1053.1	1071.1	18.0	18.0	98.74
8	1070.3	1260.3	190.0	208.0	85.45
4	1107.6	1677.6	570.0	778.0	45.56
2	974.7	1177.3	202.6	980.6	31.38
0.5	784	1008.5	224.5	1205.1	15.67
0.25	726.5	782.8	56.3	1261.4	11.73
0.063	767.4	836.1	68.7	1330.1	6.93
Pan	724.5	729	99.0	1429.1	0.00
Totale			1429.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UI.0_5.06-1-1	1400.3	842.8	1402.0	19.1	2.500
UI.0_5.06-1-2	1392.9	835.7	1395.8	19.1	2.483
UI.0_5.06-1-3	1393.8	837.2	1396.8	19.4	2.487
UI.0_5.06-1-4	1392.7	837.8	1394.6	21.2	2.496

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UI.0_5.06-1-1	1.39	3.01	12.71	1.73	3.34	12.97
UI.0_5.06-1-2	2.07	3.66	13.40			
UI.0_5.06-1-3	1.92	3.52	13.07			
UI.0_5.06-1-4	1.54	3.16	12.71			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UI.0_5.06-1-1	2.535	5.6	2.500	1.025	1.4	0	1.198
UI.0_5.06-1-2	2.535	5.6	2.483	1.025	2.1	0	1.198
UI.0_5.06-1-3	2.535	5.6	2.487	1.025	1.9	0	1.198
UI.0_5.06-1-4	2.535	5.6	2.496	1.025	1.5	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UI.0_5.06-1-1	15.1	90.5	15.4	88.7
UI.0_5.06-1-2	15.7	86.4		
UI.0_5.06-1-3	15.5	87.7		
UI.0_5.06-1-4	15.1	90.3		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UI.0_5.06-1-1			Non Valido		5189
UI.0_5.06-1-2			Non Valido		
UI.0_5.06-1-3	5303.0	5094.0	Valido	5199	
UI.0_5.06-1-4	5267.5	5092.1	Valido	5180	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UI.0_5.06-1-1	17.711	0.974	1.565	252.4
UI.0_5.06-1-2	17.749	1.095	1.555	223.1
UI.0_5.06-1-3	17.756	1.549	1.554	157.6
UI.0_5.06-1-4	19.254	0.879	1.706	304.8

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UI.0_5.06-1-1	1.595	Valido	234.5	Valido
UI.0_5.06-1-2				
UI.0_5.06-1-3				
UI.0_5.06-1-4				

UL.8M_5.60-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione laboratorio, 0.8% MEG, 5.60% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 6198.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 9015.6 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 7325.2 g
 - ❖ Filler (5%): 1408.7 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 4226.1 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.60% su aggregati): 1577.7 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 8.5 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 240.0 g
- Massa totale miscela: 30000 g
- } Massa totale degli aggregati: 28173.8 g

- **MMVT**

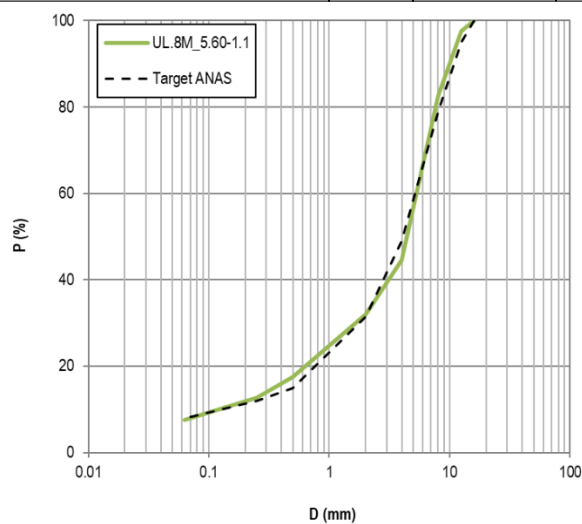
Test ID	MMVT [Mg/m³]	MMVT media [Mg/m³]
UL.8M_5.60-1.1	2.456	2.456
UL.8M_5.60-1.2	2.456	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UL.8M_5.60-1	6.91	7.42

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
31.5	1420.9	1420.9	0.0	0.0	100.00
20	1317.4	1317.4	0.0	0.0	100.00
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1217.1	33.9	33.9	97.56
8	1070.1	1275.6	205.5	239.4	82.75
4	1107.7	1636.8	529.1	768.5	44.62
2	974.7	1148.6	173.9	942.4	32.09
0.5	783.7	987.1	203.4	1145.8	17.43
0.25	726.3	791.7	65.4	1211.2	12.72
0.063	767.1	837.6	70.5	1281.7	7.64
Pan	895.1	897.5	106.0	1387.7	0.00
Totale			1387.7		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UL.8M_5.60-1-1	1344.2	796.6	1345.4	23.8	2.443
UL.8M_5.60-1-2	1337.2	794.5	1338.3	23.8	2.453
UL.8M_5.60-1-3	1342.2	797.8	1343.3	23.8	2.454

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UL.8M_5.60-1-1	0.53	1.93	10.69	1.73	3.34	12.97
UL.8M_5.60-1-2	0.14	1.28	10.59			
UL.8M_5.60-1-3	0.08	1.07	10.33			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UL.8M_5.60-1-1	2.456	6.1	2.443	1.025	0.5	0.8	1.198
UL.8M_5.60-1-2	2.456	6.1	2.453	1.025	0.1	0.8	1.198
UL.8M_5.60-1-3	2.456	6.1	2.454	1.025	0.1	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UL.8M_5.60-1-1	16.7	96.8	16.4	98.7
UL.8M_5.60-1-2	16.3	99.6		
UL.8M_5.60-1-3	16.3	99.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UL.8M_5.60-1-1	2892.9	2748.1	Valido	2821	2976
UL.8M_5.60-1-2	2881.9	3058.8	Valido	2970	
UL.8M_5.60-1-3	3074.4	3202.2	Valido	3138	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UL.8M_5.60-1-1	14.144	1.459	1.277	137.5
UL.8M_5.60-1-2	14.789	1.647	1.348	128.6
UL.8M_5.60-1-3	15.117	1.695	1.371	127.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UL.8M_5.60-1-1	1.332	Valido	131.0	Valido
UL.8M_5.60-1-2				
UL.8M_5.60-1-3				

UM.0_4.19-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0% WP, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1055.5 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1535.2 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1247.4 g
 - ❖ Filler (5%): 239.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 719.6 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 201.0 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4797.5 g

- **MMVT**

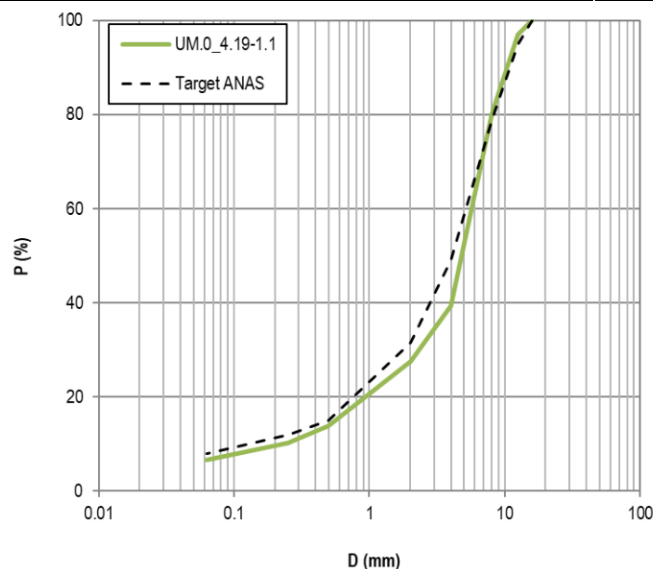
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.0_4.19-1.1	2.524	2.524
UM.0_4.19-1.2	2.523	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.0_4.19-1	4.88	5.13

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1220.1	36.9	36.9	97.02
8	1070.1	1276.4	206.3	243.2	80.36
4	1107.7	1614.2	506.5	749.7	39.46
2	974.7	1122.6	147.9	897.6	27.51
0.5	783.7	951.9	168.2	1065.8	13.93
0.25	726.5	772.5	46.0	1111.8	10.22
0.063	772.7	816.9	44.2	1156.0	6.65
Pan	895	896	82.3	1238.3	0.00
Totale			1238.3		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.0_4.19-1-1	1387.0	826.6	1394.2	23.1	2.438
UM.0_4.19-1-2	1387.1	828.5	1392.7	23.1	2.453

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.0_4.19-1-1	3.42	5.08	14.68	3.12	4.86	14.88
UM.0_4.19-1-2	2.83	4.64	15.07			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.0_4.19-1-1	2.524	4.9	2.438	1.025	3.4	0	1.198
UM.0_4.19-1-2	2.524	4.9	2.453	1.025	2.8	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.0_4.19-1-1	15.1	77.2	14.8	79.1
UM.0_4.19-1-2	14.5	80.9		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.0_4.19-1-1	3783.6	3443.3	Valido	3613	3733
UM.0_4.19-1-2	3953.4	3752.2	Valido	3853	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.0_4.19-1-1	14.651	1.924	1.254	102.4
UM.0_4.19-1-2	16.631	0.836	1.436	269.7

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.0_4.19-1-1	1.345	Valido	186.1	Valido
UM.0_4.19-1-2				

UM.0_4.61-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0% WP, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.7 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 220.3 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.3 g

- **MMVT**

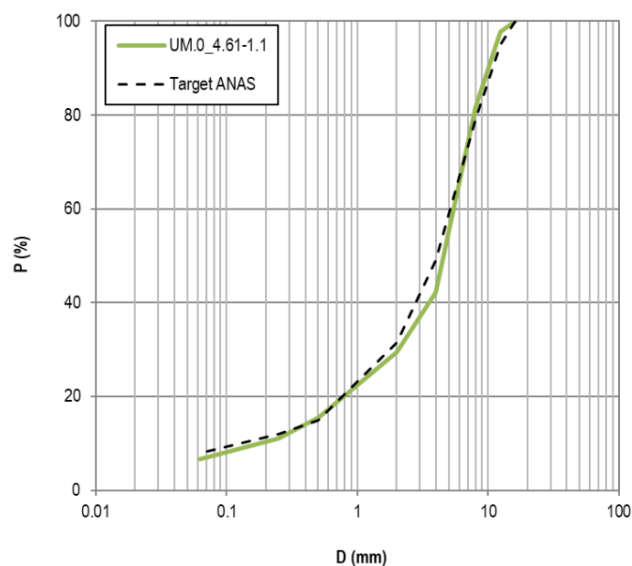
Test ID	MMVT [Mg/m³]	MMVT media [Mg/m³]
UM.0_4.61-1.1	2.527	2.530
UM.0_4.61-1.2	2.534	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.0_4.61-1	5.12	5.39

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.3	1209.4	26.1	26.1	97.76
8	1070.1	1258.6	188.5	214.6	81.55
4	1107.1	1565	457.9	672.5	42.18
2	974.5	1121.4	146.9	819.4	29.55
0.5	783.9	947.5	163.6	983.0	15.48
0.25	726.4	777.3	50.9	1033.9	11.11
0.063	772.7	825.4	52.7	1086.6	6.58
Pan	895.1	897.3	76.5	1163.1	0.00
Totale			1163.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.0_4.61-1-1	1389.3	834.1	1391.7	23.4	2.485
UM.0_4.61-1-2	1389.4	833.0	1393.0	23.4	2.475

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.0_4.61-1-1	1.78	3.52	13.55	1.99	3.65	13.82
UM.0_4.61-1-2	2.19	3.78	14.08			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.0_4.61-1-1	2.530	5.2	2.485	1.025	1.8	0	1.198
UM.0_4.61-1-2	2.530	5.2	2.475	1.025	2.2	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.0_4.61-1-1	14.4	87.5	14.6	86.2
UM.0_4.61-1-2	14.8	84.8		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.0_4.61-1-1	3613.2	3406.5	Valido	3510	3572
UM.0_4.61-1-2	3808.1	3460.3	Valido	3634	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.0_4.61-1-1	15.653	1.502	1.375	143.8
UM.0_4.61-1-2	15.549	1.589	1.353	133.8

