

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e modellazione del fenomeno dell'accumulo di
deformazioni permanenti in miscele bituminose per
strati di usura



Relatore

Prof. Ing. Ezio Santagata

Correlatori

Ing. Davide Dalmazzo
Ing. Pier Paolo Riviera

Candidato

María Sol Martínez Rossa

LUGLIO 2018

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento al Prof. Ing. Pier Paolo Riviera, al Prof. Ing. Davide Dalmazzo, al Prof. Ing. Ezio Santagata e al Prof. Ing. Fabrizio Miglietta per il valido, competente e professionale aiuto, ma soprattutto per l'indispensabile pazienza con la cui sempre mi hanno spiegato e raccomandato durante il lavoro di tesi.

Mami y papi este logro es especialmente para ustedes, por todo el apoyo y la contención que me dan siempre y por todo el esfuerzo que hacen para que yo pueda estar acá. GRACIAS!!!

Este logro también se lo dedico a mis hermanas, porque a la distancia siguen siendo mi sostén y mi aliento. Nona Ana y Nona Olga nunca las olvido, esto también es para ustedes, las extraño...

Para mis amigas de Villa Maria que las extraño muchísimo...

Para todos mis amigos de Córdoba que nunca los olvido...

Para mis amigos de Torino, en realidad para mi familia de Torino porque eso es lo que formamos, una gran familia...

Para Agus, por sacarme siempre una sonrisa y por hacer que los días sean más divertidos...

Finalmente, para mi sobrina Helena que gracias a su llegada me dio más fuerzas para poder cumplirlo...

INDICE

CAPITOLO 1	1
1 INTRODUZIONE	1
1.1 CARATTERISTICHE GENERALI DELLO STRATO DI USURA DI UNA PAVIMENTAZIONE STRADALE FLESSIBILE E SEMI-RIGIDA	1
1.2 OBIETTIVI E SCOPI DEL LAVORO	4
1.3 SCHEMA DELLA TESI	5
CAPITOLO 2	6
2 TUNNEL DEL FRÉJUS	6
2.1 RASSEGNA DEL TUNNEL DEL FRÉJUS	7
2.2 SECONDA CANNA	8
2.3 GALLERIA DI SICUREZZA DEL FRÉJUS	10
CAPITOLO 3	12
3 MATERIALI, INDAGINE SPERIMENTALE E METODOLOGIA DI PROVA	12
3.1 MATERIALI IMPIEGATI	12
3.1.1 <i>Bitume</i>	13
3.1.2 <i>Aggregati</i>	16
3.1.3 <i>Additivi</i>	17
3.2 PROGRAMMA DI RICERCA	18
3.3 STRUMENTAZIONE E ATTREZZATURE DI LABORATORIO	19
3.3.1 <i>Attrezzatura per analisi granulometrica di aggregati</i>	19
3.3.2 <i>Picnometro</i>	20
3.3.3 <i>Carbolite</i>	21
3.3.4 <i>Compattatore Marshall</i>	22
3.3.5 <i>Bagno termostatico per provini Marshall</i>	23
3.3.6 <i>French Rutting Tester</i>	23
3.3.7 <i>Macchina Carotatrice</i>	25
3.3.8 <i>Pressa Giratoria</i>	25
3.3.9 <i>Compattatore a lastre</i>	28
3.3.10 <i>Pressa statica</i>	28
3.3.11 <i>Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)</i>	30
3.4 LE PROVE DI LABORATORIO	31
3.4.1 <i>Determinazione della massa volumica massima (TMD)</i>	31
3.4.2 <i>Prova Carbolite</i>	33
3.4.3 <i>Distribuzione delle dimensioni degli aggregati</i>	35

3.4.4	<i>Prova Marshall</i>	37
3.4.4.1	<i>Confezionamento dei provini</i>	37
3.4.4.2	<i>Stabilità e Rigidezza Marshall</i>	38
3.4.4.3	<i>Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui</i>	39
3.4.5	<i>Pressa giratoria</i>	41
3.4.5.1	<i>Confezionamento dei campioni</i>	42
3.4.5.2	<i>Lavorabilità e addensamento della miscela</i>	44
3.4.5.3	<i>Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui</i>	46
3.4.6	<i>Compattatore a lastre</i>	47
3.4.6.1	<i>Procedura di compattazione delle lastre</i>	47
3.4.6.2	<i>Determinazione del contenuto dei vuoti geometrici</i>	50
3.4.7	<i>Wheel Tracking Test</i>	51
3.4.8	<i>Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)</i>	55
3.4.8.1	<i>Modulo Dinamico</i>	55
3.4.8.2	<i>Flow Number</i>	64
CAPITOLO 4		74
4	ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	74
4.1	ANALISI COMPOSITIVA DELLA MISCELA	74
4.1.1	<i>Massa volumica massima (T.M.D)</i>	74
4.1.2	<i>Verifica del contenuto di bitume</i>	75
4.1.3	<i>Analisi granulometrica degli aggregati</i>	76
4.2	CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE	77
4.2.1	<i>Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con compactatore Marshall</i>	77
4.2.2	<i>Caratteristiche volumetriche dei campioni confezionati con pressa giratoria</i>	78
4.2.3	<i>Caratteristiche volumetriche delle lastre confezionati con compactatore a lastre</i>	80
4.2.3.1	<i>Caratteristiche volumetriche dei travetti tagliati</i>	81
4.2.4	<i>Caratteristiche volumetriche delle cuore dei campioni carotati</i>	81
4.3	CARATTERISTICHE MECCANICHE	83
4.3.1	<i>Stabilità e Rigidezza Marshall</i>	83
4.3.2	<i>Ormaiamento</i>	84
4.3.3	<i>Modulo Dinamico</i>	87
4.3.3.1	<i>Curve Maestre</i>	89
4.3.4	<i>Flow Number</i>	93
4.3.4.1	<i>Modellazione del comportamento di deformazione permanente trifase delle Miscele di Conglomerato Bituminoso</i>	96
4.3.4.2	<i>Analisi del rapporto FN-Ormaiamento</i>	108
CAPITOLO 5		110
5	CONCLUSIONI	110

6	ALLEGATI.....	112
	ALLEGATI DAL CAPITOLO 4.....	112
	<i>Massa volumica massima (TMD)</i>	<i>112</i>
	<i>Analisi granulometrica</i>	<i>112</i>
	<i>Caratteristiche volumetriche dei campioni confezionati con pressa giratoria</i>	<i>114</i>
	<i>Caratteristiche volumetriche dei travetti tagliati.....</i>	<i>116</i>
	<i>Caratteristiche volumetriche delle cuore dei campioni carotati.....</i>	<i>116</i>
	<i>Stabilità e Rigidezza Marshall.....</i>	<i>117</i>
	<i>Modulo Dinamico</i>	<i>118</i>
	<i>Flow Number</i>	<i>126</i>
	<i>Modellazione del comportamento di deformazione permanente trifase delle miscele di conglomerato bituminoso.....</i>	<i>128</i>
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	132

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 2-1: LOCALIZZAZIONE DEL TRAFORO AUTOSTRADALE DEL FRÉJUS.....	7
FIGURA 2-2: SEZIONI DEL TUNNEL	8
FIGURA 2-3: SECONDA CANNA.....	9
FIGURA 2-4: FASE DI SCAVO CON LA TBM DEL SECONDO TUNNEL.....	10
FIGURA 3-1: MATERIALE IMPIEGATO PER LE PROVE DI LABORATORIO.....	12
FIGURA 3-2: VISCOSITÀ VS TEMPERATURA	16
FIGURA 3-3: COMPOUND DI POLIMERI CONFEZIONATO IN GRANULI SEMI-MORBIDI E FLESSIBILI.....	18
FIGURA 3-4: DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	19
FIGURA 3-5: COLONNA DI SETACCI UTILIZZATA	20
FIGURA 3-6: PICNOMETRI.....	20
FIGURA 3-7: CARBOLITE	21
FIGURA 3-8: CESTELLO DOPPIO CHE SI UTILIZZA NELLA CARBOLITE.....	22
FIGURA 3-9: MACCHINA DI COMPATTAZIONE AUTOMATICA PER PROVINI MARSHALL.....	22
FIGURA 3-10: STAMPO MARSHALL COMPLETO DI BASE E COLLARE.....	23
FIGURA 3-11: BAGNO TERMOSTATICO PER PROVINI MARSHALL	23
FIGURA 3-12: FRENCH RUTTING TESTER-VISTA ESTERNA DELLA MACCHINA	24
FIGURA 3-13: FRENCH RUTTING TESTER CON LASTRA TESTATA.....	24
FIGURA 3-14: MACCHINA CAROTATRICE.....	25
FIGURA 3-15: SFORZI CUI È SOTTOPOSTO IL CAMPIONE COMPATTATO CON PRESSA GIRATORIA.....	26
FIGURA 3-16: COMPATTAZIONE TRAMITE PRESSA GIRATORIA.....	26
FIGURA 3-17: FUSTELLA CILINDRICA METALLICA UTILIZZATA PER LA COMPATTAZIONE CON LA PRESSA GIRATORIA.....	27
FIGURA 3-18: PRESSA A TAGLIO GIRATORIO	27
FIGURA 3-19: ESTRAZIONE DEL CAMPIONE DELLA FUSTELLA.....	27
FIGURA 3-20: COMPATTATORE CON USO DI PNEUMATICO	28
FIGURA 3-21: FORMA DEL CASSERO UTILIZZATO PER LE LASTRE	28
FIGURA 3-22: PRESSA ATTREZZATA PER PROVA MARSHALL.....	29
FIGURA 3-23: TESTA DI ROTTURA PER PROVINI	30
FIGURA 3-24: ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE TESTER.....	31
FIGURA 3-25: MATERIALE BITUMINOSO DISTRIBUITO MANUALMENTE IN GRANI	32
FIGURA 3-26: PICNOMETRO RIEMPITO CON MISCELA ED ACQUA DISTILLATE E COLLEGATO ALLA POMPA.....	32
FIGURA 3-27: RISULTATO DEL MATERIALE DOPO IL PROCESSO DI COMBUSTIONE	34
FIGURA 3-28: LAVAGGIO DEGLI AGGREGATI POST CARBOLITE IMPIEGANDO SETTACCI 2 E 0.063 MM.....	35
FIGURA 3-29: PILA DI SETACCI IN UN AGITATORE MECCANICO	36
FIGURA 3-30: COMPATTATORE MARSHALL.....	37
FIGURA 3-31: PROVINO MARSHALL.....	38
FIGURA 3-32: PROVINI TESTATI CON PRESSA STATICA	39

FIGURA 3-33: PROVINI IMMERSI IN ACQUA	40
FIGURA 3-34: SCHEMATIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELLA PRESSA GIRATORIA.....	41
FIGURA 3-35: SCHERMATA DEL PROGRAMMA DI CONTROLLO PER LA COMPATTAZIONE CON PRESSA GIRATORIA	42
FIGURA 3-36: ESTRUSORE CHE PERMETTE SFILARE IL CAMPIONE DALLA FUSTELLA.....	43
FIGURA 3-37: CAMPIONI CONFEZIONATI CON PRESSA GIRATORIA E CONTRASSEGNA TI.....	43
FIGURA 3-38: CURVA DI COMPATTAZIONE PER CAMPIONI SOTTOPOSTI A COMPATTAZIONE GIRATORIA	45
FIGURA 3-39: CAMPIONE A BAGNO NELL'ACQUA.....	46
FIGURA 3-40: BILANCIA CON LA QUALE VIENE EFFETTUATA LA PESATA IDROSTATICA DEL CAMPIONE.....	47
FIGURA 3-41: PANNELLO DI CONTROLLO DI COMPATTATORE A LASTRE.....	49
FIGURA 3-42: LASTRA COMPATTATA.....	50
FIGURA 3-43: CALIBRO E CENTIMETRO PER MISURARE LE DIMENSIONI DELLA LASTRA	50
FIGURA 3-44: INDICAZIONI PER FARE IL FORO SULLA LASTRA	52
FIGURA 3-45: POSIZIONI DEI PUNTI DI MISURAZIONE	53
FIGURA 3-46: PANNELLO DI CONTROLLO DELLA MACCHINA	53
FIGURA 3-47: PROCEDURA PER MISURARE I SOLCHI NEI 15 PUNTI PREDEFINITI	54
FIGURA 3-48: LASTRA TESTATA DOPO IL WHEEL TRACKING TEST	54
FIGURA 3-49: CAROTAGGIO DI CAMPIONE	56
FIGURA 3-50: DADI IN ALLUMINIO E COLLA UTILIZZATA.....	56
FIGURA 3-51: DIMA PER MONTAGGIO SPINE DI RIFERIMENTO TRASDUTTORI LVDT	57
FIGURA 3-52: CAMPIONI PRE-CONDIZIONATI IN CAMERA CLIMATICA	57
FIGURA 3-53: CAMPIONE PRONTO PER ESSERE TESTATO	58
FIGURA 3-54: LAYOUT GENERALE DEL TEST DI MODULO DINAMICO A 20°C	59
FIGURA 3-55: RIASSUNTO DEI DATI DEL TEST FORNITI DAL SOFTWARE	59
FIGURA 3-56: FORMA E PARAMETRI DELLA FUNZIONE SIGMOIDALE	61
FIGURA 3-57: CARICAMENTO NEL TEST DI FLOW NUMBER	65
FIGURA 3-58: CONFEZIONE DI RIDUTTORI DI FRIZIONE IN DOPPIO LATTICE INGRASSATI	66
FIGURA 3-59: CAMPIONE PRONTO PER ESSERE TESTATO	66
FIGURA 3-60: ESEMPIO DI DATI DEL TEST DI FLOW NUMBER.....	67
FIGURA 3-61: LAYOUT GENERALE DEL TEST DI FLOW NUMBER A 40°C	69
FIGURA 3-62: RAPPORTO TIPICO TRA DEFORMAZIONE PERMANENTE E NUMERO DI CICLI NEL TEST DI DEFORMAZIONE PERMANENTE A CARICO RIPETUTO.....	70
FIGURA 4-1: PICNOMETRI RIEMPITI CON MISCELA E ACQUA DISTILLATE	75
FIGURA 4-2: CURVA GRANULOMETRICA DELLA MISCELA BITUMINOSA	77
FIGURA 4-3: GRADO DI ADDENSAMENTO DI MISCELA BITUMINOSA A 150°C.....	79
FIGURA 4-4: SUDDIVISIONE E TAGLIO DELLA LASTRA 1	81
FIGURA 4-5: CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE DEI TRAVETTI DELLA LASTRA 1.....	81
FIGURA 4-6: MACCHINA TRONCATRICE E CAMPIONE TAGLIATO	82
FIGURA 4-7: ABBASSAMENTI VS N°CICLI, PROVOCATI DAL WHEEL TRACKING TEST A 40°C	85

FIGURA 4-8: LASTRE L ₃ E L ₄ DOPO WHEEL TRACKING TEST A 40°C	85
FIGURA 4-9: ABBASSAMENTI VS N° CICLI, PROVOCATI DAL WHEEL TRACKING TEST A 60°C	86
FIGURA 4-10: LASTRA L ₇ DOPO WHEEL TRACKING TEST A 60°C	86
FIGURA 4-11: CURVE MAESTRE DI MD DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG	89
FIGURA 4-12: CURVE MAESTRE DI ANGOLO DI FASE DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG	90
FIGURA 4-13: BLACK DIAGRAM DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG	90
FIGURA 4-14: CURVE MAESTRE DI MD DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG-HIRSHCH	91
FIGURA 4-15: CURVE MAESTRE DI ANGOLO DI FASE DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG-HIRSHCH	91
FIGURA 4-16: BLACK DIAGRAM DEI CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈ - MODELLO MEPDG-HIRSHCH	92
FIGURA 4-17: CAMPIONE TESTATO A 40°C	94
FIGURA 4-18: DEFORMAZIONE PERMANENTE CUMULATA VS CICLO DI CARICO PER MISCELA BITUMINOSA TESTATA A 600 kPa A 40°C - FASE PRIMARIA DELLA CURVA DI DEFORMAZIONE PERMANENTE	94
FIGURA 4-19: CAMPIONE TESTATO A 60°C	95
FIGURA 4-20: DEFORMAZIONE PERMANENTE CUMULATA VS CICLO DI CARICO PER MISCELA BITUMINOSA TESTATA A 600 kPa A 60°C	95
FIGURA 4-21: REQUISITI MINIMI PER IL FLOW NUMBER MEDIO	96
FIGURA 4-22: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₂ TESTATO A 40°C	97
FIGURA 4-23: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₃ TESTATO A 40°C	97
FIGURA 4-24: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₄ TESTATO A 40°C	98
FIGURA 4-25: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₆ TESTATO A 60°C	98
FIGURA 4-26: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₇ TESTATO A 60°C	99
FIGURA 4-27: MODELLO REALE DI CAMPIONE A ₈ TESTATO A 60°C	99
FIGURA 4-28: RIASSUNTO DEI MODELLI PER CIASCUNA FASE DI CIASCUN CAMPIONE ANALIZZATO	100
FIGURA 4-29: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₂	101
FIGURA 4-30: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₃	102
FIGURA 4-31: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₄	102
FIGURA 4-32: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₆	103
FIGURA 4-33: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₇	103
FIGURA 4-34: CONFRONTO TRA CURVE DEL MODELLO REALE E CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₈	104
FIGURA 4-35: FASI DELLA CURVA MODELLATA MEDIA A 40°C	105
FIGURA 4-36: FASI DELLA CURVA MODELLATA MEDIA A 60°C	106
FIGURA 4-37: CONFRONTO TRA CURVE MODELLATE A 40°C E A 60°C PER OGNI FASE DEL MODELLO	107
FIGURA 4-38: RAPPORTO TRA I VALORI DI FLOW NUMBER E N _{PS} , ALLE DUE TEMPERATURE DI PROVA, CON RISPETTO AI % PI PER OGNI NUMERO DI CICLI VALUTATI	109
FIGURA 6-1: CURVA GRANULOMETRICA - SACCO MISCELA 1	113
FIGURA 6-2: CURVA GRANULOMETRICA - SACCO MISCELA 2	114
FIGURA 6-3: CURVA DI COMPATTAZIONE DI MISCELA BITUMINOSA - CAMPIONE G ₁	114
FIGURA 6-4: CURVA DI COMPATTAZIONE DI MISCELA BITUMINOSA - CAMPIONE G ₂	115

FIGURA 6-5: CURVA DI COMPATTAZIONE DI MISCELA BITUMINOSA - CAMPIONE G ₃	115
FIGURA 6-6: STABILITÀ MARSHALL - PROVINO M ₁	117
FIGURA 6-7: STABILITÀ MARSHALL - PROVINO M ₂	117
FIGURA 6-8: STABILITÀ MARSHALL - PROVINO M ₃	117
FIGURA 6-9: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 4°C - CAMPIONE A ₁	120
FIGURA 6-10: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 20°C - CAMPIONE A ₁	120
FIGURA 6-11: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 40°C - CAMPIONE A ₁	120
FIGURA 6-12: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 4°C - CAMPIONE A ₇	121
FIGURA 6-13: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 20°C - CAMPIONE A ₇	121
FIGURA 6-14: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 40°C - CAMPIONE A ₇	121
FIGURA 6-15: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 4°C - CAMPIONE A ₈	122
FIGURA 6-16: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 20°C - CAMPIONE A ₈	122
FIGURA 6-17: RISULTATI DEL TEST MODULO DINAMICO A 40°C - CAMPIONE A ₈	122
FIGURA 6-18: CONFRONTO DI CURVE MAESTRE DI CAMPIONE A ₁	123
FIGURA 6-19: CONFRONTO DI CURVE MAESTRE DI CAMPIONE A ₇	124
FIGURA 6-20: CONFRONTO DI CURVE MAESTRE DI CAMPIONE A ₈	125
FIGURA 6-21: CURVA DI FLOW NUMBER A 40°C - CAMPIONE A ₂	126
FIGURA 6-22: CURVA DI FLOW NUMBER A 40°C - CAMPIONE A ₃	126
FIGURA 6-23: CURVA DI FLOW NUMBER A 40°C - CAMPIONE A ₄	126
FIGURA 6-24: CURVA DI FLOW NUMBER A 60°C - CAMPIONE A ₆	127
FIGURA 6-25: CURVA DI FLOW NUMBER A 60°C - CAMPIONE A ₇	127
FIGURA 6-26: CURVA DI FLOW NUMBER A 60°C - CAMPIONE A ₈	127
FIGURA 6-27: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₂	128
FIGURA 6-28: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₃	128
FIGURA 6-29: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₄	129
FIGURA 6-30: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₆	129
FIGURA 6-31: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₇	130
FIGURA 6-32: CURVE MODELLATE DI CAMPIONE A ₈	130

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 3-1: CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DI BITUME 50-70	14
TABELLA 3-2: RISULTATI CONTROLLO DI QUALITÀ DI BITUME 50-70 FORNITI DA IPLM	14
TABELLA 3-3: VALORI MEDI DI VISCOSITÀ ALLE VARIE TEMPERATURE DI PROVA	15
TABELLA 3-4: QUANTITÀ DI MATERIALE PRESCRITTO DALLA NORMATIVA	33
TABELLA 3-5: DIMENSIONE E PESO DEI SETACCI	36
TABELLA 4-1: MEDIA DELLE TMD OTTENUTI CON LE 3 RIPETIZIONI ESEGUITI.....	74
TABELLA 4-2: RISULTATO DELLA CARBOLITE E CALCOLO DEL % DI BITUME DELLA MISCELA.....	75
TABELLA 4-3: ANALISI GRANULOMETRICA DEL MATERIALE DI STUDIO	76
TABELLA 4-4: MASSA VOLUMICA APPARENTE E % VUOTI DI MISCELA BITUMINOSA COMPATTATA MEDIANTE COMPATTATORE MARSHALL	78
TABELLA 4-5: MASSA VOLUMICA APPARENTE E % VUOTI DI MISCELA BITUMINOSA COMPATTATA MEDIANTE PRESSA GIRATORIA	78
TABELLA 4-6: CAMPIONI REALIZZATI – QUADRO DI SINTESI E RISULTATI ADDENSAMENTO	79
TABELLA 4-7: PARAMETRI DI COMPATTAZIONE CON COMPATTATORE A LASTRE	80
TABELLA 4-8: CARATTERISTICHE DELLE LASTRE COMPATTATE CON COMPATTATORE A LASTRE.....	80
TABELLA 4-9: MASSA VOLUMICA APPARENTE E % VUOTI DI LASTRA 1.....	80
TABELLA 4-10: CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE DEI CAMPIONI COMPATTATI CON PTG E DEI CUORI DEI CAMPIONI	82
TABELLA 4-11: RISULTATI MEDI RELATIVI ALLA PROVA MARSHALL.....	83
TABELLA 4-12: ABBASSAMENTI PROVOCATI DAL WHEEL TRACKING TEST A 40°C.....	84
TABELLA 4-13: ABBASSAMENTI PROVOCATI DAL WHEEL TRACKING TEST A 60°C.....	85
TABELLA 4-14: RISULTATI DEL TEST DI MD PER I CAMPIONI A ₁ , A ₇ E A ₈	88
TABELLA 4-15: RIASSUNTO DEI RISULTATI DEL TEST DI FLOW NUMBER A 40°C.....	93
TABELLA 4-16: RIASSUNTO DEI RISULTATI DEL TEST DI FLOW NUMBER A 60°C.....	94
TABELLA 4-17: RIASSUNTO DELLE ESPRESSIONI DEL MODELLO DELLA CURVA MODELLATA MEDIA A 40°C	105
TABELLA 4-18: RIASSUNTO DELLE ESPRESSIONI DEL MODELLO DELLA CURVA MODELLATA MEDIA A 60°C	106
TABELLA 4-19: RIEPILOGO DEI VALORI OTTENUTI NELLE PROVE DI FLOW NUMBER E DI ORMAIAMENTO ALLE DUE TEMPERATURE DI ANALISI	109
TABELLA 6-1: DETERMINAZIONE DELLA MEDIA DELLE TMD OTTENUTI CON LE PROVE.....	112
TABELLA 6-2: DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI BITUME CON LA CARBOLITE – SACCO MISCELA 1	112
TABELLA 6-3: ANALISI GRANULOMETRICA DI SACCO MISCELA 1	112
TABELLA 6-4: DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI BITUME CON LA CARBOLITE – SACCO MISCELA 2	113
TABELLA 6-5: ANALISI GRANULOMETRICA DI SACCO MISCELA 2	113
TABELLA 6-6: MASSA VOLUMICA APPARENTE E % VUOTI DI TRAVETTI TAGLIATI.....	116
TABELLA 6-7: CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE DELLE CUORE DEI CAMPIONI CAROTATI.....	116
TABELLA 6-8: RISULTATI DEL TEST MD DI CAMPIONI TESTATI A 4°C	118
TABELLA 6-9: RISULTATI DEL TEST MD DI CAMPIONI TESTATI A 20°C	119
TABELLA 6-10: RISULTATI DEL TEST MD DI CAMPIONI TESTATI A 40°C	119

TABELLA 6-11: RIEPILOGO DEI CALCOLI EFFETTUATI CON IL MODELLO MEPDG DI CAMPIONE A ₁	123
TABELLA 6-12: RIEPILOGO DEI CALCOLI EFFETTUATI CON IL MODELLO MEPDG DI CAMPIONE A ₇	124
TABELLA 6-13: RIEPILOGO DEI CALCOLI EFFETTUATI CON IL MODELLO MEPDG DI CAMPIONE A ₈	125
TABELLA 6-14: RIASSUNTO DEI VALORI DI CICLI UTILIZZATI PER MODELLARE OGNI CAMPIONE.....	131
TABELLA 6-15: RIASSUNTO DEI VALORI DI CICLI UTILIZZATI PER MODELLARE LE CURVE MODELLATE MEDI.....	131