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.0_4.61-1-1	1.364	Valido	138.8	Valido
UM.0_4.61-1-2				

UM.0_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0% WP, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1046.7 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.5 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.0 g
 - ❖ Filler (5%): 237.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.7 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 240.7 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4757.8 g

- **MMVT**

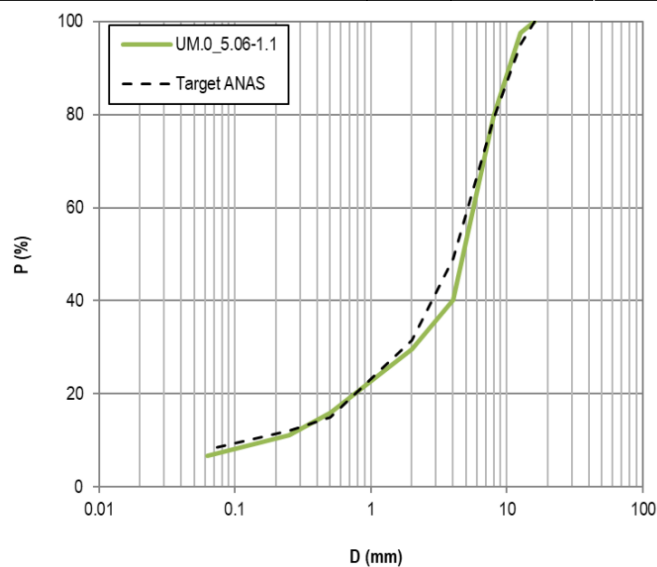
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.0_5.06-1.1	2.512	2.512
UM.0_5.06-1.2	2.511	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.0_5.06-1	5.54	5.86

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.8	1301.8	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.3	1210.6	27.3	27.3	97.59
8	1070.1	1274.3	204.2	231.5	79.60
4	1107.8	1555.1	447.3	678.8	40.18
2	974.6	1095.4	120.8	799.6	29.54
0.5	783.8	937.5	153.7	953.3	15.99
0.25	726.3	780.9	54.6	1007.9	11.18
0.063	772.6	824.9	52.3	1060.2	6.57
Pan	724.4	725.5	74.6	1134.8	0.00
Totale			1134.8		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.0_5.06-1-1	1375.9	827.4	1376.4	22.7	2.500
UM.0_5.06-1-2	1378.2	826.6	1380.9	22.7	2.481

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.0_5.06-1-1	0.45	1.71	11.32	0.84	2.35	12.10
UM.0_5.06-1-2	1.23	2.99	12.88			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.0_5.06-1-1	2.512	5.6	2.500	1.025	0.5	0	1.198
UM.0_5.06-1-2	2.512	5.6	2.481	1.025	1.2	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.0_5.06-1-1	14.2	96.2	14.5	93.9
UM.0_5.06-1-2	14.8	91.6		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.0_5.06-1-1	3750.9	3425.9	Valido	3588	3508
UM.0_5.06-1-2	3470.8	3382.5	Valido	3427	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.0_5.06-1-1	16.695	0.925	1.511	256.6
UM.0_5.06-1-2	14.483	1.229	1.314	167.9

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.0_5.06-1-1	1.412	Valido	212.3	Valido
UM.0_5.06-1-2				

UM.4M_4.19-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 200.2 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.4 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

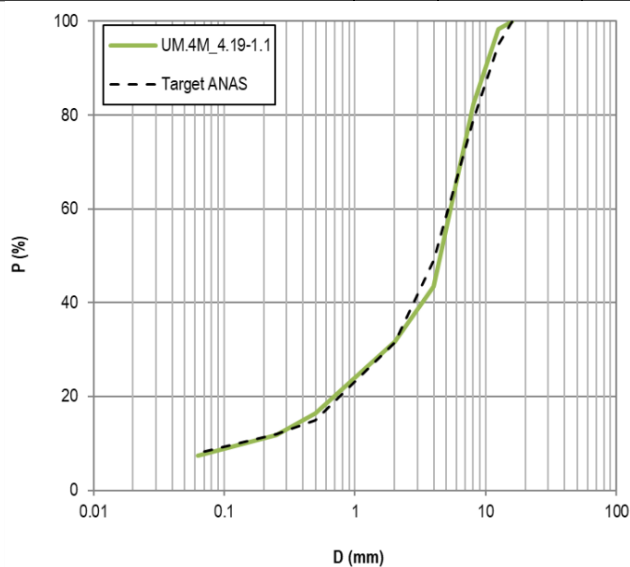
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.19-1.1	2.518	2.513
UM.4M_4.19-1.2	2.509	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.19-1	5.49	5.81

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183	1203.7	20.7	20.7	98.32
8	1069.9	1269	199.1	219.8	82.21
4	1107.7	1586.7	479.0	698.8	43.43
2	974.6	1120.5	145.9	844.7	31.62
0.5	783.6	972	188.4	1033.1	16.37
0.25	726.3	783.3	57.0	1090.1	11.75
0.063	767.2	822	54.8	1144.9	7.32
Pan	724.1	727.6	90.4	1235.3	0.00
Totale			1235.3		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4M_4.19-1-1	1381.5	826.4	1385.9	26.8	2.461
UM.4M_4.19-1-2	1378.1	827.8	1380.9	26.8	2.483

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4M_4.19-1-1	2.08	3.54	12.84	1.64	3.12	12.59
UM.4M_4.19-1-2	1.19	2.69	12.34			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4M_4.19-1-1	2.513	4.8	2.461	1.025	2.1	0.4	1.198
UM.4M_4.19-1-2	2.513	4.8	2.483	1.025	1.2	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.19-1-1	14.4	85.7	14.1	88.3
UM.4M_4.19-1-2	13.7	90.9		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.19-1-1	5169.0	5296.8	Valido	5233	4993
UM.4M_4.19-1-2	4800.6	4703.7	Valido	4752	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.19-1-1	20.225	1.093	1.764	253.5
UM.4M_4.19-1-2	17.970	1.639	1.589	152.3

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4M_4.19-1-1	1.677	Non Valido	202.9	Valido
UM.4M_4.19-1-2				

UM.4M_4.19-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 2.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 200.2 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.4 g

- **MMVT**

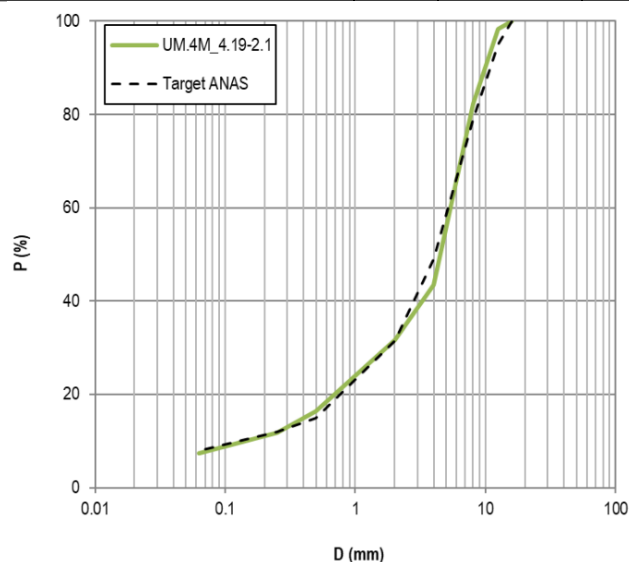
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.19-2.1	2.518	2.513
UM.4M_4.19-2.2	2.509	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.19-2	5.49	5.81

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183	1203.7	20.7	20.7	98.32
8	1069.9	1269	199.1	219.8	82.21
4	1107.7	1586.7	479.0	698.8	43.43
2	974.6	1120.5	145.9	844.7	31.62
0.5	783.6	972	188.4	1033.1	16.37
0.25	726.3	783.3	57.0	1090.1	11.75
0.063	767.2	822	54.8	1144.9	7.32
Pan	724.1	727.6	90.4	1235.3	0.00
Totale			1235.3		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4M_4.19-2-1	1380.4	826.0	1385.6	25.9	2.459
UM.4M_4.19-2-2	1380.7	829.9	1383.5	25.9	2.486
UM.4M_4.19-2-3	1381.2	829.4	1385.3	25.9	2.477

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4M_4.19-2-1	2.16	3.49	12.10	1.56	2.86	11.67
UM.4M_4.19-2-2	1.07	2.17	11.07			
UM.4M_4.19-2-3	1.45	2.93	11.83			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4M_4.19-2-1	2.513	4.8	2.459	1.025	2.1	0.4	1.198
UM.4M_4.19-2-2	2.513	4.8	2.486	1.025	1.1	0.4	1.198
UM.4M_4.19-2-3	2.513	4.8	2.477	1.025	1.4	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.19-2-1	14.4	85.7	13.9	89.1
UM.4M_4.19-2-2	13.6	91.7		
UM.4M_4.19-2-3	13.8	90.0		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.19-2-1	3934.9	3686.8	Valido	3811	4993
UM.4M_4.19-2-2	4267.6	3909.0	Valido	4088	
UM.4M_4.19-2-3	4513.2	4015.3	Valido	4264	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.19-2-1	17.361	1.121	1.524	213.5
UM.4M_4.19-2-2	16.691	1.240	1.511	191.4
UM.4M_4.19-2-3	18.265	1.077	1.606	234.2

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4M_4.19-2-1	1.547	Valido	213.0	Valido
UM.4M_4.19-2-2				
UM.4M_4.19-2-3				

UM.4M_4.61-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

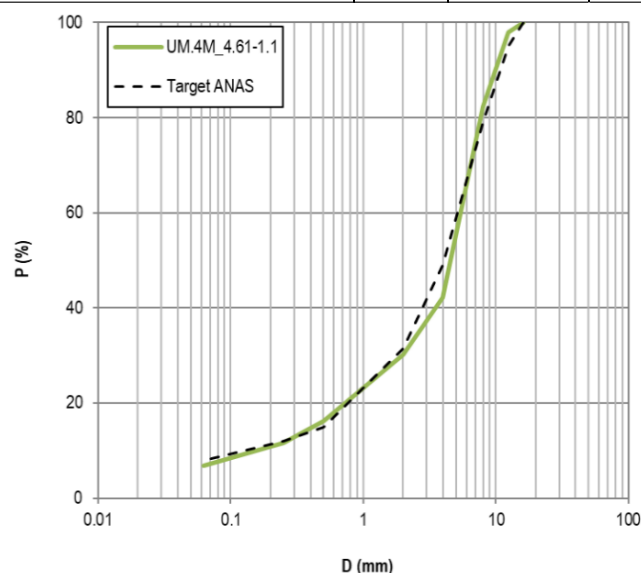
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-1.1	2.518	2.514
UM.4M_4.61-1.2	2.510	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.61-1	5.44	5.75

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.1	1207.6	24.5	24.5	97.95
8	1070.1	1257.9	187.8	212.3	82.23
4	1107.1	1586.4	479.3	691.6	42.11
2	974.6	1116	141.4	833.0	30.27
0.5	783.9	951.1	167.2	1000.2	16.27
0.25	726.4	782.8	56.4	1056.6	11.55
0.063	772.8	829.3	56.5	1113.1	6.82
Pan	895	897.5	81.5	1194.6	0.00
Totale			1194.6		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4M_4.61-1-1	1380.9	828.0	1385.2	23.4	2.472
UM.4M_4.61-1-2	1380.4	825.7	1384.0	23.4	2.466

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4M_4.61-1-1	1.67	3.27	12.85	1.78	3.33	13.04
UM.4M_4.61-1-2	1.90	3.38	13.23			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4M_4.61-1-1	2.514	5.2	2.472	1.025	1.7	0.4	1.198
UM.4M_4.61-1-2	2.514	5.2	2.466	1.025	1.9	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.61-1-1	15.1	88.5	15.2	88.1
UM.4M_4.61-1-2	15.2	87.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.61-1-1	4076.6	3899.6	Valido	3988	3677
UM.4M_4.61-1-2	3532.8	3199.8	Valido	3366	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.61-1-1	16.814	1.385	1.472	166.9
UM.4M_4.61-1-2	14.250	1.544	1.248	127.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4M_4.61-1-1	1.360	Valido	146.9	Valido
UM.4M_4.61-1-2				

UM.4M_4.61-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 2.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g
- ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

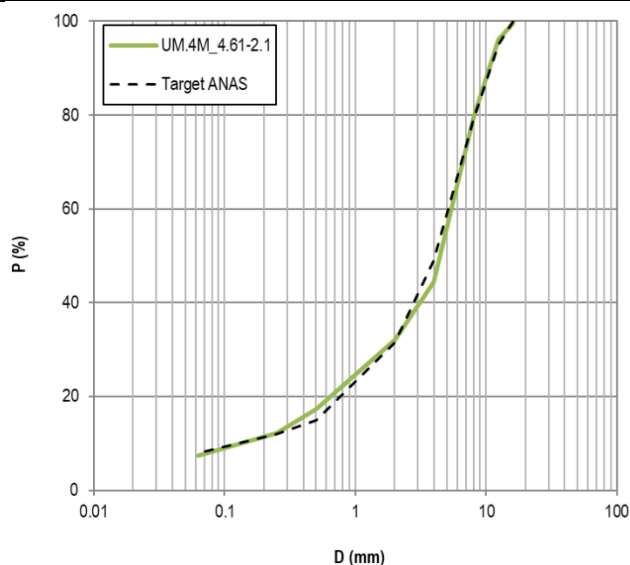
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-2.1	2.530	2.527
UM.4M_4.61-2.2	2.525	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.61-1	5.25	5.54

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1307.8	5.9	5.9	99.54
12.5	1183.2	1226.6	43.4	49.3	96.18
8	1070	1288.2	218.2	267.5	79.27
4	1107.8	1557	449.2	716.7	44.47
2	974.6	1134.6	160.0	876.7	32.07
0.5	783.8	974.8	191.0	1067.7	17.27
0.25	726.4	791.6	65.2	1132.9	12.22
0.063	767.5	829.5	62.0	1194.9	7.42
Pan	894.9	899.4	95.7	1290.6	0.00
Totale			1290.6		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4M_4.61-2-1	1379.2	828.8	1382.9	25.3	2.482
UM.4M_4.61-2-2	1380.7	827.5	1383.6	25.3	2.475
UM.4M_4.61-2-3	1381.1	827.0	1386.6	25.3	2.461

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4M_4.61-2-1	1.80	3.28	12.29	2.16	3.97	13.17
UM.4M_4.61-2-2	2.05	3.39	12.66			
UM.4M_4.61-2-3	2.63	5.22	14.57			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4M_4.61-2-1	2.527	5.2	2.482	1.025	1.8	0.4	1.198
UM.4M_4.61-2-2	2.527	5.2	2.475	1.025	2.1	0.4	1.198
UM.4M_4.61-2-3	2.527	5.2	2.461	1.025	2.6	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.61-2-1	15.2	88.3	15.5	86.1
UM.4M_4.61-2-2	15.5	86.3		
UM.4M_4.61-2-3	15.9	83.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.61-2-1	3725.0	3600.6	Valido	3663	3823
UM.4M_4.61-2-2	3634.2	3412.2	Valido	3523	
UM.4M_4.61-2-3	4432.6	4131.6	Valido	4282	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.61-2-1	15.480	1.312	1.370	164.0
UM.4M_4.61-2-2	14.861	1.506	1.306	136.2
UM.4M_4.61-2-3	15.783	1.688	1.377	128.1

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4M_4.61-2-1	1.351	Valido	142.8	Valido
UM.4M_4.61-2-2				
UM.4M_4.61-2-3				

UM.4M_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1042.5 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1516.4 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1232.1 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 239.8 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4738.8 g

- **MMVT**

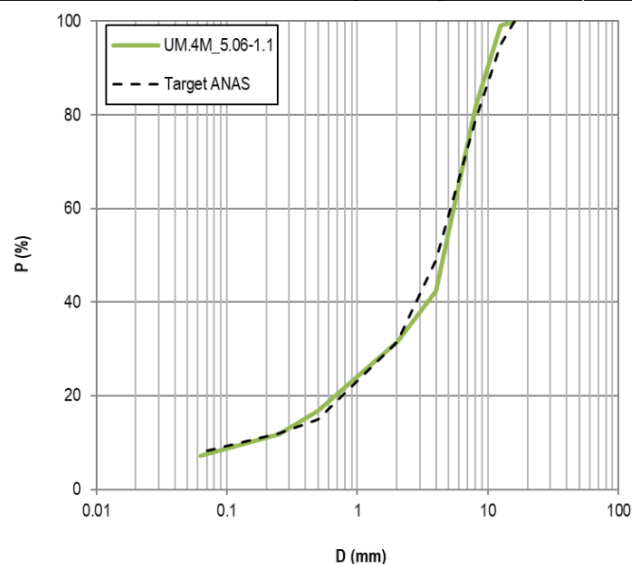
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_5.06-1.1	2.493	2.491
UM.4M_5.06-1.2	2.490	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_5.06-1	5.95	6.32

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302.1	1302.1	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.6	1194.4	10.8	10.8	99.07
8	1070.1	1271.1	201.0	211.8	81.68
4	1107.7	1562.2	454.5	666.3	42.37
2	974.7	1100.8	126.1	792.4	31.46
0.5	783.8	954.6	170.8	963.2	16.69
0.25	726.5	784.1	57.6	1020.8	11.70
0.063	767.5	819.9	52.4	1073.2	7.17
Pan	724.5	727.6	82.9	1156.1	0.00
Totale			1156.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.4M_5.06-1-1	1366.5	818.3	1367.5	26.8	2.480
UM.4M_5.06-1-2	1366.3	818.3	1367.9	26.8	2.478

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4M_5.06-1-1	0.47	1.98	11.65	0.51	2.03	11.84
UM.4M_5.06-1-2	0.56	2.08	12.02			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.4M_5.06-1-1	2.491	5.6	2.480	1.025	0.4	0.4	1.198
UM.4M_5.06-1-2	2.491	5.6	2.478	1.025	0.5	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_5.06-1-1	14.8	97.1	14.9	96.8
UM.4M_5.06-1-2	14.9	96.4		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_5.06-1-1	4036.3	3673.2	Valido	3855	3765
UM.4M_5.06-1-2	3729.6	3620.3	Valido	3675	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_5.06-1-1	17.023	1.417	1.524	169.0
UM.4M_5.06-1-2	17.030	1.321	1.527	181.6

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4M_5.06-1-1	1.526	Valido	175.3	Valido
UM.4M_5.06-1-2				

UM.4R_4.19-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% Redpol, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 200.2 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.4 g

- **MMVT**

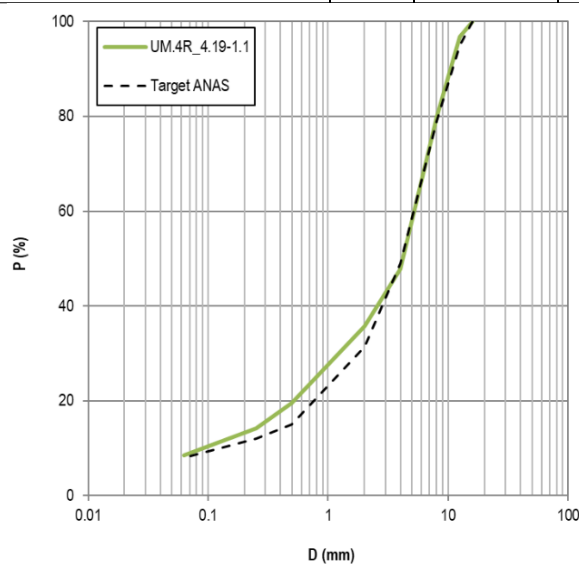
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4R_4.19-1.1	2.525	2.529
UM.4R_4.19-1.2	2.532	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4R_4.19-1	5.42	5.73

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1225.4	42.2	42.2	96.75
8	1070.1	1288.7	218.6	260.8	79.92
4	1107.8	1523.9	416.1	676.9	47.89
2	979.7	1137.7	158.0	834.9	35.72
0.5	783.7	993	209.3	1044.2	19.61
0.25	726.4	797.7	71.3	1115.5	14.12
0.063	767.2	840.5	73.3	1188.8	8.48
Pan	895.2	898	110.1	1298.9	0.00
Totale			1298.9		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4R_4.19-1-1	1381.7	830.7	1385.0	24.6	2.486
UM.4R_4.19-1-2	1381.0	830.0	1383.9	24.6	2.486
UM.4R_4.19-1-3	1381.0	826.5	1385.7	24.6	2.463

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4R_4.19-1-1	1.70	2.65	11.34	1.99	3.26	11.99
UM.4R_4.19-1-2	1.68	2.63	11.50			
UM.4R_4.19-1-3	1.45	2.93	11.83			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4R_4.19-1-1	2.529	4.8	2.486	1.025	1.7	0.4	1.198
UM.4R_4.19-1-2	2.529	4.8	2.486	1.025	1.7	0.4	1.198
UM.4R_4.19-1-3	2.529	4.8	2.463	1.025	2.6	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4R_4.19-1-1	14.2	87.8	14.5	86.0
UM.4R_4.19-1-2	14.2	87.8		
UM.4R_4.19-1-3	15.0	82.4		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4R_4.19-1-1	5544.4	5433.6	Valido	5489	5138
UM.4R_4.19-1-2	5041.1	4672.9	Valido	4857	
UM.4R_4.19-1-3	5100.5	5038.1	Valido	5069	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4R_4.19-1-1	19.744	1.155	1.753	238.4
UM.4R_4.19-1-2	18.930	1.079	1.687	245.6
UM.4R_4.19-1-3	19.182	0.993	1.690	267.4

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4R_4.19-1-1	1.720	Non Valido	250.5	Valido
UM.4R_4.19-1-2				
UM.4R_4.19-1-3				

UM.4R_4.61-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% Redpol, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g
- ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

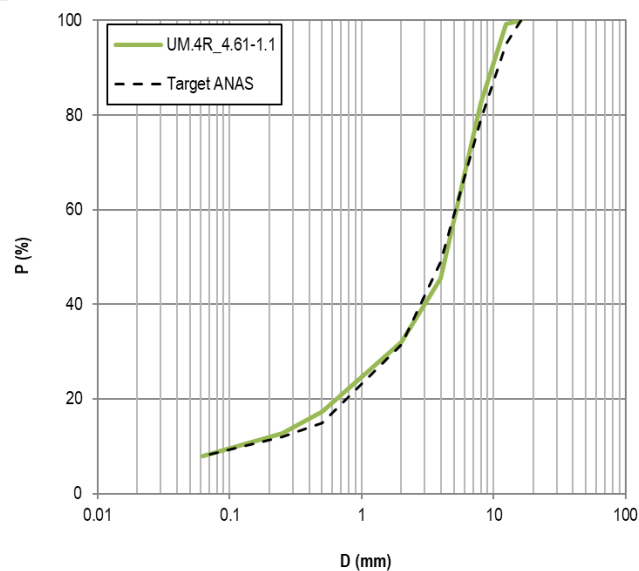
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4R_4.61-1.1	2.512	2.518
UM.4R_4.61-1.2	2.523	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4R_4.61-1	5.48	5.80