ELENCO DI EQUAZIONI

EQUAZIONE 3-1: CALCOLO DELLA MASSA VOLUMICA MASSIMA	33
EQUAZIONE 3-2: CALCOLO DI % BITUME DELLA MISCELA RISPETTO ALLA MASSA DEGLI AGGREGATI.....	34
EQUAZIONE 3-3: FATTORE DI CORREZIONE APPLICATO AL VALORE DI STABILITÀ.....	39
EQUAZIONE 3-4: FORMULA PER CALCOLO DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE	40
EQUAZIONE 3-5: FORMULA PER IL CALCOLO DEL CONTENUTO DEI VUOTI IN UN PROVINO	40
EQUAZIONE 3-6: CALCOLO DELLA QUANTITÀ DI MATERIALE A INSERIRE NELLA FUSTELLA CILINDRICA	42
EQUAZIONE 3-7: GRADO DI ADDENSAMENTO CALCOLATO AD OGNI GIRO DEL PROCESSO DI COMPATTAZIONE	44
EQUAZIONE 3-8: VOLUME DEL CAMPIONE A "x" GIRI	44
EQUAZIONE 3-9: CALCOLO PER CORREGGERE IL VALORE DI CUX.....	44
EQUAZIONE 3-10: CONTENUTO DEI VUOTI RELATIVI AL NUMERO DI GIRI.....	45
EQUAZIONE 3-11: EQUAZIONE DI RETTA CHE ASSOCIA I PARAMETRI DI COMPATTAZIONE	45
EQUAZIONE 3-12: CALCOLO DI MISCELA BITUMINOSA A INSERIRE NEL CASSERO	48
EQUAZIONE 3-13: MASSA CORRETTA PER RAGGIUNGERE I VALORI DI VUOTI DESIDERATI.....	49
EQUAZIONE 3-14: CONTENUTO DI VUOTI GEOMETRICI DELLA LASTRA	51
EQUAZIONE 3-15: CALCOLO DELLA PROFONDITÀ PROPORZIONALE DEL SOLCO	54
EQUAZIONE 3-16: CALCOLO DEL MODULO DINAMICO	61
EQUAZIONE 3-17: CALCOLO FREQUENZA RIDOTTA.....	61
EQUAZIONE 3-18: CALCOLO DI SHIFT FACTOR	62
EQUAZIONE 3-19: MODELLO HIRSCH - CALCOLO DI MODULO LIMITE MASSIMO	63
EQUAZIONE 3-20: CALCOLO DEL'ERRORE STANDARD.....	63
EQUAZIONE 3-21: CALCOLO DELLA VARIANZA.....	64
EQUAZIONE 3-22: TASSO DI VARIAZIONE DI DEFORMAZIONE ASSIALE PERMANENTE.....	67
EQUAZIONE 3-23: MODELLO DI FRANCKEN-CALCOLO DI DEFORMAZIONE ASSIALE PERMANENTE.....	68
EQUAZIONE 3-24: CALCOLO DEFORMAZIONE PERMANENTE TRAMITE MODELLO DI LEGGE DI POTENZA	71
EQUAZIONE 3-25: CALCOLO DEFORMAZIONE PERMANENTE TRAMITE MODELLO LINEARE.....	71
EQUAZIONE 3-26: CALCOLO DEFORMAZIONE PERMANENTE TRAMITE MODELLO ESPONENZIALE	71
EQUAZIONE 3-27: CALCOLO DELLA DEVIAZIONE PER DETERMINARE L'INIZIO DELLA FASE SECONDARIA DEL MODELLO.....	72

ABBREVIAZIONI

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester
FN	Flow Number
HMA	Hot mix asphalt
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEPDG	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
MD	Modulo dinamico
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PTG	Pressa a taglio giratorio
SPT	Simple Performance Test
VFA	Percentuale di vuoti riempiti con asfalto
VMA	Percentuale di vuoti nell'aggregato minerale

CAPITOLO 1

1 INTRODUZIONE

1.1 Caratteristiche generali dello strato di usura di una pavimentazione stradale flessibile e semi-rigida

La parte riconoscibile delle pavimentazioni stradali è solo la parte esteriore, di colore scuro dato dalla presenza di bitume che è presente vicino al 5% in peso di tutta la miscela e il resto è costituito da aggregati lapidei.

Le caratteristiche generali di una pavimentazione sono le seguenti:

- risposta alle sollecitazioni tangenziali, alle quali l'aggregato non è in grado di resistere, senza deterioramenti.
- risposta alle sollecitazioni verticali e quindi portanza adeguata dei materiali costituenti cioè, la resistenza di una pavimentazione non è relativa al singolo granulo ma alla totalità di granuli e del legante. La presenza di un legante dà stabilità alla pavimentazione.
- resistenza all'acqua; una pavimentazione deve impedire la stasi e l'infiltrazione dell'acqua, assicurando sempre un livello accettabile di resistenza alle τ .
- garanzia di caratteristiche di aderenza e di moto regolare del veicolo.

Per assicurare queste caratteristiche si comprende la necessità di utilizzo di materiali leganti.

Una pavimentazione stradale, sia flessibile o semi-rigida, è usualmente costituita da più strati sovrapposti di materiali differenti, composti da miscele di aggregati lapidei e leganti, a formare una vera e propria struttura interposta tra i carichi ed il terreno in luogo. La serie di strati costituenti ha in genere una struttura litica con dimensione degli elementi decrescente dal basso verso l'alto, a fronte di una qualità crescente delle caratteristiche meccaniche degli inerti stessi e della miscela che li comprende. A ogni strato viene attribuito una funzione fondamentale e una caratterizzazione dimensionale, in termini di spessore e una meccanica, in termini di resistenza alle sollecitazioni del materiale in esercizio.

Nell caso della progettazione delle pavimentazioni flessibili, uno degli elementi più critici è quello di determinare il materiale più idoneo a fornire le prestazioni necessarie per la funzione che deve assolvere. Nel caso della scelta di materiali adeguati a una corretta progettazione della miscela per strati superficiali risulta di fondamentale importanza per garantire resistenza e durabilità alla pavimentazione.

Le prestazioni a rottura del conglomerato bituminoso sono strettamente relazionate alle proprietà del mastice di cui è composto, e di conseguenza alle caratteristiche del filler, del bitume e della loro interazione. I bitumi modificati vengono spesso usati al fine di ottenere miscele che concedano maggiori prestazioni in termini di resistenza ai fenomeni sia di fatica sia di ormaiamento.

Lo strato di usura, che ha uno spessore variabile tra 3 e 6 cm, rappresenta lo strato più superficiale di una pavimentazione stradale ed è quello sul quale agisce direttamente la maggior parte delle azioni esterne. Per questo motivo, tale manto rappresenta lo strato più importante e costituisce l'elemento a più elevato valore tecnologico dell'intera pavimentazione stradale. Tale strato superficiale deve garantire il soddisfacimento di adeguati requisiti strutturali e funzionali, tali come contribuire a sopportare ed attenuare le azioni statiche e dinamiche indotte dai carichi da traffico, proteggere gli strati sottostanti dall'azione degli agenti atmosferici e garantire sicurezza e comfort alla circolazione. I requisiti strutturali, espressi in termini di prestazioni meccaniche, possono essere soddisfatti mediante uno studio della composizione volumetrica delle miscele utilizzate e ricorrendo all'impiego dei materiali più idonei in riferimento alle specifiche condizioni climatiche e di esercizio. Logicamente, al soddisfacimento dei requisiti strutturali collegati alla resistenza ai carichi verticali contribuiscono in modo rilevante il sottofondo e gli altri strati della pavimentazione, invece lo strato di usura conserva una funzione predominante nei confronti della resistenza alle azioni tangenziali trasmesse dagli pneumatici, soprattutto in corrispondenza delle curve e dei tratti in cui succedono frenature e accelerazioni dei veicoli.

Nelle pavimentazioni flessibili, l'entità delle deformazioni e delle tensioni orizzontali indotte dalle azioni verticali, cresce avanzando dagli strati superiori a quelli inferiori della pavimentazione, che perciò risultano sottoposti a tensioni di trazione più gravose, ed è evidentemente dipendente dalla rigidità complessiva della pavimentazione stradale e del sottofondo. Invece, le deformazioni e le tensioni verticali indotte dalle stesse azioni

verticali si abbassano procedendo dall'alto verso il basso, per cui gli strati più superficiali risultano sottoposti a tensioni verticali di compressione più gravosi.

Nello strato di usura, si determina uno stato di tensione complessivamente più gravoso di quello proprio degli altri strati della pavimentazione e, per garantire la resistenza dello strato a questo specifico stato di tensione particolarmente gravoso, il manto di usura si deve realizzare con una miscela caratterizzata da elevate prestazioni meccaniche. Tali prestazioni meccaniche, nel caso delle miscele bituminose a granulometria continua ("chiuse"), dipendono dalle caratteristiche degli aggregati, che devono avere natura petrografica e forma tali da garantire elevata resistenza alla levigazione, elevati angoli di attrito interno dello scheletro litico e, allo stesso tempo, buona affinità con il legante, intesa come l'attitudine dell'aggregato a legarsi in modo stabile con il bitume.

In un manto di usura è noto, data la sua natura visco-elastica, la stretta relazione del bitume dalla temperatura e la diversa risposta alle azioni indotte dalla stessa. In riferimento alle alte temperature di esercizio, l'accumulo di deformazioni permanenti nella miscela bituminosa generato dall'azione addensante dovuta al passaggio dei veicoli pesanti può causare ormaiamento, ossia una depressione della pavimentazione in corrispondenza della traiettoria degli pneumatici. Dunque, il nostro studio ha proprio lo scopo di realizzare un'analisi compositiva e volumetrica di una miscela bituminosa, prodotta in un impianto per conglomerati bituminosi, per lo strato di usura di una pavimentazione stradale ed eseguire una caratterizzazione completa della stessa verificando se quella è adeguata dal punto di vista delle prestazioni meccaniche.

1.2 Obiettivi e scopi del lavoro

Il progetto di tesi comincia con l'analisi realizzata sulla la pavimentazione della galleria di sicurezza, la quale fa parte del tunnel autostradale del Fréjus che comunica la Francia con l'Italia, collegando il comune di Bardonecchia con il comune di Modane. Tale infrastruttura stradale è una pavimentazione particolare e innovativa, già che il riempimento verrà fatto con malte cementizie fluide a bassa resistenza, autolivellante e auto compattante. In riferimento a tale pavimentazione, il nostro lavoro si basa sull'analisi del conglomerato bituminoso utilizzato per il suo strato di usura.

Il lavoro consiste nell'analizzare una miscela di conglomerato bituminoso già proposto dalla società assegnata al compito di pavimentazione, fatta per lo strato di usura della galleria, al fine di fare una caratterizzazione completa della miscela da un punto di vista strutturale, che influenza il comportamento a lungo termine.

Il lavoro è stato realizzato esaminando il materiale dal punto di vista prestazionale per verificare se il conglomerato bituminoso è adeguato al progetto del tunnel. Questo tipo di miscela bituminosa in studio è caratterizzata verificando la sua composizione in funzione del suo percentuale di bitume, la sua granulometria e la massa volumica degli aggregati estratti e la compattazione della stessa.

Lo scopo di questo lavoro è cercare di capire le caratteristiche prestazionali che il conglomerato bituminoso deve avere per contrastare i fenomeni delle deformazioni permanenti. Il comportamento delle sovrastrutture stradali è infatti condizionato dalla distribuzione granulometrica, dalle caratteristiche degli aggregati, dalle condizioni del mix design e dalle proprietà del legante della miscela bituminosa impiegata. Proprio per questo motivo, uno studio completo del conglomerato bituminoso è fondamentale per poter marginare il problema del deterioramento della pavimentazione. E in base agli risultati ottenuti, valutare se la miscela utilizzata per lo strato di usura risulta adeguata alla infrastruttura stradale di elevato traffico pesante, in funzione delle sue prestazioni meccaniche.

Gli obiettivi di tale lavoro sono i seguenti: da un lato, determinare, basandoci sulla caratterizzazione delle prestazioni della miscela, se i valori ottenuti nelle prove sono ragionevoli; dall'altro lato, valutare la stessa dal punto di vista strutturale in riferimento a la sua lavorabilità, modulo e rutting.

1.3 Schema della Tesi

Il progetto di tesi è organizzato su cinque capitoli di cui il primo fa un'introduzione basata sul tema dello studio e sugli obiettivi del programma di tesi. Nel secondo capitolo si parla del Traforo stradale del Fréjus dove commenta come è disposto lo stesso e descrive le caratteristiche della nuova galleria di sicurezza, facendo riferimento al materiale utilizzato per la pavimentazione della galleria, su cui si basa il lavoro di tesi. Il seguente capitolo è diviso in quattro parti, dove la prima fa riferimento al materiale impiegato nello studio, dove viene spiegata la composizione della miscela bituminosa analizzata prodotta in impianto. Inoltre, le altre parti del capitolo riassumono il progetto di ricerca, specificando in uno schema tutte le prove fatti sul conglomerato e l'ordine in cui sono stati effettuati, e le attrezzature e strumentazione usati nel laboratorio per eseguire tutte le prove definite. Il quarto capitolo espone tutte le prove fatte per questo progetto durante il lavoro nel laboratorio e le valutazioni di ciascun metodo di prova con i loro rispettivi risultati. Da questi risultati della caratterizzazione della miscela bituminosa, è possibile verificare se le prestazioni della stessa sono adatte alla pavimentazione della galleria. Le conclusioni, in cui i commenti dei risultati ottenuti e le discussioni basate sulle prestazioni meccaniche del conglomerato bituminoso, sono dettagliate nell'ultimo capitolo della tesi.

CAPITOLO 2

2 TUNNEL DEL FRÉJUS

Le gallerie alpine sono infrastrutture importanti che aiutano la comunicazione tra le diverse regioni dell'Unione Europea.

Alcune gallerie oggi in servizio da molto tempo sono state ancora progettate in un periodo in cui le conoscenze tecniche e le condizioni di trasporto erano molto diverse rispetto alle attuali, con livelli di sicurezza disomogenei.

Gli incidenti nelle gallerie, come gli incendi, possono avere conseguenze tragiche e risultare estremamente costosi in termini di vite umane, aumento della congestione di traffico, inquinamento e dei costi di riparazione.

I sinistri nei tunnel avvenuti degli anni 2000 hanno evidenziato l'importanza di adottare misure armonizzate che ricadessero in ambito europeo e comportassero un livello uniforme, costante ed elevato di protezione e sicurezza in tutti i tunnel di lunghezza superiore ai 500 metri. Per esempio, gli incendi successi nelle gallerie del Monte Bianco, tra Francia e Italia, e Tauern in Austria nel 1999 e del Gottardo in Svizzera nel 2001 hanno provocato decine di morti e feriti e grandi assi europei inagibili per mesi o anni.