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1193.4	10.2	10.2	99.21
8	1070	1286.7	216.7	226.9	82.52
4	1107.8	1587.9	480.1	707.0	45.52
2	979.8	1154.2	174.4	881.4	32.08
0.5	783.7	974.7	191.0	1072.4	17.36
0.25	726.4	785.9	59.5	1131.9	12.78
0.063	767.3	830.1	62.8	1194.7	7.94
Pan	895.1	901.3	103.0	1297.7	0.00
Totale			1297.7		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4R_4.6I-1-1	1380.8	824.8	1384.1	24.6	2.462
UM.4R_4.6I-1-2	1383.0	824.2	1388.2	24.6	2.445
UM.4R_4.6I-1-3	1382.8	824.1	1387.3	24.6	2.448

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4R_4.6I-1-1	2.22	3.81	13.68	2.62	4.24	13.91
UM.4R_4.6I-1-2	2.88	4.44	13.71			
UM.4R_4.6I-1-3	2.75	4.45	14.34			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4R_4.6I-1-1	2.518	5.2	2.464	1.025	2.2	0.4	1.198
UM.4R_4.6I-1-2	2.518	5.2	2.445	1.025	2.9	0.4	1.198
UM.4R_4.6I-1-3	2.518	5.2	2.448	1.025	2.8	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4R_4.6I-1-1	15.5	85.9	15.9	83.6
UM.4R_4.6I-1-2	16.1	82.1		
UM.4R_4.6I-1-3	16.0	82.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4R_4.6I-1-1	4060.4	3691.1	Valido	3876	3825
UM.4R_4.6I-1-2	3728	3428.3	Valido	3578	
UM.4R_4.6I-1-3	4022.3	4022	Valido	4022	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4R_4.6I-1-1	15.530	1.354	1.362	158.0
UM.4R_4.6I-1-2	14.336	1.471	1.244	132.8
UM.4R_4.6I-1-3	15.825	1.439	1.374	150.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4R_4.6I-1-1	1.327	Valido	146.9	Valido
UM.4R_4.6I-1-2				
UM.4R_4.6I-1-3				

UM.4R_4.61-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% Redpol, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 2.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g
- ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

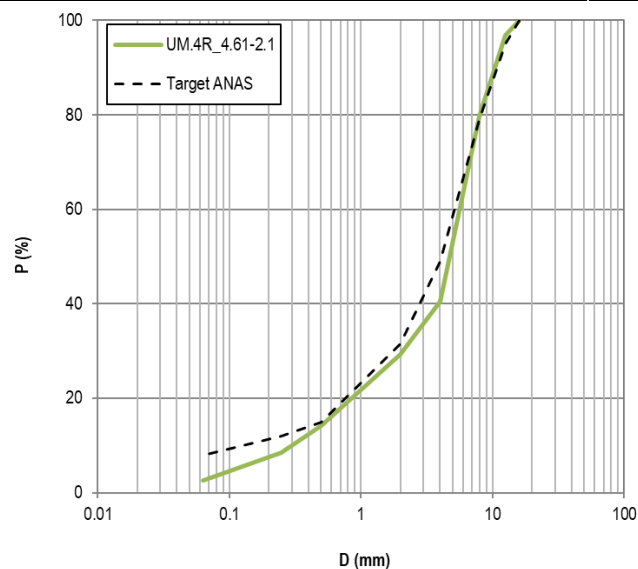
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4R_4.61-2.1	2.526	2.521
UM.4R_4.61-2.2	2.516	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4R_4.61-2	5.65	5.99

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1224.5	41.3	41.3	96.80
8	1070.1	1291.6	221.5	262.8	79.63
4	1107.8	1613.5	505.7	768.5	40.43
2	979.8	1122.5	142.7	911.2	29.36
0.5	783.7	978.4	194.7	1105.9	14.27
0.25	726.4	801.8	75.4	1181.3	8.43
0.063	767.3	841.9	74.6	1255.9	2.64
Pan	895.1	903.1	34.1	1290.0	0.00
Totale			1290.0		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4R_4.61-2-1	1383.1	830.6	1384.8	25.3	2.488
UM.4R_4.61-2-2	1383.2	831.6	1385.3	25.3	2.491
UM.4R_4.61-2-3	1383.0	831.1	1386.5	25.3	2.483

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4R_4.61-2-1	1.31	2.40	11.67	1.35	2.57	11.67
UM.4R_4.61-2-2	1.21	2.44	11.64			
UM.4R_4.61-2-3	1.53	2.88	11.69			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4R_4.61-2-1	2.521	5.2	2.488	1.025	1.3	0.4	1.198
UM.4R_4.61-2-2	2.521	5.2	2.491	1.025	1.2	0.4	1.198
UM.4R_4.61-2-3	2.521	5.2	2.483	1.025	1.5	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4R_4.61-2-1	14.8	90.9	14.8	90.9
UM.4R_4.61-2-2	14.7	91.6		
UM.4R_4.61-2-3	14.9	90.1		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4R_4.61-2-1	3909.1	3843.5	Valido	3876	3982
UM.4R_4.61-2-2	4104.2	3950.4	Valido	4027	
UM.4R_4.61-2-3	4324.3	3761.3	Valido	4043	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4R_4.61-2-1	16.086	1.122	1.431	200.3
UM.4R_4.61-2-2	16.247	1.314	1.446	172.9
UM.4R_4.61-2-3	15.706	1.144	1.387	190.4

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4R_4.61-2-1	1.421	Valido	187.9	Valido
UM.4R_4.61-2-2				
UM.4R_4.61-2-3				

UM.4R_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% Redpol, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1042.5 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1516.4 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1232.1 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
- } Massa totale degli aggregati: 4738.8 g
- ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 239.8 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

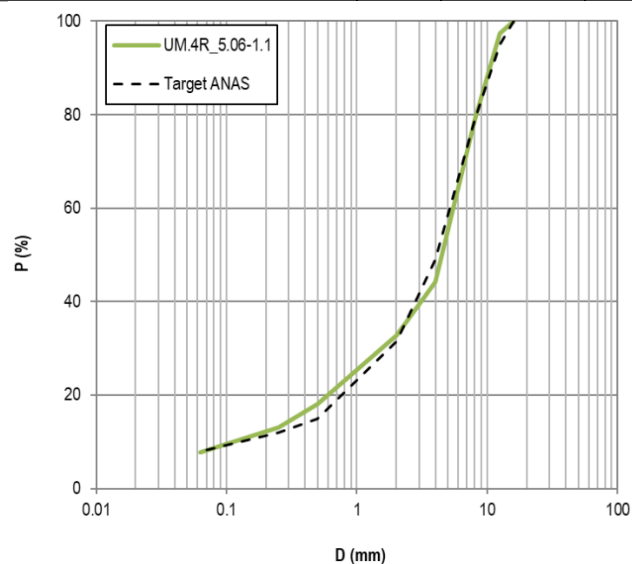
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4R_5.06-1.1	2.500	2.503
UM.4R_5.06-1.2	2.506	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4R_5.06-1	5.75	6.10

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1215.7	32.5	32.5	97.44
8	1070	1304	234.0	266.5	79.03
4	1107.7	1550.8	443.1	709.6	44.16
2	979.8	1124.4	144.6	854.2	32.78
0.5	783.7	971.5	187.8	1042.0	18.00
0.25	726.4	790	63.6	1105.6	13.00
0.063	767.3	834.4	67.1	1172.7	7.72
Pan	895	900.1	98.1	1270.8	0.00
Totale			1270.8		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.4R_5.06-1-1	1365.2	816.4	1366.6	24.8	2.474
UM.4R_5.06-1-2	1365.4	818.4	1366.2	24.8	2.487
UM.4R_5.06-1-3	1365.7	818.3	1366.6	24.8	2.484

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.4R_5.06-1-1	1.15	2.53	11.64	0.85	2.19	11.64
UM.4R_5.06-1-2	0.63	1.88	11.56			
UM.4R_5.06-1-3	0.77	2.16	11.72			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.4R_5.06-1-1	2.503	5.6	2.474	1.025	1.2	0.4	1.198
UM.4R_5.06-1-2	2.503	5.6	2.487	1.025	0.6	0.4	1.198
UM.4R_5.06-1-3	2.503	5.6	2.484	1.025	0.8	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4R_5.06-1-1	15.5	92.5	15.2	94.4
UM.4R_5.06-1-2	15.0	96.1		
UM.4R_5.06-1-3	15.2	94.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4R_5.06-1-1	3421.8	3291.9	Valido	3357	3586
UM.4R_5.06-1-2	3621.7	3517.5	Valido	3570	
UM.4R_5.06-1-3	3938.6	3721.9	Valido	3830	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4R_5.06-1-1	14.529	1.231	1.306	166.7
UM.4R_5.06-1-2	14.680	1.591	1.326	130.9
UM.4R_5.06-1-3	15.901	1.354	1.440	167.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.4R_5.06-1-1	1.357	Valido	154.9	Valido
UM.4R_5.06-1-2				
UM.4R_5.06-1-3				

UM.8M_4.19-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 199.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

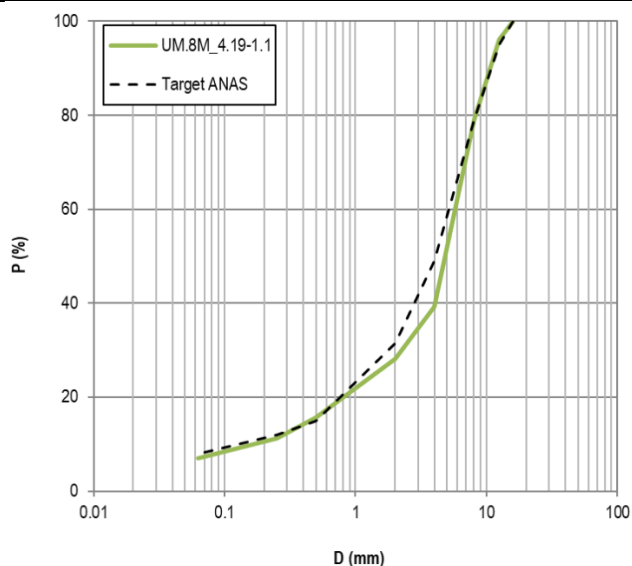
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-1.1	2.511	2.514
UM.8M_4.19-1.2	2.516	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.19-1	5.43	5.74

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1228.6	45.4	45.4	96.10
8	1070.2	1270.1	199.9	245.3	78.92
4	1107.7	1568.8	461.1	706.4	39.31
2	974.7	1104.2	129.5	835.9	28.18
0.5	783.7	930.2	146.5	982.4	15.59
0.25	726.5	777	50.5	1032.9	11.26
0.063	772.8	821.6	48.8	1081.7	7.06
Pan	895.2	896	82.2	1163.9	0.00
Totale			1163.9		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-1-1	1381.8	820.4	1389.2	23.1	2.423
UM.8M_4.19-1-2	1381.7	819.1	1390.9	23.1	2.411

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_4.19-1-1	3.59	5.13	14.65	3.85	5.31	14.55
UM.8M_4.19-1-2	4.10	5.50	14.45			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-1-1	2.514	4.8	2.423	1.025	3.6	0.8	1.198
UM.8M_4.19-1-2	2.514	4.8	2.411	1.025	4.1	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.19-1-1	16.6	78.1	16.8	77.0
UM.8M_4.19-1-2	17.0	75.9		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E _i [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.19-1-1	5547.1	5259.8	Valido	5403	4809
UM.8M_4.19-1-2	4239.1	4189.2	Valido	4214	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.19-1-1	20.239	0.847	1.736	321.9
UM.8M_4.19-1-2	19.616	0.787	1.676	334.5

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_4.19-1-1	1.706	Non Valido	328.2	Valido
UM.8M_4.19-1-2				

UM.8M_4.19-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 2 (175°C temperatura di miscelazione, 165°C temperatura di compattazione).

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 199.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

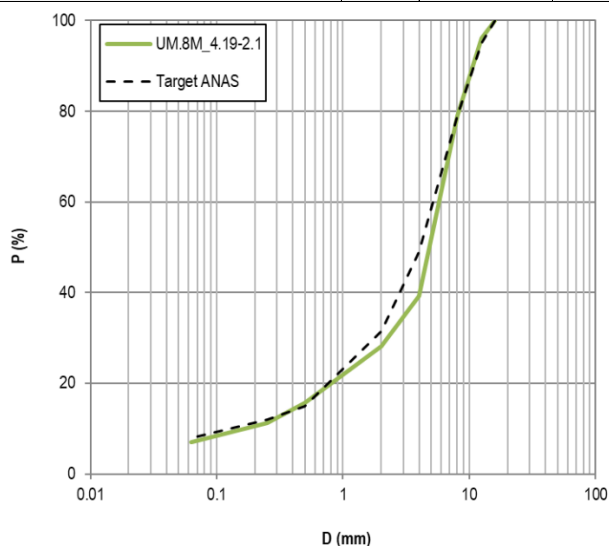
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2.1	2.511	2.514
UM.8M_4.19-2.2	2.516	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.19-2	5.43	5.74

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1228.6	45.4	45.4	96.10
8	1070.2	1270.1	199.9	245.3	78.92
4	1107.7	1568.8	461.1	706.4	39.31
2	974.7	1104.2	129.5	835.9	28.18
0.5	783.7	930.2	146.5	982.4	15.59
0.25	726.5	777	50.5	1032.9	11.26
0.063	772.8	821.6	48.8	1081.7	7.06
Pan	895.2	896	82.2	1163.9	0.00
Totale			1163.9		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2-1	1381.1	826.4	1385.8	25.6	2.461
UM.8M_4.19-2-2	1380.9	826.0	1384.1	25.6	2.467
UM.8M_4.19-2-3	1381.5	826.8	1385.3	25.6	2.466

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_4.19-2-1	2.08	3.54	12.68	1.95	3.42	12.63
UM.8M_4.19-2-2	1.87	3.35	12.70			
UM.8M_4.19-2-3	1.89	3.36	12.51			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2-1	2.514	4.8	2.461	1.025	2.1	0.8	1.198
UM.8M_4.19-2-2	2.514	4.8	2.467	1.025	1.9	0.8	1.198
UM.8M_4.19-2-3	2.514	4.8	2.466	1.025	1.9	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.19-2-1	15.3	86.1	15.2	87.0
UM.8M_4.19-2-2	15.1	87.4		
UM.8M_4.19-2-3	15.1	87.4		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.19-2-1	4698.3	4343.9	Valido	4521	5163
UM.8M_4.19-2-2	5348.6	4547.7	Valido	4948	
UM.8M_4.19-2-3	6274	5767.4	Valido	6021	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.19-2-1	17.786	1.259	1.563	195.0
UM.8M_4.19-2-2	18.684	1.109	1.651	233.9
UM.8M_4.19-2-3	20.519	1.034	1.803	274.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_4.19-2-1	1.673	Non Valido	234.3	Valido
UM.8M_4.19-2-2				
UM.8M_4.19-2-3				

UM.8M_4.61-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1042.8 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1516.8 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1232.4 g
 - ❖ Filler (5%): 237.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 711.0 g
- } Massa totale degli aggregati: 4740.1 g
- ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 218.5 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

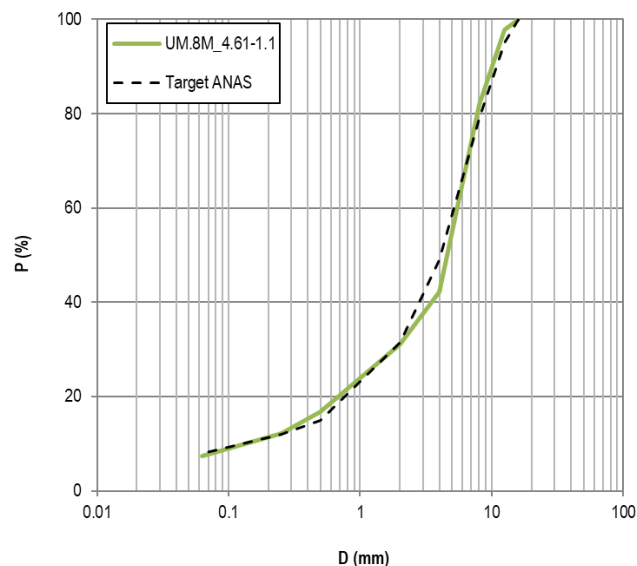
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.61-1.1	2.505	2.500
UM.8M_4.61-1.2	2.495	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.61-1	5.74	6.09

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1182.9	1209	26.1	26.1	97.80
8	1070.1	1258.4	188.3	214.4	81.92
4	1107.8	1579.6	471.8	686.2	42.15
2	974.8	1105.4	130.6	816.8	31.14
0.5	783.8	954.6	170.8	987.6	16.74
0.25	726.8	782	55.2	1042.8	12.08
0.063	767.3	824.1	56.8	1099.6	7.29
Pan	724.4	726.5	86.5	1186.1	0.00
Totale			1186.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_4.61-1-1	1370.8	818.2	1373.5	25.6	2.461
UM.8M_4.61-1-2	1373.6	815.9	1378.3	25.6	2.435

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_4.61-1-1	1.55	2.90	12.39	2.07	3.41	12.63
UM.8M_4.61-1-2	2.59	3.91	12.87			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_4.61-1-1	2.500	5.2	2.461	1.025	1.6	0.8	1.198
UM.8M_4.61-1-2	2.500	5.2	2.435	1.025	2.6	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.61-1-1	15.7	90.0	16.2	87.1
UM.8M_4.61-1-2	16.6	84.2		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.61-1-1	5056.0	4575.2	Valido	4816	4650
UM.8M_4.61-1-2	4750.0	4219.4	Valido	4485	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.61-1-1	19.370	1.355	1.704	197.5
UM.8M_4.61-1-2	17.306	1.523	1.507	155.4

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_4.61-1-1	1.605	Non Valido	176.5	Valido
UM.8M_4.61-1-2				

UM.8M_4.61-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 2 (175°C temperatura di miscelazione, 165°C temperatura di compattazione).

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1042.8 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1516.8 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1232.4 g
 - ❖ Filler (5%): 237.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 711.0 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 218.5 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4740.1 g

- **MMVT**

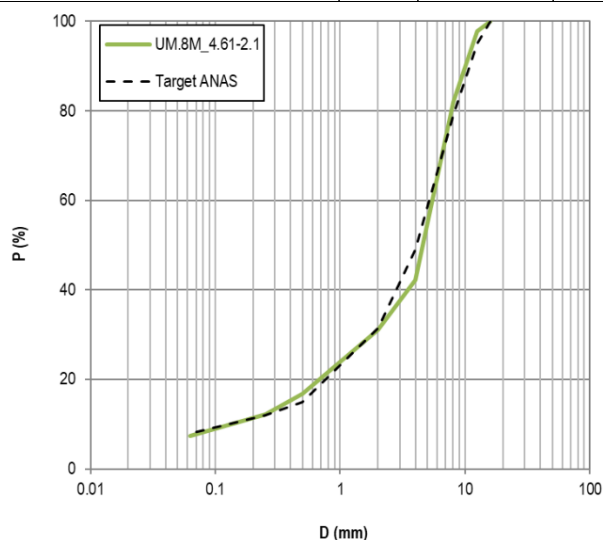
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.61-2.1	2.505	2.500
UM.8M_4.61-2.2	2.495	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.61-2	5.74	6.09

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1182.9	1209	26.1	26.1	97.80
8	1070.1	1258.4	188.3	214.4	81.92
4	1107.8	1579.6	471.8	686.2	42.15
2	974.8	1105.4	130.6	816.8	31.14
0.5	783.8	954.6	170.8	987.6	16.74
0.25	726.8	782	55.2	1042.8	12.08
0.063	767.3	824.1	56.8	1099.6	7.29
Pan	724.4	726.5	86.5	1186.1	0.00
Totale			1186.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.8M_4.61-2-1	1369.6	815.8	1372.2	24.5	2.455
UM.8M_4.61-2-2	1371.0	819.3	1372.4	24.5	2.472
UM.8M_4.61-2-3	1372.2	819.4	1375.3	24.5	2.462

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_4.61-2-1	1.80	3.29	12.35	1.48	3.42	12.87
UM.8M_4.61-2-2	1.12	2.49	12.16			
UM.8M_4.61-2-3	1.53	4.49	14.10			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.8M_4.61-2-1	2.500	5.2	2.455	1.025	1.8	0.8	1.198
UM.8M_4.61-2-2	2.500	5.2	2.472	1.025	1.1	0.8	1.198
UM.8M_4.61-2-3	2.500	5.2	2.462	1.025	1.5	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.61-2-1	15.9	88.6	15.6	90.7
UM.8M_4.61-2-2	15.3	92.8		
UM.8M_4.61-2-3	15.6	90.6		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.61-2-1	3551.7	3362.3	Valido	3457	4070
UM.8M_4.61-2-2	4464.7	4307.3	Valido	4386	
UM.8M_4.61-2-3	4458.9	4275.2	Valido	4367	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.61-2-1	16.245	1.114	1.443	203.5
UM.8M_4.61-2-2	19.247	0.916	1.723	295.4
UM.8M_4.61-2-3	17.047	1.542	1.501	152.9

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_4.61-2-1	1.556	Valido	217.3	Valido
UM.8M_4.61-2-2				
UM.8M_4.61-2-3				

UM.8M_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1038.3 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1510.3 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1227.1 g
 - ❖ Filler (5%): 236.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 708.8 g
- } Massa totale degli aggregati: 4719.8 g
- ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 238.8 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

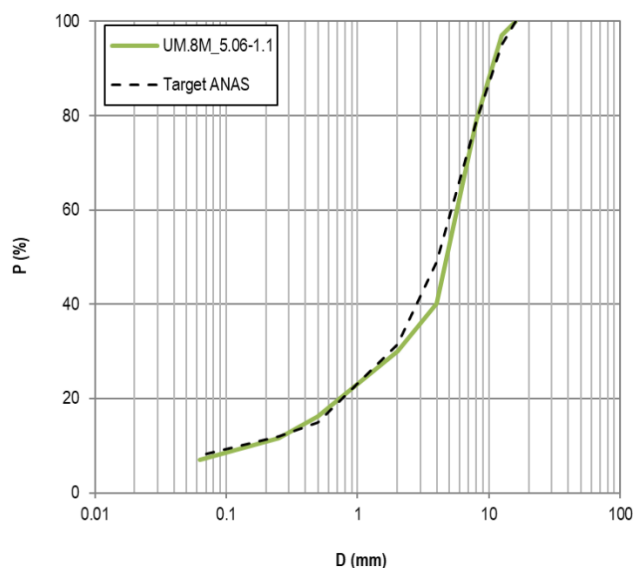
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-1.1	2.490	2.492
UM.8M_5.06-1.2	2.495	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_5.06-1	5.95	6.33

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1219.6	36.4	36.4	97.06
8	1070	1290.7	220.7	257.1	79.24
4	1107.8	1592.9	485.1	742.2	40.08
2	974.7	1099.3	124.6	866.8	30.02
0.5	783.9	954.4	170.5	1037.3	16.26
0.25	726.6	783.6	57.0	1094.3	11.66
0.063	767.5	825.1	57.6	1151.9	7.01
Pan	724.5	728.7	86.8	1238.7	0.00
Totale			1238.7		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-1-1	1368.1	815.6	1370.4	25.6	2.458
UM.8M_5.06-1-2	1369.4	813.1	1371.8	25.6	2.444

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_5.06-1-1	1.37	2.60	12.12	1.66	3.01	12.47
UM.8M_5.06-1-2	1.96	3.43	12.83			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-1-1	2.492	5.6	2.458	1.025	1.4	0.8	1.198
UM.8M_5.06-1-2	2.492	5.6	2.444	1.025	1.9	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_5.06-1-1	16.5	91.3	16.7	90.0
UM.8M_5.06-1-2	16.9	88.7		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E _i [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_5.06-1-1	4423.4	4384.0	Valido	4404	4427
UM.8M_5.06-1-2	4564.0	4336.0	Valido	4450	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_5.06-1-1	17.519	1.244	1.558	196.8
UM.8M_5.06-1-2	18.073	1.200	1.589	208.0

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_5.06-1-1	1.574	Valido	202.4	Valido
UM.8M_5.06-1-2				

UM.8M_5.06-2

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 2 (175°C temperatura di miscelazione, 165°C temperatura di compattazione).