La riduzione del rischio all'interno delle gallerie è collegata a due obiettivi:

- la prevenzione degli incidenti stradali e degli incendi tesa a evitare che l'evento incidentale accada.
- la protezione dagli incendi per far sì che, qualora l'evento si verifici, le circostanze siano tali da consentire il salvataggio del maggior numero di persone coinvolte nell'evento e l'estinzione più rapida possibile dell'incendio stesso.

Il Parlamento Europeo per garantire un livello elevato e uniforme di sicurezza, di servizi e di comfort sulla rete stradale trans europea ha emanato la: "Direttiva 2004/54/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004, relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale trans europea".

La Direttiva Europea stabilisce i principali criteri per decidere se si debba costruire una galleria a fornice singolo o doppio valutando dei volumi di traffico previsto e la

sicurezza, prendendo in considerazione aspetti quali la percentuale di automezzi pesanti, il dislivello e la lunghezza e le linee guida per l'adeguamento a più efficienti azioni di sicurezza attiva.

Il presente studio si basa su una caratterizzazione completa delle prestazioni di un conglomerato bituminoso che viene solitamente utilizzato per strati di usura in pavimentazioni flessibili. Questo tipo di pavimento stradale viene generalmente utilizzato nelle gallerie di diversi paesi, come il progetto del tunnel del Fréjus, dove la galleria di sicurezza viene realizzata con una pavimentazione stradale di tale tipo. La miscela bituminosa analizzata nel progetto di tesi viene fissata per l'impresa che si occuperà dei lavori di pavimentazione nella galleria. Tale impresa deve produrre un conglomerato bituminoso con le caratteristiche e proprietà meccaniche definiti nel capitolato.

2.1 Rassegna del Tunnel del Fréjus

Il Traforo del Frejus è stato aperto al traffico il 12 luglio 1980 e concretizzato dopo 6 anni di lavoro attraverso due fronti di scavo aperti su entrambi i versanti del massiccio del Frejus. Questo traforo stradale è una galleria a pedaggio che collega la Francia con l'Italia. Si trova sotto il monte del Frejus tra le città di Bardonecchia in Italia e Modane in Francia dove corre parallelo al traforo ferroviario del Frejus. La azienda SFTRF gestisce la sezione francese del tunnel, mentre la sezione italiana è gestita dalla SITAF.

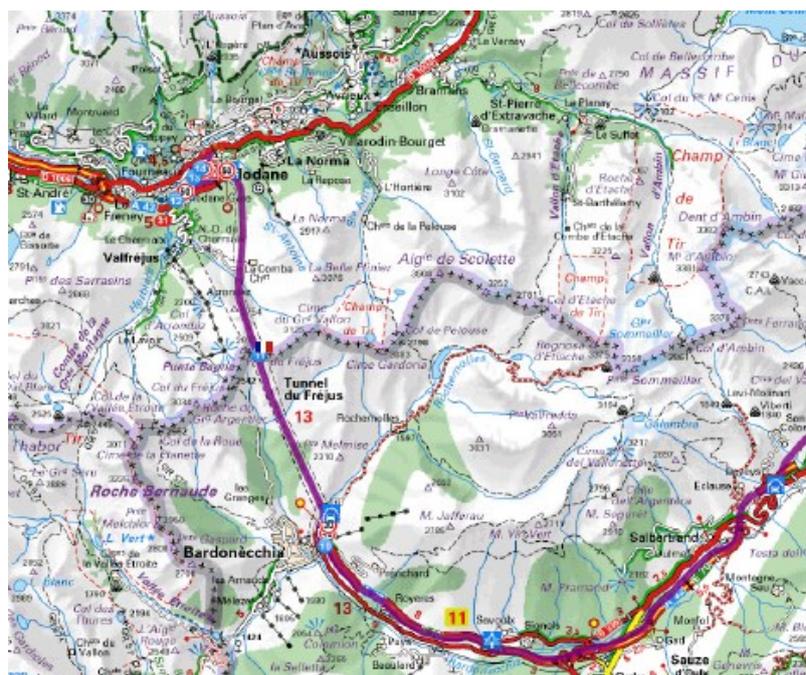


Figura 2-1: Localizzazione del Traforo Autostradale del Fréjus

La galleria ha una lunghezza di 12,870 chilometri, di cui 6,394 chilometri in Italia, e è composto da una canna unica a due sensi di marcia con corsia utile di 3,55 m. ognuno, per una larghezza totale di 9 metri e le sue dimensioni concedono la circolazione di veicoli pesanti fino a 4,30 m d'altezza, costituendo il sistema di traffico autostradale tra Italia e Francia unendo la Provincia di Torino con il Dipartimento della Savoia.

Per rispettare alle direttive comunitarie delle gallerie, introdotte nella rete Ten –T (acronimo che indica dall'inglese Trans-European Networks Transport), in luglio del 2011 sono iniziati, dal lato francese, i lavori di scavo della seconda canna. La Tbm “Anna” ha impiegato 580 giorni per scavare il versante francese e 504 giorni per completare il fronte italiano, con conseguente caduta del diaframma il 17 novembre 2014.



Figura 2-2: Sezioni del tunnel

2.2 Seconda canna

Il nuovo tunnel di lunghezza pari a 12.848 km (6.353 km in lato italiano e 6.495 km in territorio francese) corre parallelamente alla galleria principale con interasse di circa 50 metri. La connessione tra le due gallerie è garantita da 34 rami di comunicazione disposti ad un interasse medio di 367 metri di cui solo 16 rifugi costituiscono le opere civili lato Italia. I rami di comunicazione hanno la funzione di rifugio in caso di incidente e hanno superficie per utenti pari a 110 mq.

La seconda canna entrerà in esercizio nel 2019, rendendo quindi il traforo del Fréjus la più lunga galleria europea a doppia canna.

Il raddoppio del Fréjus nasce da un'esigenza di sicurezza, necessaria per il rispetto degli standard richiesti a livello comunitario e per permettere una seconda via di fuga in caso di incendio, evitando il ripetersi di tragedie come quella del Monte Bianco in 1999.



Figura 2-3: Seconda canna

La galleria di transito si rappresenta come una seconda canna di un tunnel a doppio fornice, con importantissimi miglioramenti sulla sicurezza degli utenti, specialmente legati al fatto che la circolazione all'interno di ogni canna avverrebbe in modo unidirezionale, da un sistema di sicurezza di tipo passivo (la galleria di sicurezza) a uno di tipo attivo (la galleria di transito). La separazione dei flussi, e quindi con un senso di circolazione con l'immissione del traffico in senso Italia-Francia nella galleria di sicurezza e l'introduzione del traffico nel senso Francia-Italia nel traforo esistente è un sistema di sicurezza attivo, che diminuisce drasticamente la possibilità che si verifichi un incidente e elimina la probabilità che possa essere un incidente frontale. Inoltre, la separazione dei flussi permetterebbe una gestione migliore della ventilazione, dove il fumo andrebbe nel senso di marcia nel caso di incendio.

Ci sono due società concessionarie per quanto riguarda le competenze circa la realizzazione dell'opera e sono l'impresa italiana SITAF e la francese SFTRF. La Società Italiana per il Traforo Autostradale del Fréjus per azioni (SITAF S.p.A) è concessionaria dal 1973 fino al 2050, dell'Autostrada A32 Torino –Bardonecchia e del Traforo del Fréjus (T4). Questa compagnia a sua volta è divisa in quattro società controllate: Ok- Gol s.r.l., Tecnositaf S.p.A, Engineering S.p.A, Sitalfa S.p.A. Questa ultima, nata per l'esecuzione diretta dei lavori di manutenzione dell'autostrada e di impianti civili e di opere della Sitaf, comprende l'impianto di produzione di Salbertand, che somministra direttamente i materiali per la effettuazione del tunnel.

2.3 Galleria di Sicurezza del Fréjus

Il tracciato d'asse della galleria di sicurezza ricalca il tracciato d'asse del traforo autostradale del Fréjus dal quale dista circa 50 m verso est, senso di marcia Italia – Francia. Il piano viabile in galleria di sicurezza sarà posto a quota – 50 cm dal piano carrabile del traforo autostradale.



Figura 2-4: Fase di scavo con la TBM del secondo tunnel

Il progetto della galleria di sicurezza parallela al traforo del Fréjus prevede le seguenti caratteristiche: lunghezza di 12.875 m, una pendenza media 0,54% (Francia – Italia), un diametro utile della galleria di sicurezza di 8.00 m, un diametro teorico dei conci di rivestimento di 8.20 m per avere conto dei margini di tolleranza esecutiva, una sagoma libera di 6.60 m x 4.00 m. Inoltre, in considerazione anche degli aspetti geotecnici, la galleria di sicurezza sarà realizzata con un interasse traforo-galleria di 50 m, dove la sezione assicura una sagoma di passaggio di 6.60 x 3.00 m. Il rivestimento sarà eseguito con conci prefabbricati in calcestruzzo armato posati in avanzamento direttamente allo stesso tempo della TBM. L'impermeabilizzazione della galleria sarà garantita dalle guarnizioni di tenuta tra gli elementi dei conci prefabbricati. Nel caso del pavimento definitivo, sarà realizzato una volta terminati i lavori di scavo ed evacuata la TBM. Questa operazione sarà svolta nel seguente modo:

- Scavo dei tracciati e pozzetti per la posa dei cavi elettrici e relativi raccordi ai rifugi ed alle stazioni tecniche. Questa soluzione permette di interrare la quasi totalità delle reti necessarie.
- Messa in quota dei pozzetti di ispezione della condotta acqua.
- Esecuzione della pavimentazione in conglomerato bituminoso.

La pavimentazione della galleria si basa in una pavimentazione innovativa con riempimento in malte cementizie fluide a bassa resistenza, autolivellante e auto compattante, con il fine di coprire adeguatamente tutti i servizi disposti nella stessa.

Nella galleria di sicurezza saranno accessibili dal piano stradale unicamente gli impianti relativi a idranti, illuminazione di emergenza e segnaletica. I cavi di tutti gli altri impianti sono in sicurezza nei tracciati interrati, la tubazione antincendio è ubicata al di fuori della sagoma di passaggio. Tutte le apparecchiature di gestione e regolazione degli impianti sono disposte nei rifugi.

CAPITOLO 3

3 MATERIALI, INDAGINE SPERIMENTALE E METODOLOGIA DI PROVA

In questo capitolo, basato sul programma sperimentale, si parla del materiale utilizzato nel progetto di tesi e sono descritti i diversi strumenti e procedure utilizzati per la caratterizzazione della miscela bituminosa di studio. Le attrezzature e le macchine utilizzate per la realizzazione della tesi fanno parte del Laboratorio DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture) situato nel Politecnico di Torino. In questa sezione vengono illustrate in dettaglio tutte le apparecchiature e i rispettivi protocolli di prova seguiti durante l'analisi sperimentale. I diversi test che sono stati sviluppati in laboratorio sono stati eseguiti seguendo gli standard europei. Inoltre, vengono riportati nel capitolo i metodi di confezionamento dei provini.

3.1 Materiali Impiegati

Nel progetto di tesi è stata analizzata una miscela bituminosa, destinata a lo strato di usura del caso di studio, nella sua totalità tramite lo studio della sua composizione (percentuale di bitume, massa volumica degli aggregati e analisi granulometrica degli aggregati) e la sua caratterizzazione dal punto di vista strutturale (lavorabilità, modulo dinamico e rutting). Questa miscela è stata prodotta in un impianto di produzione per conglomerati bituminosi. Tale materiale viene studiato con procedura del mix design, dove la ricetta del mix design viene consolidata dall'impresa.



Figura 3-1: Materiale impiegato per le prove di laboratorio

Nella pavimentazione, gli strati devono essere progettati in maniera idonea in base alle condizioni di traffico e climatiche, compito del mix design.

Da risultati precedente al mix design, il materiale che è arrivato è prodotto con le determinate caratteristiche:

3.1.1 Bitume

Il bitume puro è un composto idrocarburico derivato dalla distillazione frazionata del petrolio grezzo o dall'estrazione da giacimenti naturali. In questi bitumi, definiti come bitumi naturali, la fase di distillazione è avvenuta naturalmente nel corso delle ere geologiche). Dal punto di vista chimico è composto principalmente da carbonio (81-88%) e idrogeno (8-10%), nonché da zolfo, ossigeno ed azoto in proporzioni variabili. Tale materiale, che conferisce capacità legante agli aggregati lapidei nei conglomerati bituminosi, ha una reologia variabile in funzione della temperatura, dei modi e dei tempi di applicazione dei carichi.

Quando si parla di bitume modificato, invece, si fa riferimento a quello bitume ordinario miscelato insieme a polimeri che esaltano alcune qualità. I polimeri utilizzati sono di tipo termoplastico, elastotermico o termoindurente, e sono presenti in quantità variabile in funzione del grado di modifica desiderato.

Il bitume, grazie alle sue caratteristiche viscoelastiche ed alla sua adesione agli aggregati, svolge la funzione di legante, fornendo l'ammasso lapideo di quella coesione che altrimenti non potrebbe avere. Inoltre, è proprio al bitume che si deve il carattere essenzialmente viscoelastico e termoplastico del conglomerato, che, oltre a manifestare delle deformazioni istantanee sotto carico, presenta delle componenti di risposta dipendenti dal tempo e dalla velocità di applicazione delle sollecitazioni e dalla temperatura.