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1038.3 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1510.3 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1227.1 g
 - ❖ Filler (5%): 236.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 708.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 238.8 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4719.8 g

- **MMVT**

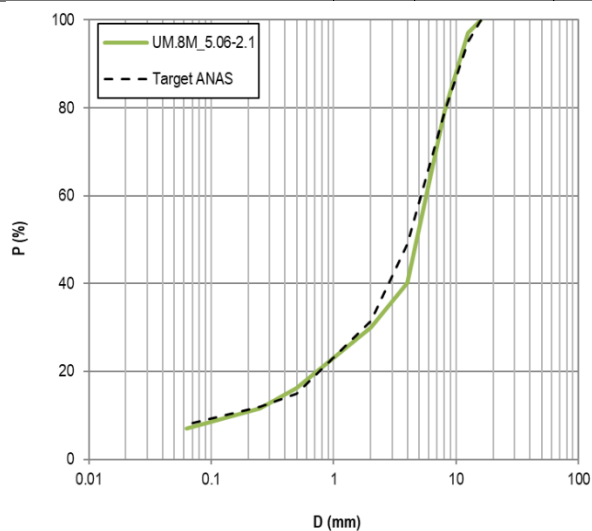
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-2.1	2.490	2.492
UM.8M_5.06-2.2	2.495	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_5.06-2	5.95	6.93

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1219.6	36.4	36.4	97.06
8	1070	1290.7	220.7	257.1	79.24
4	1107.8	1592.9	485.1	742.2	40.08
2	974.7	1099.3	124.6	866.8	30.02
0.5	783.9	954.4	170.5	1037.3	16.26
0.25	726.6	783.6	57.0	1094.3	11.66
0.063	767.5	825.1	57.6	1151.9	7.01
Pan	724.5	728.7	86.8	1238.7	0.00
Totale			1238.7		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-2-1	1362.7	813.4	1363.9	24.5	2.469
UM.8M_5.06-2-2	1365.1	814.8	1366.4	24.5	2.468
UM.8M_5.06-2-3	1365.9	815.8	1367.6	24.5	2.469

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8M_5.06-2-1	0.96	2.62	12.50	0.97	2.55	12.52
UM.8M_5.06-2-2	0.98	2.49	12.54			
UM.8M_5.06-2-3	0.96	2.48	12.24			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_5.06-2-1	2.492	5.6	2.469	1.025	0.9	0.8	1.198
UM.8M_5.06-2-2	2.492	5.6	2.468	1.025	1.0	0.8	1.198
UM.8M_5.06-2-3	2.492	5.6	2.469	1.025	0.9	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_5.06-2-1	16.0	94.6	16.0	94.4
UM.8M_5.06-2-2	16.1	94.0		
UM.8M_5.06-2-3	16.0	94.6		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_5.06-2-1	3618.3	3471.7	Valido	3545	4123
UM.8M_5.06-2-2	4546.8	4421.6	Valido	4484	
UM.8M_5.06-2-3	4246.5	4433.2	Valido	4340	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_5.06-2-1	16.187	1.390	1.461	165.1
UM.8M_5.06-2-2	18.282	1.408	1.635	182.4
UM.8M_5.06-2-3	17.852	1.180	1.595	212.3

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8M_5.06-2-1	1.564	Valido	186.6	Valido
UM.8M_5.06-2-2				
UM.8M_5.06-2-3				

UM.8R_4.19-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% Redpol, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 199.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

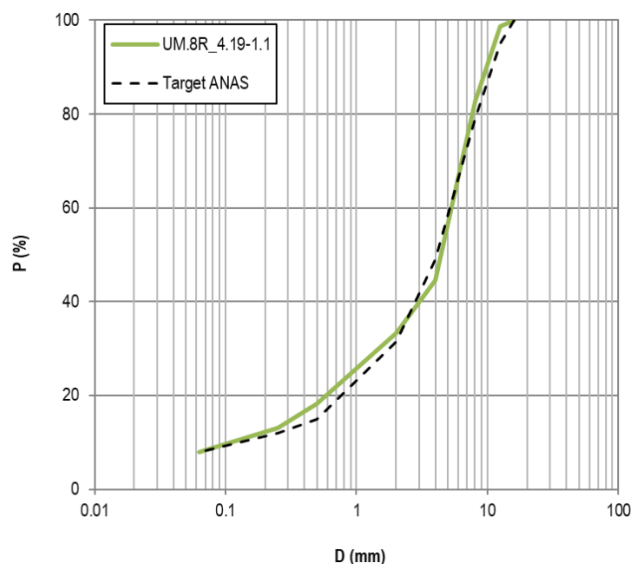
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8R_4.19-1.1	2.521	2.521
UM.8R_4.19-1.2	2.521	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8R_4.19-1	5.66	6.00

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.3	1199	15.7	15.7	98.75
8	1070.1	1272.1	202.0	217.7	82.62
4	1107.7	1584.5	476.8	694.5	44.56
2	979.9	1120.9	141.0	835.5	33.31
0.5	783.8	972.7	188.9	1024.4	18.23
0.25	726.7	791.2	64.5	1088.9	13.08
0.063	767.9	832.3	64.4	1153.3	7.94
Pan	724.4	727.9	99.5	1252.8	0.00
Totale			1252.8		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8R_4.19-1-1	1381.3	827.2	1386.0	26.5	2.464
UM.8R_4.19-1-2	1387.6	831.6	1391.3	26.5	2.471
UM.8R_4.19-1-3	1384.2	826.4	1391.5	26.5	2.441

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8R_4.19-1-1	2.28	3.47	12.51	2.48	3.66	12.56
UM.8R_4.19-1-2	1.99	3.06	11.98			
UM.8R_4.19-1-3	3.16	4.46	13.18			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8R_4.19-1-1	2.521	4.8	2.464	1.025	2.3	0.8	1.198
UM.8R_4.19-1-2	2.521	4.8	2.471	1.025	2.0	0.8	1.198
UM.8R_4.19-1-3	2.521	4.8	2.441	1.025	3.2	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8R_4.19-1-1	15.5	85.1	15.7	84.1
UM.8R_4.19-1-2	15.2	87.0		
UM.8R_4.19-1-3	16.3	80.1		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8R_4.19-1-1	4031.7	3652.2	Valido	3842	3738
UM.8R_4.19-1-2	3018.0	3020.9	Valido	3019	
UM.8R_4.19-1-3	4311.4	4390.8	Valido	4351	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8R_4.19-1-1	19.147	1.037	1.677	254.0
UM.8R_4.19-1-2	16.891	1.211	1.481	192.2
UM.8R_4.19-1-3	18.324	1.077	1.579	230.2

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8R_4.19-1-1	1.579	Valido	225.5	Valido
UM.8R_4.19-1-2				
UM.8R_4.19-1-3				

UM.8R_4.61-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% Redpol, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1042.8 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1516.8 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1232.4 g
 - ❖ Filler (5%): 237.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 711.0 g
- } Massa totale degli aggregati: 4740.1 g
- ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 218.5 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g

- **MMVT**

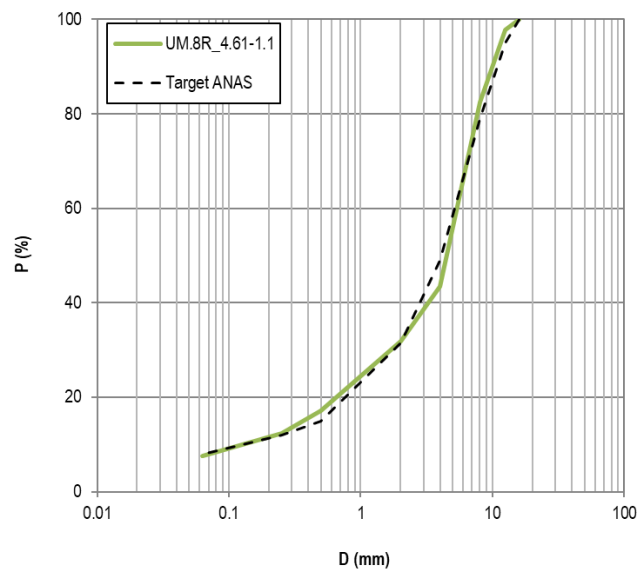
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8R_4.61-1.1	2.498	2.499
UM.8R_4.61-1.2	2.500	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8R_4.61-1	5.75	6.10

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.8	1301.8	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1211.1	27.9	27.9	97.83
8	1070	1266.6	196.6	224.5	82.55
4	1107.7	1611.8	504.1	728.6	43.37
2	979.8	1129.1	149.3	877.9	31.77
0.5	783.7	971.9	188.2	1066.1	17.14
0.25	726.4	787.9	61.5	1127.6	12.36
0.063	767.3	828.4	61.1	1188.7	7.62
Pan	895	901.7	98.0	1286.7	0.00
Totale			1286.7		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8R_4.61-1-1	1374.9	820.0	1379.2	26.5	2.451
UM.8R_4.61-1-2	1373.8	821.1	1376.7	24.5	2.465
UM.8R_4.61-1-3	1373.7	817.3	1380.1	26.5	2.433

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8R_4.61-1-1	1.93	3.26	12.80	1.98	3.40	12.90
UM.8R_4.61-1-2	1.37	2.86	12.59			
UM.8R_4.61-1-3	2.64	4.08	13.30			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8R_4.61-1-1	2.499	5.2	2.451	1.025	1.9	0.8	1.198
UM.8R_4.61-1-2	2.499	5.2	2.465	1.025	1.4	0.8	1.198
UM.8R_4.61-1-3	2.499	5.2	2.433	1.025	2.6	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8R_4.61-1-1	16.0	87.9	16.1	87.6
UM.8R_4.61-1-2	15.6	90.7		
UM.8R_4.61-1-3	16.6	84.1		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8R_4.61-1-1			Non Valido		4224
UM.8R_4.61-1-2	4423.9	4001.4	Valido	4213	
UM.8R_4.61-1-3	4071	4401.6	Valido	4236	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8R_4.61-1-1	17.146	1.109	1.494	211.6
UM.8R_4.61-1-2	17.244	1.131	1.524	211.6
UM.8R_4.61-1-3	15.840	1.284	1.375	168.3

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8R_4.61-1-1	1.464	Valido	197.2	Valido
UM.8R_4.61-1-2				
UM.8R_4.61-1-3				

UM.8R_5.06-1

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% Redpol, 5.06% bitume di aggiunta, lotto 1.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1038.3 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1510.3 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1227.1 g
 - ❖ Filler (5%): 236.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 708.8 g
 - ❖ Bitume 70/100 (5.06% su aggregati): 238.8 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4719.8 g

- **MMVT**

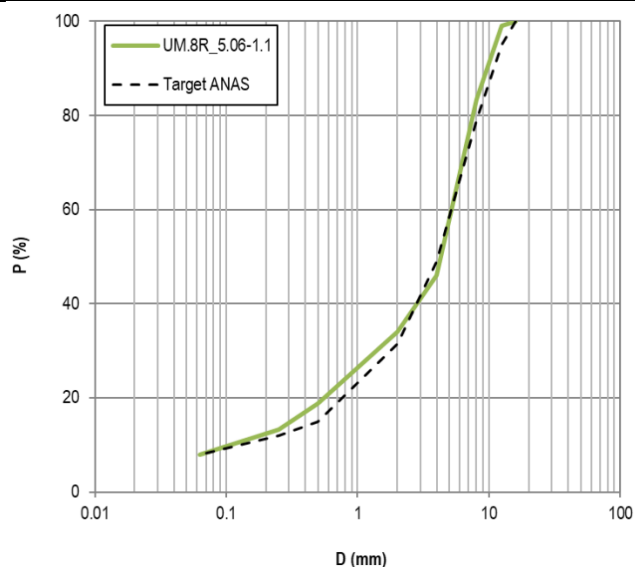
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8R_5.06-1.1	2.494	2.490
UM.8R_5.06-1.2	2.485	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8R_5.06-1	6.25	6.67