La miscela bituminosa di studio è stata realizzata con un Bitume 50-70. Il bitume stradale 50-70 presenta elevate caratteristiche di resistenza all'invecchiamento, di elastoplasticità e di comportamento alle basse temperature. L'ottimale viscosità nel campo delle tradizionali temperature di confezionamento e posa in opera dei conglomerati, consente un'agevole operatività, anche in condizioni di lavorazione critiche. Tale bitume stradale può venire impiegato nella esecuzione dei conglomerati costituenti le sovrastrutture flessibili, per la realizzazione di pavimentazioni di strade, autostrade, marciapiedi e piste aeroportuali.

Tramite la seguente tabella, fornita dalla società IPLOM, si possono constatare le caratteristiche prestazionali di tale bitume.

Proprietà	Unità di Misura	Valori		Valori Tipici	Metodo di Prova
		Min	Max		
Penetrazione a 25°C	dmm	50	70	62	ASTM D 5 / UNI EN 1426
Infiammabilità Cleveland	°C	230		>300	ASTM D 92 / UNI EN ISO 2592
Punto di Rammollimento	°C	46	54	52	ASTM D 36 / UNI EN 1427
Punto di rottura Fraas	°C		-8	-9	IP 80 / UNI EN 12593
Volatilità a 163°C (RTFOT)	%		0.5	0.1	ASTM D 2872/UNI EN 12607-1
Volatilità	%	50		55	ASTM D 5 / UNI EN 1426
Volatilità	°C	48		58	ASTM D 36 / UNI EN 1427
Solubilità	%	99		99.8	UNI EN 12592
Variazione rammollimento	°C		11	6	ASTM D 36 / UNI EN 1427

Tabella 3-1: Caratteristiche prestazionali di Bitume 50-70

I risultati delle prove di controllo di qualità del bitume 50-70, forniti dalla società IPLOM, sono le seguenti:

Proprietà	Unità di Misura	Valore Analisi	Metodo di Prova
Punto Penetrazione	dmm	64	UNI EN 1426
Infiammabilità Cleveland	°C	>300	UNI EN ISO 2592
Punto di Rammollimento	°C	48.6	UNI EN 1427
Punto di rottura Fraas	°C	-11	UNI EN 12593
Volatilità a 163°C (RTFOT)	%	-0.1	UNI EN 12607-1
Pen.Res.dopo RTFOT	%	58	UNI EN 1426
Ramm.dopo Volatilità	°C	54.8	UNI EN 1427
Solubilità	%	99.98	UNI EN 12592
Variazione rammollimento	°C	6.2	UNI EN 1427

Tabella 3-2: Risultati controllo di qualità di Bitume 50-70 forniti da IPLOM

Il parametro reologico che rappresenta bene il comportamento dei leganti bituminosi alle alte temperature è la viscosità. Tale parametro è definito come la misura dell'attrito interno fra strati adiacenti di un fluido che si oppone al loro scorrimento reciproco. Maggiore è l'attrito, maggiore è la forza necessaria a provocare tale movimento. La viscosità del bitume varia notevolmente con lo stato termico dello stesso: al crescere della temperatura si assiste ad una riduzione della viscosità. L'unità di misura della viscosità, detta anche viscosità dinamica, nel Sistema Internazionale è il Pa·s, corrispondente a 10 Poise nel sistema CGS. La viscosità del legante assume un'importanza strategica durante le fasi di miscelazione e compattazione del conglomerato bituminoso. Se la viscosità è troppo alta, il materiale troverà, infatti, molta resistenza sia in fase di miscelazione che di compattazione e sarà quindi molto difficile raggiungere le proprietà volumetriche desiderate. Al contrario, se la viscosità è troppo bassa, potrebbero verificarsi fenomeni di eccessivo rifluimento del bitume a continuazione della compattazione. La consistenza del materiale, esprimibile attraverso la viscosità del legante, rappresenta quindi il presupposto necessario per procedere prima a una efficiente miscelazione del bitume con gli aggregati e successivamente per garantire un'adeguata lavorabilità della miscela durante la sua messa in opera.

La tabella seguente riassume, per le diverse temperature investigate (125°C, 135°C, 150°C, 165°C, 175°C e 190 °C), i risultati medi della viscosità espressa in [Pa·s], determinata sul bitume della miscela bituminosa di studio. Inoltre, dalla prova di viscosità, si è trovata la seguente curva.

Bitume	Viscosità Dinamica [Pa.s]					
	125°C	135°C	150°C	165°C	175°C	190°C
Bitume 50-70	0.667	0.396	0.200	0.113	0.081	0.051

Tabella 3-3: Valori medi di viscosità alle varie temperature di prova

Compaction range [Pa·s]	
0.250	0.310

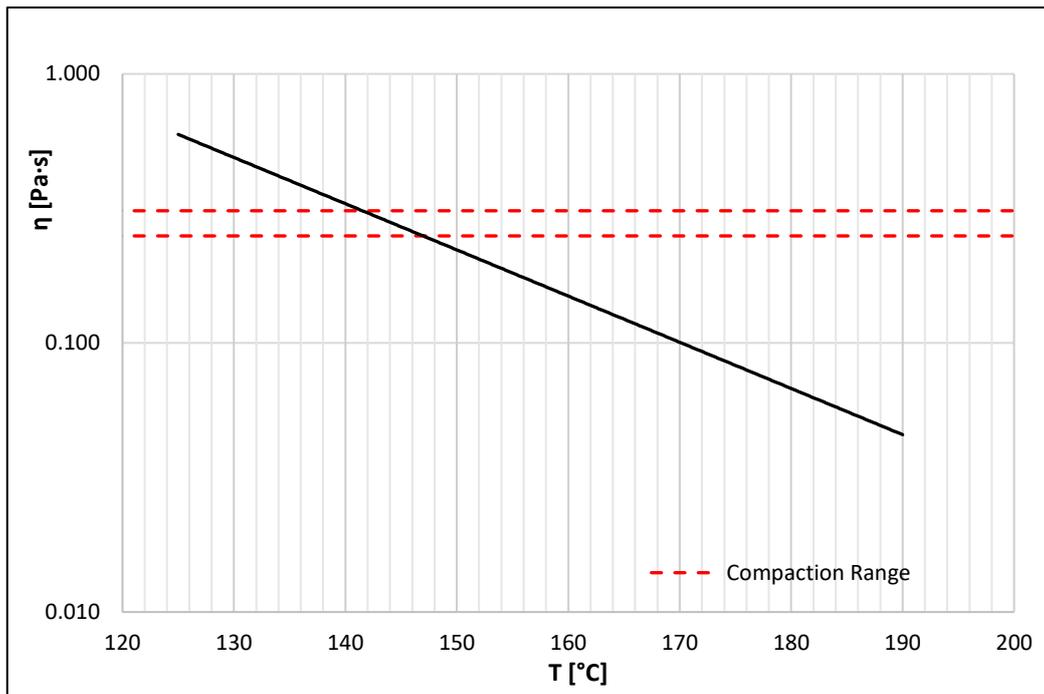


Figura 3-2: Viscosità vs Temperatura

Nel grafico illustrato, le linee tratteggiate in rosso rappresentano il range di compattazione ottimale. L'intervallo di viscosità ottimale per la compattazione di un bitume è compreso nel range di 0.280 ± 0.030 Pa*s. Quindi è il range che va da 0.250 a 0.310.

La temperatura in questo range è compresa tra 142°C e 148°C, quindi si è scelto 150°C per tenere in conto della presenza del polimero nella miscela che aumenta le temperature di compattazione e miscelazione.

Questa analisi è stata effettuata seguendo la norma ASTM D 2493.

3.1.2 Aggregati

Gli aggregati lapidei rappresentano lo scheletro degli strati che compongono la pavimentazione; dall'attrito interno dei granuli che costituiscono la miscela, difatti, dipende la capacità di ogni strato di resistere agli sforzi conservandosi sufficientemente integro ed indeformabile. Gli aggregati possono essere composti da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce di cava massive o di origine alluvionale e da elementi naturali a spigoli vivi o arrotondati. Le caratteristiche fondamentali richieste agli aggregati sono:

- La resistenza all'urto e all'abrasione.
- Una forma a spigoli vivi ed una buona micro tessitura.

Gli aggregati sono classificati in tre gruppi fondamentali in base alla loro pezzatura:

- **aggregato grosso:** comprende pietrisco, pietrischetto e graniglia, ossia le pezzature trattenute al setaccio di 2 mm di apertura. È importante che questo tipo di materiale abbia granuli con forma poliedrica e spigoli vivi in modo da esercitare un elevato attrito interno e buone caratteristiche meccaniche, costituendo l'ossatura portante del conglomerato bituminoso.
- **aggregato fine:** contiene le pezzature la cui parte preponderante sia inclusa tra i setacci con aperture di 2 e 0,075 mm, cioè le sabbie. Tale materiale deve avere buone caratteristiche meccaniche e di forma, riempire parzialmente i vuoti tra i granuli di aggregato grosso ed è in parte responsabile dell'indice dei vuoti di una miscela bituminosa.
- **aggregato finissimo:** corrisponde con la frazione polverosa passante in prevalenza al setaccio da 0,075 mm, chiamato filler. Nel conglomerato bituminoso ha la funzione di additivo per il bitume e svolge azione addensante. Il suo dosaggio deve essere fatto con attenzione data la sua influenza sulla stabilità termica e meccanica dei conglomerati. Inoltre, ha la proprietà di irrigidire il bitume impedendone il rifluimento.

Esistono diverse procedure che permettono di valutare le caratteristiche degli aggregati di resistenza all'abrasione, all'usura ed alla frantumazione. Fra le metodologie più noti è la prova Los Angeles. Inoltre, esistono molte prove per il controllo di altre importanti caratteristiche degli aggregati, come la massa volumica apparente e la densità, dove queste prove sono le che abbiamo seguito nel progetto di tesi nella fase di analisi compositiva della miscela bituminosa.

3.1.3 Additivi

Il beneficio dell'utilizzazione degli additivi è la possibilità di progettare la miscela conglomerato-additivi su misura per i diversi parametri di progetto, conseguendo esattamente le prestazioni richieste dal capitolato dell'opera.

Gli additivi permettono, in generale, di ridurre gli spessori degli strati, oppure di allungare la vita delle pavimentazioni anche oltre il 50% in termini di numero di assi di passaggio, o entrambe.

Inoltre, l'uso degli additivi durante la fase di costruzione di infrastrutture permette di prevenire la manifestazione di molti problemi di ammaloramento, di sgranamenti,

ormaiamento oppure fessurazioni, diminuendo la frequenza e la necessità degli interventi manutentivi nel tempo.

C'è un'ampia gamma di additivi utilizzati per produrre miscele bituminose per lo strato di usura, ma a sua volta la scelta dell'additivo dipende dalle aree di utilizzo e dall'ambito di applicazione del materiale.

L'additivo utilizzato nella confezione del conglomerato bituminoso preso in analisi è un compound di selezionati polimeri che si presenta in granuli semi-morbidi e flessibili, chiamato Superplast fornito dalla società ITERCHIMICA S.r.l. Sono aggiunti ai conglomerati bituminosi in cui sia necessaria una modifica della miscela per il miglioramento delle prestazioni meccaniche. L'uso dell'additivo Superplast provoca l'aumento della resistenza meccanica e del modulo complesso, la riduzione dell'accumulo delle deformazioni permanenti, indicando un miglioramento del comportamento a fatica.

Il dosaggio di questo additivo varia in funzione della modifica che si deve effettuare e dalle prestazioni meccaniche da raggiungere secondo le indicazioni descritte nel capitolato di riferimento. Si raccomanda un dosaggio pari al 4% sul peso del bitume.



Figura 3-3: Compound di polimeri confezionato in granuli semi-morbidi e flessibili

3.2 Programma di ricerca

Per arrivare agli obiettivi definiti prima, bisogna disegnare un adeguato programma sperimentale, descrivendo un elenco di fasi e di prove da seguire al fine di ottenere i risultati attesi.

Tramite un diagramma di flusso si è rappresentato il programma sperimentale scelto, al fine di rendere il più chiaro possibile l'ordine dei processi affrontati.