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.8	1301.8	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1195.7	12.5	12.5	99.02
8	1070	1268.6	198.6	211.1	83.39
4	1107.7	1582.6	474.9	686.0	46.03
2	979.8	1132.4	152.6	838.6	34.03
0.5	783.6	978.1	194.5	1033.1	18.72
0.25	726.3	795.1	68.8	1101.9	13.31
0.063	767.2	835.7	68.5	1170.4	7.92
Pan	895.1	902.6	100.7	1271.1	0.00
Totale			1271.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8R_5.06-1-1	1367.8	816.0	1369.3	26.5	2.464
UM.8R_5.06-1-2	1368.2	815.4	1370.0	26.5	2.459
UM.8R_5.06-1-3	1369.2	813.9	1373.8	26.5	2.437

Test ID	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀	V ₂₁₀	V ₁₂₀	V ₁₀
UM.8R_5.06-1-1	1.03	1.85	10.99	1.45	2.49	11.53
UM.8R_5.06-1-2	1.23	2.19	11.33			
UM.8R_5.06-1-3	2.09	3.43	12.27			

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8R_5.06-1-1	2.490	5.6	2.464	1.025	1.0	0.8	1.198
UM.8R_5.06-1-2	2.490	5.6	2.459	1.025	1.2	0.8	1.198
UM.8R_5.06-1-3	2.490	5.6	2.437	1.025	2.1	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8R_5.06-1-1	16.1	93.8	16.5	91.4
UM.8R_5.06-1-2	16.3	92.5		
UM.8R_5.06-1-3	17.0	87.9		

○ **Modulo di Rigidezza (25°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8R_5.06-1-1	4029.5	4375.3	Valido	4202	4013
UM.8R_5.06-1-2	4065.5	4291.9	Valido	4179	
UM.8R_5.06-1-3	3806.7	3509.0	Valido	3658	

○ **ITS (25°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8R_5.06-1-1	16.306	1.242	1.450	183.4
UM.8R_5.06-1-2	16.431	1.219	1.466	188.9
UM.8R_5.06-1-3	15.544	1.372	1.364	156.2

Test ID	ITS [MPa]	Check	CTI [MPa]	Check
UM.8R_5.06-1-1	1.427	Valido	176.2	Valido
UM.8R_5.06-1-2				
UM.8R_5.06-1-3				

UM.0M_4.61-1D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0% WP, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.7 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 220.3 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.3 g

- **MMVT**

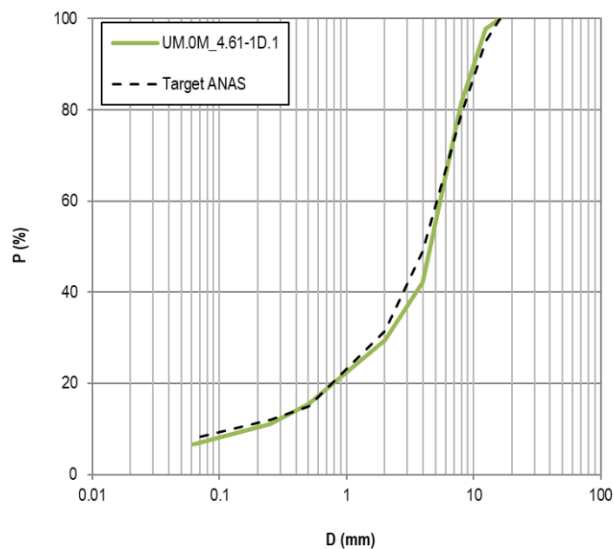
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.0_4.61-1D.1	2.527	2.530
UM.0_4.61-1D.2	2.534	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.0_4.61-1D	5.12	5.39

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.3	1209.4	26.1	26.1	97.76
8	1070.1	1258.6	188.5	214.6	81.55
4	1107.1	1565	457.9	672.5	42.18
2	974.5	1121.4	146.9	819.4	29.55
0.5	783.9	947.5	163.6	983.0	15.48
0.25	726.4	777.3	50.9	1033.9	11.11
0.063	772.7	825.4	52.7	1086.6	6.58
Pan	895.1	897.3	76.5	1163.1	0.00
Totale			1163.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.0M_4.61-ID-1	1390.0	823.7	1396.0	23.7	2.423
UM.0M_4.61-ID-2	1390.6	820.4	1401.1	23.7	2.389
UM.0M_4.61-ID-3	1389.8	821.2	1397.4	23.7	2.406

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.0M_4.61-ID-1	4.22	10.97	5.06	11.60
UM.0M_4.61-ID-2	5.61	11.91		
UM.0M_4.61-ID-3	5.35	11.91		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.0M_4.61-ID-1	2.530	5.2	2.423	1.025	4.2	0	1.198
UM.0M_4.61-ID-2	2.530	5.2	2.389	1.025	5.6	0	1.198
UM.0M_4.61-ID-3	2.530	5.2	2.406	1.025	4.9	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.0M_4.61-ID-1	16.5	74.5	17.1	71.5
UM.0M_4.61-ID-2	17.7	68.5		
UM.0M_4.61-ID-3	17.1	71.4		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.0M_4.61-ID-1					
UM.0M_4.61-ID-2					
UM.0M_4.61-ID-3					

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.0M_4.61-ID-1	27.328	1.782	2.346	206.8
UM.0M_4.61-ID-2	26.420	1.829	2.234	191.9
UM.0M_4.61-ID-3	26.151	2.044	2.220	170.6

UM.0M_4.61-2D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0% WP, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 2, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1051.2 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1529.1 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1242.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.9 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 716.7 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 220.3 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0% su peso miscela totale): 0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4778.3 g

- **MMVT**

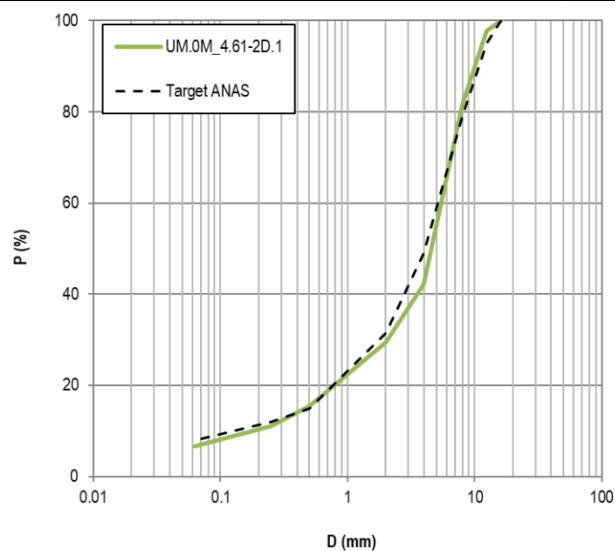
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.0_4.61-2D.1	2.527	2.530
UM.0_4.61-2D.2	2.534	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.0_4.61-2D	5.12	5.39

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1301.9	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.3	1209.4	26.1	26.1	97.76
8	1070.1	1258.6	188.5	214.6	81.55
4	1107.1	1565	457.9	672.5	42.18
2	974.5	1121.4	146.9	819.4	29.55
0.5	783.9	947.5	163.6	983.0	15.48
0.25	726.4	777.3	50.9	1033.9	11.11
0.063	772.7	825.4	52.7	1086.6	6.58
Pan	895.1	897.3	76.5	1163.1	0.00
Totale			1163.1		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.0M_4.6I-2D-1	1389.4	822.0	1396.3	23.7	2.413
UM.0M_4.6I-2D-2	1389.6	816.1	1400.1	23.7	2.373
UM.0M_4.6I-2D-3	1390.0	819.8	1400.5	23.7	2.388

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.0M_4.6I-2D-1	4.64	11.19	5.35	11.88
UM.0M_4.6I-2D-2	6.21	12.33		
UM.0M_4.6I-2D-3	5.35	11.91		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.0M_4.6I-2D-1	2.530	5.2	2.413	1.025	4.6	0	1.198
UM.0M_4.6I-2D-2	2.530	5.2	2.373	1.025	6.2	0	1.198
UM.0M_4.6I-2D-3	2.530	5.2	2.388	1.025	5.6	0	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.0M_4.6I-2D-1	16.8	72.9	17.6	69.1
UM.0M_4.6I-2D-2	18.2	66.1		
UM.0M_4.6I-2D-3	17.7	68.4		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.0M_4.6I-2D-1	7831.0	6870.1	Valido	7351	7383
UM.0M_4.6I-2D-2	8045.9	6785.3	Valido	7416	
UM.0M_4.6I-2D-3			Non Valido		

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.0M_4.6I-2D-1	28.697	1.519	2.448	253.1
UM.0M_4.6I-2D-2	27.642	1.670	2.323	218.5
UM.0M_4.6I-2D-3				

UM.4M_4.61-1D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 1, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

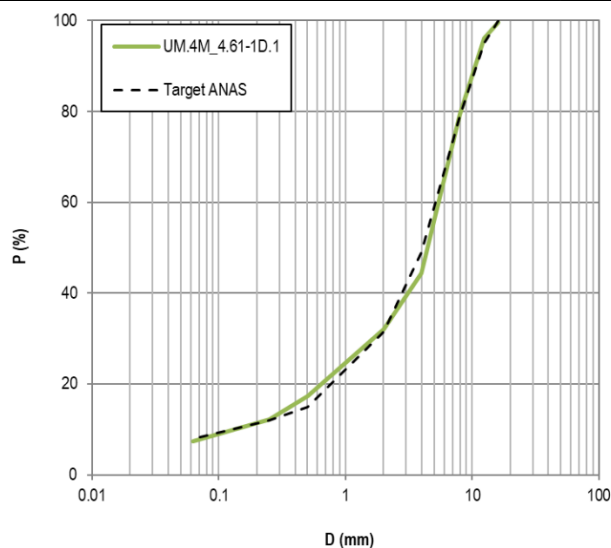
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-1D.1	2.530	2.527
UM.4M_4.61-1D.2	2.525	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.61-1D	5.25	5.54

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1307.8	5.9	5.9	99.54
12.5	1183.2	1226.6	43.4	49.3	96.18
8	1070	1288.2	218.2	267.5	79.27
4	1107.8	1557	449.2	716.7	44.47
2	974.6	1134.6	160.0	876.7	32.07
0.5	783.8	974.8	191.0	1067.7	17.27
0.25	726.4	791.6	65.2	1132.9	12.22
0.063	767.5	829.5	62.0	1194.9	7.42
Pan	894.9	899.4	95.7	1290.6	0.00
Totale			1290.6		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-ID-1	1389.6	820.2	1400.6	24.0	2.388
UM.4M_4.61-ID-2	1389.4	820.1	1398.4	24.0	2.396
UM.4M_4.61-ID-3	1388.2	813.5	1399.9	24.0	2.361

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.4M_4.61-ID-1	5.51	12.12	5.91	12.36
UM.4M_4.61-ID-2	5.18	11.78		
UM.4M_4.61-ID-3	7.04	13.18		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-ID-1	2.527	5.2	2.388	1.025	5.5	0.4	1.198
UM.4M_4.61-ID-2	2.527	5.2	2.396	1.025	5.2	0.4	1.198
UM.4M_4.61-ID-3	2.527	5.2	2.361	1.025	6.6	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.61-ID-1	18.4	70.2	18.7	69.1
UM.4M_4.61-ID-2	18.2	71.2		
UM.4M_4.61-ID-3	19.4	65.8		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.61-ID-1					8404
UM.4M_4.61-ID-2					
UM.4M_4.61-ID-3	8214.2	8593.5	Valido	8404	