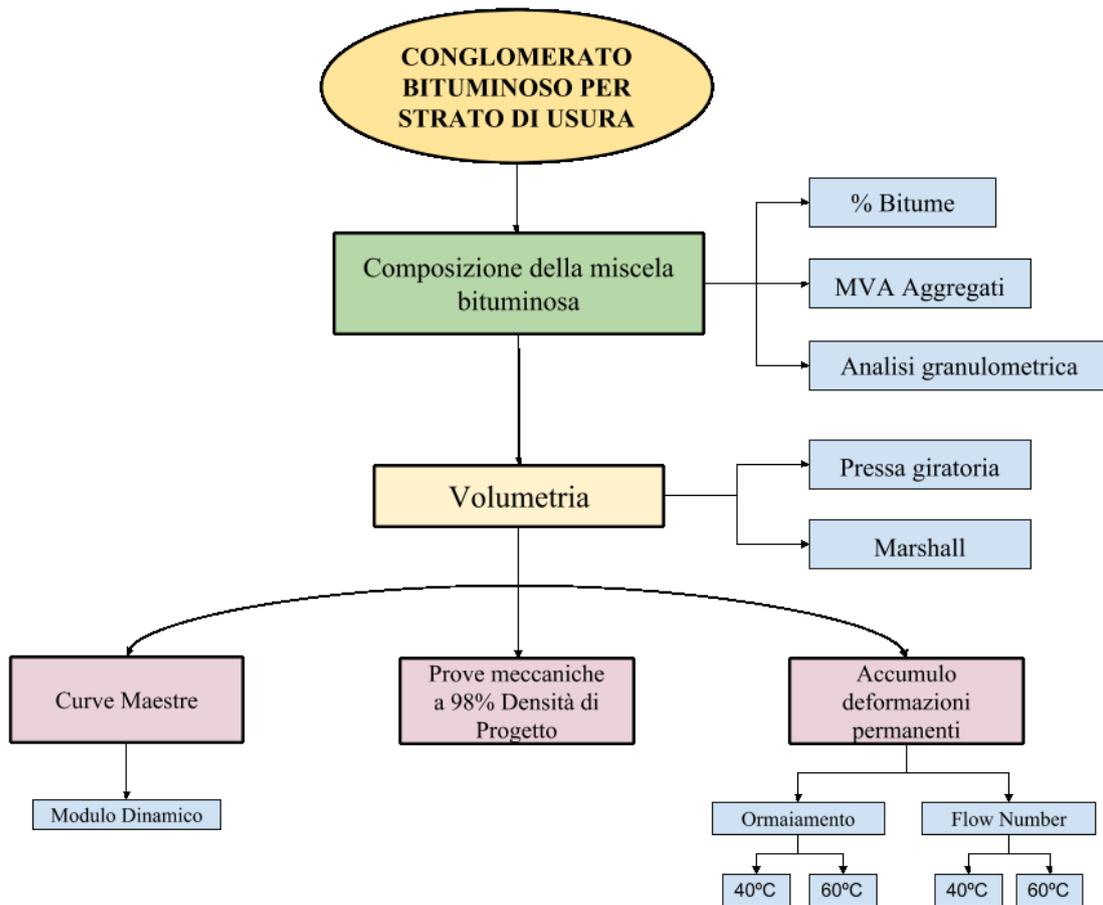


Figura 3-4: Diagramma di flusso del programma sperimentale

3.3 Strumentazione e attrezzature di laboratorio

3.3.1 Attrezzatura per analisi granulometrica di aggregati

Nello studio della composizione della miscela utilizzata, per ottenere le prestazioni granulometriche degli aggregati, è stato utilizzato una batteria di setacci diversi aprendo le maglie quadrate da 16 mm a 0,063 mm e quindi introducendo la serie di setacci in un meccanismo automatico che garantisce la rototraslazione con una durata di circa di 15 minuti, per dopo ottenere le proporzioni di ritenzione in ogni setaccio.



Figura 3-5: Colonna di setacci utilizzata

3.3.2 Picnometro

Il picnometro è un piccolo recipiente di vetro che ha un tappo dotato di capillare e un riferimento per definire il livello di liquido costante. Tale recipiente di vetro ha un volume compreso tra 500 ml e 5000 ml dove è usato per la determinazione della densità di un materiale. La densità, o massa volumica, è definita come rapporto tra la massa del campione e il volume dello stesso.



Figura 3-6: Picnometri

3.3.3 Carbolite

Il metodo dell'autocombustione sostituisce il sistema lungo e costoso dell'estrazione con solvente con salvaguardia della salute dell'operatore e dell'ambiente.

Questa apparecchiatura permette la determinazione automatica del contenuto di bitume nel conglomerato. Il sistema dell'autocombustione riduce il tempo di prova rispetto al metodo di estrazione con solvente. Per esempio, un campione di conglomerato bituminoso di circa 1800 grammi può essere testato in 30-45 minuti. Il forno prevede una scala interna che monitorizza automaticamente il peso del campione durante il processo di combustione con risparmio di tempo e aumento della produttività.

L'utilizzo del forno è di estrema semplicità, solo se deve inserire il campione, chiudere la porta e premere il pulsante "start". La prova dell'autocombustione si sviluppa in modo totalmente automatico, e al termine del ciclo il sistema si arresta stampando automaticamente i risultati della prova.



Figura 3-7: Carbolite



Figura 3-8: Cestello doppio che si utilizza nella Carbolite

3.3.4 Compattatore Marshall

Questa macchina compatta automaticamente e realizza la compattazione di conglomerati bituminosi caldi arrestandosi al numero di battute programmato, con il fine del confezionamento dei provini utilizzati per il calcolo della massa volumica della miscela di conglomerato e per la prova Marshall. L'effettuazione dell'operazione è facilmente impostata e monitorata sul visualizzatore digitale. Le parti in movimento sono protette dalle due portelle, aprendo le quali s'arresta la macchina. Il compattatore è fornito completo di basamento di legno. Inoltre, ci sono tre dispositivi di sicurezza che impediscono il sollevamento della mazza se la stessa non è nella corretta posizione.



Figura 3-9: Macchina di compattazione automatica per provini Marshall



Figura 3-10: Stampo Marshall completo di base e collare

3.3.5 Bagno termostatico per provini Marshall

Questi dispositivi sono utilizzati per la conservazione in acqua a 60 °C dei provini Marshall, come prescritto dalle norme. Sono disponibili in due diverse dimensioni e due diverse versioni: standard oppure con incorporato dispositivo di ricircolazione di acqua per una maggiore uniformità della temperatura, come prescritto dalla norma (UNI EN 12697-34).

Il bagno termostatico nel suo interno è costruito in acciaio inossidabile, con intercapedine di lana di roccia. Completo di griglia d'appoggio interna e coperchio. Inoltre, ha riscaldamento elettrico con resistenze a immersione.



Figura 3-11: Bagno termostatico per provini Marshall

3.3.6 French Rutting Tester

Il FRT (French Rutting Tester) è caratterizzato da uno pneumatico gonfiato a 600kPa che realizza 30.000 cicli su una lastra, compattata con compattatore a ruota pneumatica, alla quale trasmette un carico di circa 500 N con il fine di simulare l'effetto del traffico. Questa macchina genera risultati non attendibili per miscele con aggregati di diametro

superiore a 20 mm, perché la larghezza della lastra è relativamente piccola rispetto alla larghezza dello pneumatico, inoltre quella miscela provoca un deterioramento tale alla ruota da fare risultare la prova inattendibile.

Tale apparecchio si basa nella valutazione della profondità di deformazione di una miscela bituminosa sottoposta a cicli di passaggi di una ruota di gomma caricata in condizioni di temperatura costante e controllata. Il French Rutting Tester realizza la prova secondo la procedura specificata dalla norma UNI EN 12697-22.



Figura 3-12: French Rutting Tester-vista esterna della macchina



Figura 3-13: French Rutting Tester con lastra testata

3.3.7 Macchina Carotatrice

La macchina carotatrice da laboratorio è utilizzata per ottenere carote da campioni di conglomerato con roccia di forma irregolare. Questa apparecchiatura è fornita di un sistema di bloccaggio provino e un dispositivo di raffreddamento ad acqua con vaschetta di raccolta.



Figura 3-14: Macchina carotatrice

3.3.8 Pressa Giratoria

La pressa giratoria è una macchina impiegata per la compattazione dei conglomerati bituminosi. Questa macchina permette di preparare campioni cilindrici con caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante la compattazione dei rulli di cantiere. La pressa giratoria, secondo la normativa di riferimento UNI-EN 12697-31, è utilizzata per:

- determinare il volume dei vuoti di una miscela ad un numero di rotazioni stabilito.
- determinare una curva di addensamento in funzione del numero di rotazioni.
- confezionare campioni di una certa altezza, a una predeterminata densità, per dopo sottoporli a diverse prove per determinarne le caratteristiche meccaniche.

La miscela bituminosa è messa all'interno di una fustella cilindrica e sottoposta a una pressione costante, dove la direzione di applicazione risulta essere inclinata rispetto all'asse della fustella metallica. Inoltre, nel processo di compattazione, quest'ultima ruota attorno al proprio asse ad una velocità costante.

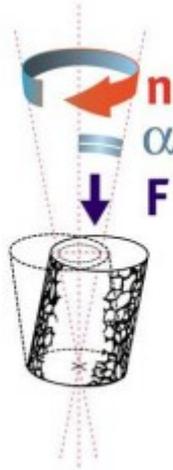


Figura 3-15: Sforzi cui è sottoposto il campione compattato con Pressa Giratoria

La compattazione giratoria determina una redistribuzione degli aggregati, costruendo nuove strutture granulari aventi una distribuzione di vuoti la cui forma e entità è analoga a quella che succede in sito.

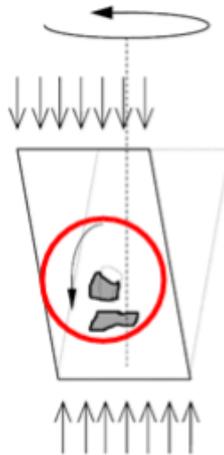


Figura 3-16: Compattazione tramite pressa giratoria



Figura 3-17: Fustella cilindrica metallica utilizzata per la compattazione con la Pressa Giratoria



Figura 3-18: Pressa a taglio giratorio



Figura 3-19: Estrazione del campione della fustella

3.3.9 Compattatore a lastre

La macchina compattatore è composta da una cella di carico che compatta il provino attraverso una ruota gommata. Di questa forma è possibile simulare la compattazione in situ eseguita dai più grandi rulli gommati sia sull'asse posteriore che anteriore.

Le macchine che utilizzano questo metodo usualmente sono in grado di fornire un carico massimo di 30 kN e sono progettate per funzionare sia in controllo di carico che di deformazione. Le lastre prodotte hanno dimensioni quadrate o rettangolari con uno spessore variabile tra 40 a 120 mm. Lo spessore viene impostato dall'utente o agendo meccanicamente su un dado di regolazione. In questo modo è possibile compattare una certa massa di conglomerato bituminoso alla densità obiettivo.



Figura 3-20: Compattatore con uso di pneumatico



Figura 3-21: Forma del cassero utilizzato per le lastre

3.3.10 Pressa statica

La pressa statica calcola in automatico la stabilità Marshall con correzione relativa all'altezza del provino, lo scorrimento e lo scorrimento tangenziale secondo le procedure delle norme EN. La macchina è collegata ad una cella di carico e al trasduttore che gestisce le prove, l'acquisizione, l'elaborazione, la visualizzazione e la memorizzazione dei dati per eventuale collegamento a PC. Il programma riceve i dati di prova (tempo, carico, spostamento) dalla macchina. I dati trasmessi sono raccolti in un file che si può aprire con applicativo di Windows per successiva elaborazione grafica.

La macchina è una struttura robusta a due colonne con motoriduttore che produce una velocità di salita del piatto di 50,8 mm/min. Il carico viene rilevato da una cella a estensimetri e lo scorrimento da un trasduttore lineare collocato esternamente.

Prestazioni principali:

- Carico massimo 50 kN
- Grande display grafico con visualizzazione in tempo reale
- Alta risoluzione: 130000 punti
- Ampia memoria permanente
- Uscita RS 232 per collegamento a PC
- Software disponibili per elaborazione dati, stampa certificati e archiviazione



Figura 3-22: Pressa attrezzata per prova Marshall



Figura 3-23: Testa di rottura per provini

3.3.11 Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

L' AMPT è una macchina di prova servo-idraulica, progettata appositamente per eseguire le tre tipologie di test previste della National Cooperative Highway Research Program (NCHRP): modulo dinamico, carico assiale ripetuto (Flow Number) e creep statico (Flow Time). Inoltre, tale apparecchiatura può eseguire la prova di trazione diretta ciclica a fatica, modulo dinamico con prova di trazione indiretta, deformazione permanente con prova di carico ciclico e prova a flessione su provino semicircolare.

La macchina comprende un sistema idraulico di carico, azionato elettricamente, un sistema di pressurizzazione confinata, una camera climatizzata e un'adeguata unità di controllo. La cella climatizzata è anche utilizzata come cella triassiale. Il sistema è controllato da una PC, utilizzando sensori per la retroazione dei segnali di carico e pressione di confinamento. Sensori addizionali sono utilizzati per funzioni pseudoretroattive. Il sistema di confinamento e la cella climatica fanno parte della cella triassiale, configurata per alloggiare internamente la strumentazione. Durante la prova, il sistema raccoglie i dati dei trasduttori collegati al provino, li elabora e visualizza in tempo reale sul PC, secondo le modalità di prove impostate.



Figura 3-24: Asphalt Mixture Performance Tester

3.4 Le prove di laboratorio

Il materiale impiegato, prodotto in impianto, appena arrivato è stato sottoposto a un'analisi compositiva e volumetrica. Nel caso dell'analisi di composizione si ha determinato il percentuale di bitume ed è stato fatto l'analisi granulometrica sugli aggregati. In riferimento a la parte volumetrica, si ha deciso di utilizzare per la caratterizzazione meccanica quello che normalmente viene riportato nel capitolato, una densità pari a 98% della densità di progetto. Si ha fatto una curva di compattazione a 180 giri dove abbiamo visto come variava l'evoluzione dei vuoti. Da questo punto si è partito con le prove meccaniche.

3.4.1 Determinazione della massa volumica massima (TMD)

Come primo compito si calcola la massima massa volumica del conglomerato bituminoso di studio non compattato e nelle condizioni di addensamento limite, corrispondenti all'assenza di vuoti residui. Questo valore rappresenta la massa volumica degli aggregati rivestiti del film di bitume che ha la funzione di legante. Quella è definita anche teorica perché, nella pratica, non è effettivamente raggiungibile.

Questa procedura è stata realizzata sia per l'aggregato usato nel mix design, che per la miscela di conglomerato bituminoso. Nel caso degli aggregati si è stata eseguita in

conformità con la norma UNI EN 1097-6, mentre per la miscela bituminosa con la normativa UNI EN 12697-5. In entrambi i casi la procedura sperimentale è analoga.

Facendo riferimento al caso della miscela di conglomerato bituminoso come primo passo è stato introdotto all'interno di un picnometro di vetro graduato 500 g di miscela bituminosa, precedentemente riscaldato a 150°C e dopo distribuito manualmente in grani. Successivamente si versa l'acqua distillata, precedentemente disaerata, nel picnometro e lo si collega a una pompa di aspirazione d'aria. Lo strumento con il materiale e l'acqua è lasciato a riposo per 45 minuti e delicatamente scosso ogni 15 minuti per far sì che non vi siano bolle d'aria.



Figura 3-25: Materiale bituminoso distribuito manualmente in grani



Figura 3-26: Picnometro riempito con miscela ed acqua distillate e collegato alla pompa

Il picnometro si deve pesare in tutte le fasi di prova:

- vuoto e asciutto
- dopo aver inserito il materiale
- finalmente, aggiungendo un tappo di vetro avente una cannula sporgente, riempito d'acqua distillata fino alla tacca graduata.

Alla fine, si misura con un termometro la temperatura dell'acqua.

La massa volumica massima della miscela bituminosa viene espressa in [kg/m³] e è calcolata attraverso la seguente formula:

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

Equazione 3-1: Calcolo della massa volumica massima

Dove:

m_1 = massa picnometro

m_2 = massa picnometro + materiale

m_3 = massa del picnometro + materiale + acqua

V_p = volume del picnometro

ρ_w = massa volumica acqua alla temperatura di prova in [kg/m³]

3.4.2 Prova Carbolite

Nella miscela di conglomerato bituminoso si deve verificare che la distribuzione degli aggregati corrisponda a quella di progetto, ma prima si deve estrarre il contenuto di bitume presente nella miscela. Per questo compito viene eseguita la prova di Carbolite.

La procedura viene eseguita seguendo la normativa UNI EN 12697-39 e consiste nel collocare all'interno di un cestello di acciaio, dotato di due ripiani sovrapposti per consentire un'omogenea divisione del materiale, un quantitativo di miscela bituminosa.

Nella normativa viene prescritta la quantità di materiale da disporre all'interno del cestello. Nella seguente tabella vengono riportati tali valori con rispetto alle dimensioni degli aggregati.

Nominal maximum aggregate size [mm]	Mass of sample [g]	Maximum constant mass limit [g]
4	1000 to 1400	0,15
5,6 or 6,3 or 8 or 10	1000 to 1600	0,15
11,2 or 12,5 or 14 or 16	1000 to 1700	0,20
20 or 22,4	1000 to 2400	0,25
31,5	1000 to 3000	0,30
40 or 45	1000 to 4000	0,40

Tabella 3-4: Quantità di materiale prescritto dalla normativa

La miscela bituminosa viene divisa in 4 porzioni uguali il più omogeneo possibile, di questi sono selezionati solo due che sono, successivamente, messi all'interno del cestello.

Una volta che il materiale è stato messo nel cestello, quello viene introdotto nella Carbolite. Tale apparecchiatura si trova alla temperatura di 540°C e viene fornita di una bilancia capace di monitorare le variazioni di peso subite dal campione durante il processo di combustione. La durata della prova è di circa 20 minuti ovvero quando la bilancia non registra più variazione di massa.

Nella seguente figura è possibile vedere il risultato del campione dopo il processo di combustione.



Figura 3-27: Risultato del materiale dopo il processo di combustione

Quando la prova finisce, il materiale si estrae dalla Carbolite, si lascia raffreddare e poi si pesa.

Successivamente si procede al calcolo della % di bitume della miscela bituminosa rispetto alla massa degli aggregati utilizzando la seguente espressione:

$$\%B = \frac{\left(1 - \frac{0.3}{100}\right) [(M_i - T) - (M_f - T)]}{(M_f - T)} \times 100$$

Equazione 3-2: Calcolo di % Bitume della miscela rispetto alla massa degli aggregati

Dove:

M_i = massa del campione prima del processo di combustione [gr]

M_f = massa del campione dopo la prova di combustione [gr]

T = tara del cestello [gr].

3.4.3 Distribuzione delle dimensioni degli aggregati

La distribuzione delle dimensioni degli aggregati rappresenta il metodo di misurazione delle dimensioni delle particelle. L'analisi granulometrica è stata realizzata seguendo i riferimenti della normativa UNI EN 12697-2. Precedentemente dell'inizio della misurazione, gli aggregati dopo essere estratti dalla Carbolite devono essere raffreddati fino al raggiungimento di una massa costante. Una volta che il materiale è libero di bitume, deve essere lavato utilizzando, allo scopo di separare il fine dall'aggregato più grosso, due setacci le cui dimensioni delle aperture sono 2 e 0,063 mm, impilati l'uno sull'altro. Il lavaggio si deve continuare fino a quando l'acqua uscente dai pori del setaccio inferiore è limpida.



Figura 3-28: Lavaggio degli aggregati post Carbolite impiegando setacci 2 e 0.063 mm

Successivamente il materiale viene essiccato per mezzo di un forno, controllato per mantenere una temperatura di 110 ± 5 ° C. Dopo, l'aggregato freddo deve essere miscelato in modo uniforme con il fine di essere omogeneizzato. Il materiale viene inserito all'interno della colonna di setacci, introducendolo attentamente per evitare di perdere materiale al di fuori della pila dei setacci. Il test ha l'obiettivo di dividere il materiale in particelle con una dimensione specifica. Il setaccio consiste in un recipiente in cui la parte inferiore ha uno schermo metallico per filtrare le particelle superiori alla dimensione della maglia.

Una volta organizzati i setacci e introdotto il materiale di analisi, la colonna di setacci viene coperta e portata alla macchina dove la setacciatura viene eseguita automaticamente per circa 15 minuti. Quindi viene rimossa la pila, disarmata e ogni setaccio viene pesato con il materiale trattenuto. Questo lavoro permette ottenere il valore del materiale trattenuto e dalla conoscenza del peso del setaccio, il valore del passaggio può essere calcolato.



Figura 3-29: Pila di setacci in un agitatore meccanico

Nella seguente tabella sono riportati i pesi dei setacci utilizzati per l'analisi granulometrica. Le diverse aperture dei setacci sono stabilizzate dalla normativa.

Setaccio [mm]	16	14	12.5	10	8	6.3	4	2	1	0.50	0.250	0.125	0.063
Peso [gr]	1303.8	1058.2	1053.9	1029.6	1073.3	1054.7	1110.0	975.9	866.6	784.0	726.6	800.2	772.9

Tabella 3-5: Dimensione e Peso dei setacci

Procedura per il calcolo del passante progressivo (P_i):

$$m_i = \text{peso lordo}_i - \text{tara}_i$$

$$t_i = \frac{100 \times m_i}{M}$$

Dove: $M = \sum m_i$

Conosciuto l'iesimo trattenuto percentuale, si può calcolare il trattenuto progressivo sulla colonna (T_i), il cui complemento a 100 fornisce il passante progressivo (P_i).

$$T_i = T_{i-1} + t_i$$

$$P_i = 100 - T_i$$

Con i valori ottenuti (P_i) e le dimensioni di apertura dei setacci, è possibile fare un grafico semilogaritmico e nel quale costruire la curva granulometrica de la miscela bituminosa.

3.4.4 Prova Marshall

3.4.4.1 Confezionamento dei provini

Per ogni provino bisogna disporre 1220 gr di miscela, necessario per ottenere provini di altezza rientrante nei valori previsti dalla norma ($63,5 \pm 3,2$ mm), che verrà poi posta in forno alla temperatura di 150°C per un periodo di almeno due ore oppure fino a quando la miscela raggiunge 150°C .

Una volta riscaldata la miscela, essa deve essere prelevata dal forno e collocata all'interno di un apposito stampo, anch'esse scaldate in forno alla stessa temperatura, che entra dentro del compattatore automatico Marshall.

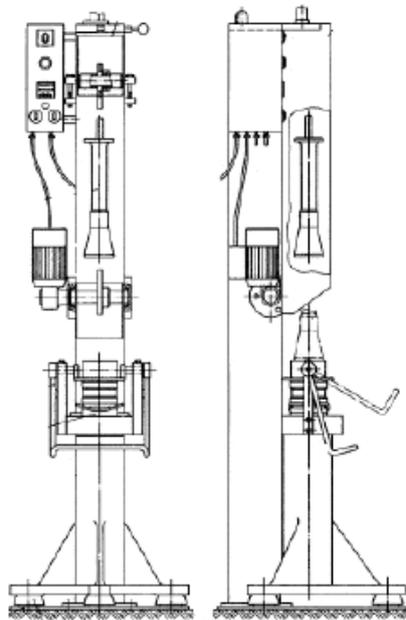


Figura 3-30: Compattatore Marshall

Posizionato lo stampo all'interno della macchina, sopra la base del compattatore, si procede bloccandolo con un sistema di chiusura ad eccentricità indispensabile a garantire una compattazione centrata. Dopo aver controllato la corretta posizione dello stampo, si imposta l'apparato di base sbloccando la massa scorrevole e impostando il conta-impatti a 75 colpi. Al termine di questo procedimento, si può procedere con la compattazione.

Al termine dei 75 colpi, si estrae il provino dal compattatore Marshall e si ripete tutta la procedura facendo in modo tale che l'altra faccia del provino riceva lo stesso numero di colpi. In questo modo, il martello colpisce 150 volte in totale sul provino, conducendo a una compattazione standardizzata.

Alla fine della compattazione, il provino si deve lasciare raffreddare per 24 ore fino al raggiungimento della temperatura ambiente. Dopo il campione può essere estratto dallo stampo di base con l'impiego di una pressa idraulica che imporre al provino un cedimento monodirezionale senza deformazioni. Una volta estratto, è lasciato riposare su una superficie orizzontale e liscia e poi si misura l'altezza del provino per verificare che essa ricade all'interno dell'intervallo stabilito dalla norma.



Figura 3-31: Provino Marshall

3.4.4.2 Stabilità e Rigidezza Marshall

La prova Marshall misura le proprietà meccaniche empiriche, in termini di stabilità e scorrimento, di miscele bituminose confezionate a caldo, sottomettendo a rottura in condizioni di prova standardizzate provini cilindrici di diametro di 101,6 mm e altezza pari a $63,5 \pm 3,2$ mm fabbricati mediante il compattatore Marshall.

Si indica come stabilità Marshall il carico massimo di rottura del provino espressa in kN e come scorrimento Marshall, espresso in mm, lo schiacciamento verticale subito dal provino in corrispondenza del carico di rottura. Dal rapporto tra la stabilità e lo scorrimento si ottiene la rigidezza Marshall, che si esprime in kN/mm.

L'apparecchio utilizzato per la realizzazione di tale prova è una pressa la quale è dotata di un sistema di misura formato da una cella di carico che ricava la forza applicata sulle ganasce, e da un dispositivo che consente di registrare l'avvicinamento tra le ganasce.

Per l'effettuazione della prova è necessario l'utilizzo di un bagno termostatico all'interno della quale il provino, prima dell'esecuzione della prova, deve essere immerso per una ora per essere condizionato alla temperatura di prova di 60°C.

Successivamente al condizionamento in acqua, i provini sono portati a rottura dove vengono determinate stabilità, scorrimento e rigidezza.

I parametri che si determinano con la prova Marshall danno un'idea della resistenza, offerta dalla miscela di conglomerato bituminoso, a deformarsi e a disgregarsi sotto l'azione dei carichi dovuti al traffico.

Il valore della stabilità viene influenzato dall'altezza del provino, lo quale è importante sottolineare già che deve rientrare nell'intervallo richiamato in precedenza. In base a quello si deve applicare al valore di stabilità un fattore moltiplicativo di correzione c , calcolato come:

$$c = 5.2 * e^{-0,0258*h}$$

Equazione 3-3: Fattore di correzione applicato al valore di stabilità



Figura 3-32: Provini testati con pressa statica

3.4.4.3 Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui

Una volta terminata la compattazione dei provini con il compattatore Marshall, è possibile proseguire alla determinazione della massa volumica apparente (MMVA) per ottenere dopo il volume dei vuoti presente nei provini.

La massa volumica massima (TMD) è stata calcolata mediante la procedura del picnometro spiegato previamente, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa a una temperatura determinata di prova. Nel caso della massa volumica apparente cioè, la massa per unità di volume, si determina con la pesata idrostatica inclusi i vuoti d'aria ad una nota temperatura di prova del provino in analisi. La procedura per la sua determinazione è descritta dalla norma UNI EN 12697-6.

I campioni confezionati sono stati pesati uno ad uno per ottenere la massa a secco (m_{aria}). Dopo di quello, sono stati immersi in un contenitore pieno di acqua per 45 minuti, scuotendoli e girandoli di tanto in tanto per facilitare la fuoriuscita delle bolle d'aria.

Il seguente passo consiste nel pesare i singoli campioni nel bagno d'acqua con bilancia, collegata a un gancio all'interno della quale collocare il provino, per ottenere il valore di (m_{acqua}). In seguito, si estrae il provino dall'acqua, si gli asciuga nella sua superficie e lo si pesa di nuovo ricavando così la massa umida del provino stesso (m_{SSD}). Inoltre, è necessario conoscere la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova in cui viene immerso il provino durante la pesata stessa.



Figura 3-33: Provini immersi in acqua

Mediante la seguente relazione è possibile determinare la massa volumica apparente espressa in [kg/m³]:

$$\rho_{SSD} = \frac{m_{aria}}{m_{SSD} - m_{acqua}} \times \rho_w$$

Equazione 3-4: Formula per calcolo della massa volumica apparente

Dove:

ρ_{SSD} : massa volumica apparente [kg/m³]

m_{aria} : massa del provino asciutto [gr]

m_{acqua} : massa del provino in acqua [gr]

m_{SSD} : massa del provino saturato con la superficie asciutta [gr]

ρ_w : massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [kg/m³].