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.61-ID-1	27.608	1.769	2.307	204.9
UM.4M_4.61-ID-2	30.583	1.690	2.577	239.6
UM.4M_4.61-ID-3	29.278	1.439	2.422	264.4

UM.4M_4.61-2D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.4% MEG, 4.61% bitume di aggiunta, lotto 2, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.61% su aggregati): 219.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.4% su peso miscela totale): 20.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

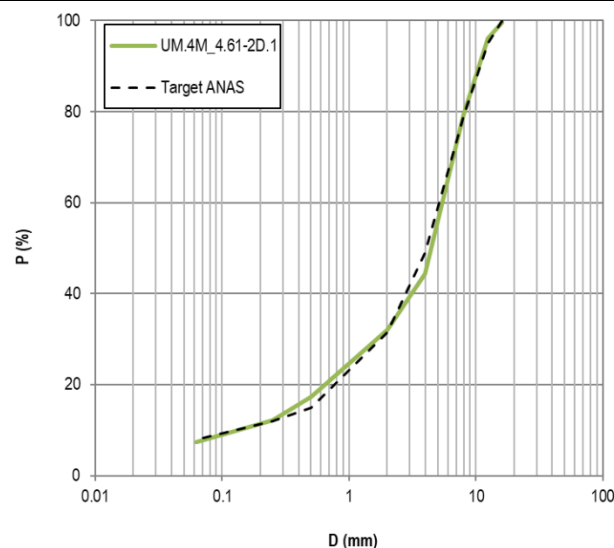
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.4M_4.61-2D.1	2.530	2.527
UM.4M_4.61-2D.2	2.525	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.4M_4.61-2D	5.25	5.54

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1301.9	1307.8	5.9	5.9	99.54
12.5	1183.2	1226.6	43.4	49.3	96.18
8	1070	1288.2	218.2	267.5	79.27
4	1107.8	1557	449.2	716.7	44.47
2	974.6	1134.6	160.0	876.7	32.07
0.5	783.8	974.8	191.0	1067.7	17.27
0.25	726.4	791.6	65.2	1132.9	12.22
0.063	767.5	829.5	62.0	1194.9	7.42
Pan	894.9	899.4	95.7	1290.6	0.00
Totale			1290.6		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H2O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m³]
UM.4M_4.6I-2D-1	1389.8	821.1	1399.8	24.0	2.395
UM.4M_4.6I-2D-2	1388.6	820.0	1397.0	24.0	2.400
UM.4M_4.6I-2D-3	1387.8	820.9	1397.0	24.0	2.403

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.4M_4.6I-2D-1	5.22	11.86	5.17	11.76
UM.4M_4.6I-2D-2	5.02	11.65		
UM.4M_4.6I-2D-3	5.28	11.76		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m³]	ρ _B [Mg/m³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m³]
UM.4M_4.6I-2D-1	2.527	5.2	2.395	1.025	5.2	0.4	1.198
UM.4M_4.6I-2D-2	2.527	5.2	2.400	1.025	5.0	0.4	1.198
UM.4M_4.6I-2D-3	2.527	5.2	2.403	1.025	4.9	0.4	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.4M_4.6I-2D-1	18.1	71.5	18.0	72.1
UM.4M_4.6I-2D-2	18.0	72.1		
UM.4M_4.6I-2D-3	17.9	72.6		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.4M_4.6I-2D-1	7945.1	8320.2	Valido	8133	8012
UM.4M_4.6I-2D-2	8475.4	7306.7	Valido	7891	
UM.4M_4.6I-2D-3					

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.4M_4.6I-2D-1	27.862	1.727	2.340	212.8
UM.4M_4.6I-2D-2	29.798	1.168	2.523	339.3
UM.4M_4.6I-2D-3	33.558	1.361	2.849	328.9

UM.8M_4.19-1D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 199.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

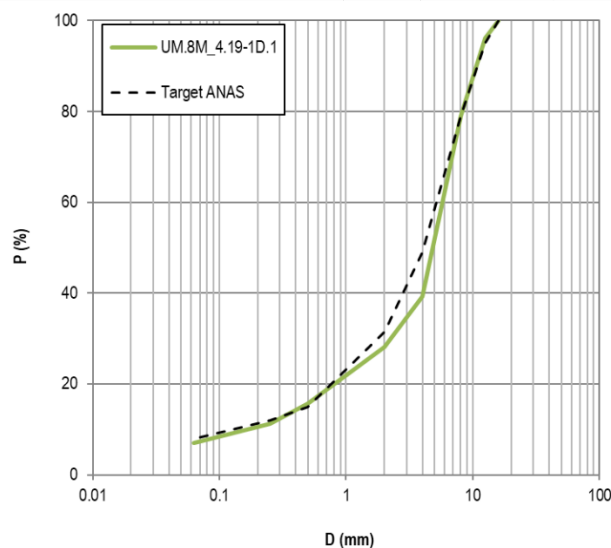
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-1D.1	2.511	2.514
UM.8M_4.19-1D.2	2.516	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.19-1D	5.43	5.74

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1228.6	45.4	45.4	96.10
8	1070.2	1270.1	199.9	245.3	78.92
4	1107.7	1568.8	461.1	706.4	39.31
2	974.7	1104.2	129.5	835.9	28.18
0.5	783.7	930.2	146.5	982.4	15.59
0.25	726.5	777	50.5	1032.9	11.26
0.063	772.8	821.6	48.8	1081.7	7.06
Pan	895.2	896	82.2	1163.9	0.00
Totale			1163.9		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-ID-1	1383.0	811.8	1401.5	24.2	2.339
UM.8M_4.19-ID-2	1381.9	815.9	1393.2	24.2	2.387
UM.8M_4.19-ID-3	1381.4	815.1	1398.0	24.2	2.364

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.8M_4.19-ID-1	6.95	13.17	5.98	12.41
UM.8M_4.19-ID-2	5.03	11.39		
UM.8M_4.19-ID-3	5.97	12.68		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-ID-1	2.514	4.8	2.339	1.025	7.0	0.8	1.198
UM.8M_4.19-ID-2	2.514	4.8	2.387	1.025	5.1	0.8	1.198
UM.8M_4.19-ID-3	2.514	4.8	2.364	1.025	6.0	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.19-ID-1	19.5	64.2	18.7	67.9
UM.8M_4.19-ID-2	17.9	71.4		
UM.8M_4.19-ID-3	18.6	68.0		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.19-ID-1					
UM.8M_4.19-ID-2					
UM.8M_4.19-ID-3					

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.19-ID-1	29.154	1.592	2.406	237.4
UM.8M_4.19-ID-2	31.081	1.487	2.620	276.8
UM.8M_4.19-ID-3	31.103	1.298	2.596	314.2

UM.8M_4.19-1D

- **Descrizione:** Usura, miscelazione manuale, 0.8% MEG, 4.19% bitume di aggiunta, lotto 1, miscela ottimale di progetto.

- **Quantità**

- ❖ Pietrischetto 5/15 (22%): 1047.0 g
 - ❖ Graniglia 3/8 (32%): 1522.9 g
 - ❖ Sabbia 0/5 (26%): 1237.4 g
 - ❖ Filler (5%): 238.0 g
 - ❖ RAP 0/6 (15%): 713.9 g
 - ❖ Bitume 70/100 (4.19% su aggregati): 199.4 g
 - ❖ Rejuvenator (0.2% su RAP): 1.4 g
 - ❖ Plastica (0.8% su peso miscela totale): 40.0 g
- Massa totale miscela: 5000 g
- } Massa totale degli aggregati: 4759.2 g

- **MMVT**

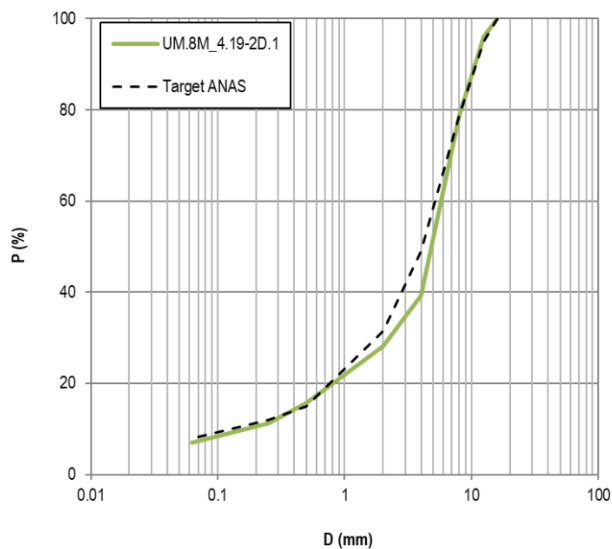
Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT media [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2D.1	2.511	2.514
UM.8M_4.19-2D.2	2.516	

- **Contenuto di bitume tramite ignizione**

Mix ID	% Bitume miscela	% Bitume aggregato
UM.8M_4.19-2D	5.43	5.74

- **Granulometria**

Setaccio	Tara	Lordo	Trattenuto	Trattenuto Progressivo	Passante progressivo
(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)
16	1302	1302	0.0	0.0	100.00
12.5	1183.2	1228.6	45.4	45.4	96.10
8	1070.2	1270.1	199.9	245.3	78.92
4	1107.7	1568.8	461.1	706.4	39.31
2	974.7	1104.2	129.5	835.9	28.18
0.5	783.7	930.2	146.5	982.4	15.59
0.25	726.5	777	50.5	1032.9	11.26
0.063	772.8	821.6	48.8	1081.7	7.06
Pan	895.2	896	82.2	1163.9	0.00
Totale			1163.9		



○ **Bulk Density e Percentuale di vuoti**

Test ID	M _{air} [g]	M _{H₂O} [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2D-1	1380.3	806.7	1396.1	24.2	2.336
UM.8M_4.19-2D-2	1381.9	806.1	1403.1	24.2	2.309
UM.8M_4.19-2D-3	1385.2	812.5	1403.4	24.2	2.338

Test ID	V ₅₀	V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀
UM.8M_4.19-2D-1	7.08	13.50	7.41	13.76
UM.8M_4.19-2D-2	8.16	14.34		
UM.8M_4.19-2D-3	6.99	13.43		

○ **VMA e VFB**

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	B.M	ρ _{SSD} [Mg/m ³]	ρ _B [Mg/m ³]	V _a [%]	P _{ad} [%]	ρ _{ad} [Mg/m ³]
UM.8M_4.19-2D-1	2.514	4.8	2.336	1.025	7.1	0.8	1.198
UM.8M_4.19-2D-2	2.514	4.8	2.309	1.025	8.2	0.8	1.198
UM.8M_4.19-2D-3	2.514	4.8	2.338	1.025	7.0	0.8	1.198

Test ID	VMA	VFB	VMA	VFB
UM.8M_4.19-2D-1	19.6	63.8	19.9	62.7
UM.8M_4.19-2D-2	20.6	60.0		
UM.8M_4.19-2D-3	19.5	64.2		

○ **Modulo di Rigidezza (10°C)**

Test ID	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	Check	E _m [MPa]	E _m [MPa]
UM.8M_4.19-2D-1	10497.6	9294.5	Valido	9896	9728
UM.8M_4.19-2D-2	10484.3	9123.9	Valido	9804	
UM.8M_4.19-2D-3	9868.2	9097.7	Valido	9483	

○ **ITS (10°C)**

Test ID	Max P [kN]	Vertical displacement [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
UM.8M_4.19-2D-1	30.143	1.466	2.649	283.8
UM.8M_4.19-2D-2	27.681	1.093	2.447	351.6
UM.8M_4.19-2D-3	25.864	1.585	2.273	225.3