Il contenuto di vuoti residui dei provini compattati è calcolato in base allo indicato dalla normativa UNI EN 12697-8:

$$V = \frac{\rho_{mw} - \rho_{SSD}}{\rho_{mw}} \times 100$$

Equazione 3-5: Formula per il calcolo del contenuto dei vuoti in un provino

Dove:

V : contenuto dei vuoti residui [%]

ρ_{mw} : massa volumica massima della miscela [kg/m³]

ρ_{SSD} : massa volumica apparente totale della miscela [kg/m³].

3.4.5 Pressa giratoria

La compattazione con pressa giratoria è molto impiegata per studiare le caratteristiche volumetriche, la lavorabilità e l'addensamento del conglomerato bituminoso.

La strumentazione che forma parte della pressa a taglio giratoria è in grado di esercitare sul materiale una pressione verticale e un moto rotatorio intorno a un asse inclinato rispetto alla verticale. Tali movimenti in combinazione svolgono un'azione impastante sul materiale, conferendogli un grado di addensamento che simula quello realizzato in opera con rulli. Gli elementi che fanno parte di questa macchina sono pressa, fustelle cilindriche e relativi coperchi.

Le caratteristiche della macchina impiegata sono le seguenti:

- ✓ Inclinazione di $\varphi = 1,25^\circ$ rispetto la verticale
- ✓ 180 giri con velocità di rotazione pari a 30 giri/min
- ✓ Pressione verticale costante di 600 kPa per la durata della compattazione
- ✓ Dispone di due tipi di fustelle cilindriche per il confezionamento di campioni di diametro differenti, una da 100 mm e una da 150 mm.

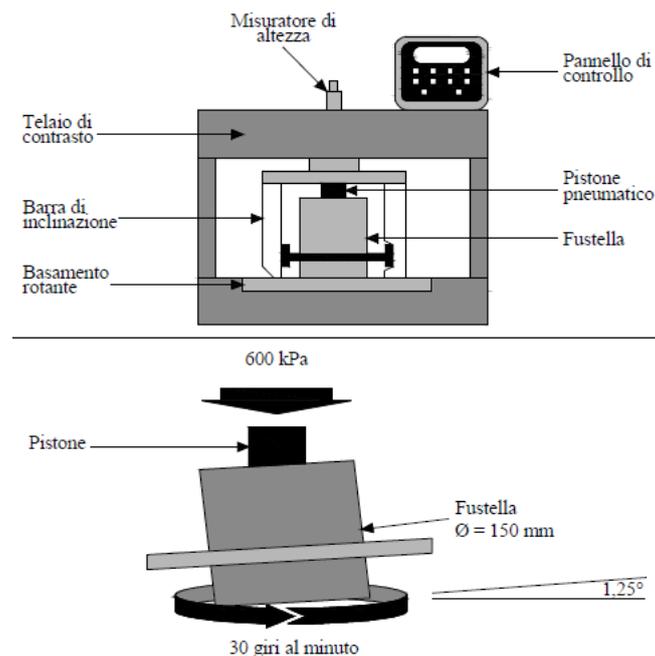


Figura 3-34: Schematizzazione del funzionamento della pressa giratoria

Grazie alla connessione con un computer è possibile monitorare l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro. Tali risultati sono visualizzati durante la realizzazione della prova e poi, salvati per una prossima elaborazione.

VS01	Blend 1			Blend 2			Blend 3			Blend 4		
Gyration Number	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
0	203.5											
1	197.2											
2	193.6											
3	191.0											
4	188.8											
5	187.1											
6	185.6											
7	184.4											
8	183.2											
9	182.2											
10	181.3											
11	180.5											
12	179.7											
13	179.1											
14	178.4											

Figura 3-35: Schermata del programma di controllo per la compattazione con pressa giratoria

3.4.5.1 Confezionamento dei campioni

Per realizzare i provini è necessario, prima di tutto, calcolare la massa di materiale da introdurre all'interno della fustella. La quantità di materiale si calcola mediante la seguente relazione, dove quella è in funzione del volume e della massa volumica massima (TMD) della miscela.

$$M = 10^{-9} \times \pi \times \frac{d^2}{4} \times h_{min} \times TMD$$

Equazione 3-6: Calcolo della quantità di materiale a inserire nella fustella cilindrica

Dove:

M = quantità di materiale da inserire nella fustella [Kg]

d = 100 diametro del provino [mm]

h_{min} = 67 altezza imposta [mm]

TMD = massa volumica massima [Kg/m³]

Una volta conosciuta la quantità di materiale, si deve riscaldare il materiale in forno per al meno 2 ore o fino a quando il materiale raggiunge la temperatura di 150 °C. Inoltre, nel forno, si devono inserire la fustella, il coperchio e il fondo della fustella per essere riscaldati anche a 150°C.

Una volta che il materiale ha raggiunto la temperatura di compattazione viene inserito all'interno della fustella, in precedenza e dopo di versare la miscela si deve inserire due filtri di carta per evitare il contatto diretto con i piatti. Successivamente si posiziona la

fustella nella camera di compattazione e si richiude la porta di protezione. La miscela è stata compattata alla temperatura di 150°C.

Raggiunti i giri o l'altezza di compattazione imposta, la pressa si ferma consentendo di estrarre la fustella e metterla nell'estrusore che, tramite un pistone azionato manualmente, consente di sfilare il provino dalla stessa.



Figura 3-36: Estrusore che permette sfilare il campione dalla fustella

Estratti i campioni dalla fustella, si tolgono i piatti e i filtri di carta a contatto con il campione e sono lasciati raffreddare a temperatura ambiente per 24 ore. Al giorno dopo della compattazione i campioni sono pesati, misurati ricavando altezza e diametro medi e introducendo il nome a ognuno di essi.

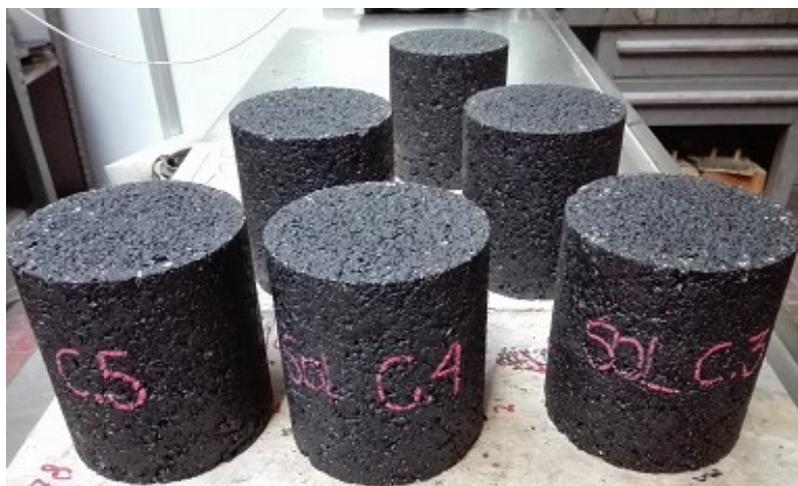


Figura 3-37: Campioni confezionati con pressa giratoria e contrassegnati

3.4.5.2 *Lavorabilità e addensamento della miscela*

La macchina è dotata di sensori che permettono di registrare in ogni fase della compattazione certe caratteristiche volumetriche della miscela, in funzione del numero di giri essa dà i valori di altezza del provino, densità, taglio e grado di compattazione. Tali risultati sono utilizzati per ottenere le curve di compattazione, che si raggiungono riportando su un grafico logaritmico il numero di giri in ascissa e il grado di addensamento in ordinata.

Il grado di addensamento calcolato a ogni giro del processo di compattazione in base al peso e all'altezza del campione è chiamato C_{ux} . Questo valore a un determinato numero di giri "x" è calcolato come percentuale della massima massa volumica teorica del conglomerato bituminoso mediante la seguente formula:

$$C_{ux} = \frac{100}{TMD} \times \frac{M_{inserita}}{V_{mx}}$$

Equazione 3-7: Grado di addensamento calcolato ad ogni giro del processo di compattazione

Dove:

V_{mx} = volume del campione a "x" giri [cm³]

$$V_{mx} = \pi \times \frac{d^2}{4} \times h_x$$

Equazione 3-8: Volume del campione a "x" giri

$M_{inserita}$ = massa inserita nella fustella [gr]

TMD = massima massa volumica del conglomerato bituminoso [gr/cm³]

d = diametro del campione [cm]

h_x = altezza del campione a "x" giri [cm].

Al fine del processo di compattazione è possibile misurare la massa volumica del campione, che si utilizza per correggere il valore di C_{ux} . La correzione si realizza usando la seguente formula:

$$C_x = \frac{C_{ux} \times TMD \times V_{mm}}{M_{inserita}}$$

Equazione 3-9: Calcolo per correggere il valore di C_{ux}

Dove:

C_x = grado di compattazione corretto espresso come percentuale della massima massa volumica teorica [%].

V_{mm} = volume del campione calcolato al massimo numero di giri [cm³].

Da tale valore è possibile ottenere il contenuto dei vuoti V_x relativi al numero di giri N_i prescelti, tramite l'espressione:

$$V_x = 100 - C_x$$

Equazione 3-10: Contenuto dei vuoti relativi al numero di giri

La relazione analitica che associa i parametri di compattazione è assimilabile a una retta con la seguente espressione:

$$C = C_1 + k \times \log(N)$$

Equazione 3-11: Equazione di retta che associa i parametri di compattazione

Dove:

C_1 = auto-addensamento della miscela.

k = lavorabilità della miscela, cioè la capacità della miscela di compattarsi e deformarsi sotto l'azione di una forza.

C = grado di costipamento [%].

N = numero di giri.

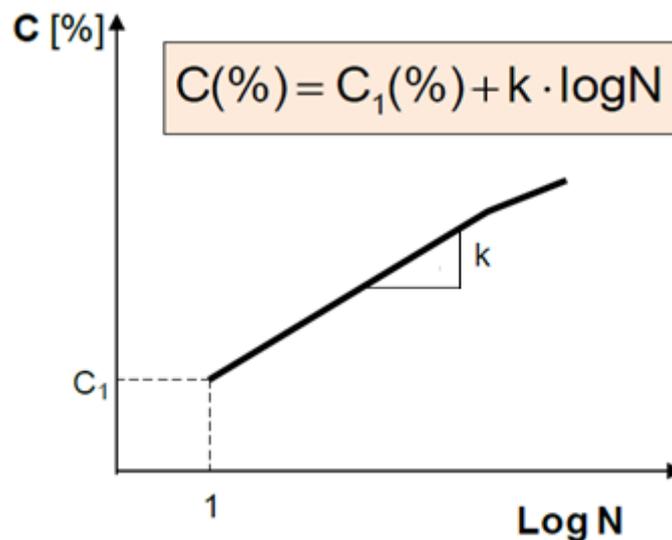


Figura 3-38: Curva di compattazione per campioni sottoposti a compattazione giratoria

Dall'analisi della curva di compattazione si derivano due parametri che esprimono in maniera quantitativa la lavorabilità e l'auto-addensamento della miscela. In riferimento al primo, la pendenza (k) della curva di compattazione fornisce tale valore, e la sua ordinata d'origine (C_1) dà l'auto-addensamento.

Tali parametri sono stati determinati mediante regressione lineare dalle curve di compattazione di ciascun campione.

L'auto-addensamento è collegata alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento. Inoltre, quello varia con il valore di attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati.

La lavorabilità, invece, dipende dalle caratteristiche e dal contenuto di bitume e è associata alla viscosità della miscela.

3.4.5.3 Determinazione della massa volumica e del contenuto dei vuoti residui

Dopo la compattazione dei campioni con la pressa giratoria, si prosegue alla determinazione della massa volumica apparente per conseguire il volume dei vuoti presente nei campioni.

Per mezzo della pesata idrostatica si ottiene la massa volumica apparente, cioè la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria a una temperatura determinata di prova, del campione in considerazione.

Come primo passo del procedimento, i campioni sono stati pesati per ottenere la massa a secco dopo 24 ore di essere compattati. Successivamente sono stati immersi in un contenitore contenenti acqua per un'ora, scuotendoli e girandoli di tanto in tanto per aiutare la fuoriuscita delle bolle d'aria.



Figura 3-39: Campione a bagno nell'acqua

Il passo successivo consiste nel pesare i singoli campioni in un bagno d'acqua con bilancia, collegata ad un gancio all'interno della quale collocare il campione. Successivamente si deve misurare la temperatura dell'acqua, già che è necessario conoscere la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova in cui viene immerso il campione durante la pesata stessa.



Figura 3-40: Bilancia con la quale viene effettuata la pesata idrostatica del campione

In seguito, si deve ricavare la massa umida del campione quindi si estrae il provino dall'acqua e lo si pesa di nuovo previa asciugatura della sua superficie.

Una volta ricavati i parametri, è possibile determinare il volume del campione, e quindi anche la massa volumica apparente cercata.

Per determinare la massa volumica apparente e trovare il relativo indice dei vuoti dei campioni confezionati con la pressa giratoria, si esegue lo stesso procedimento spiegato previamente per i provini confezionati con il compattatore Marshall.

3.4.6 Compattatore a lastre

Tramite la compattazione con il compattatore a lastre, si riescono a ottenere le stesse caratteristiche ottenibili mediante pressa giratoria, comunque tale metodo di compattazione riesce a simulare in maniera più efficiente la compattazione che subisce il conglomerato bituminoso in sito in termini di grado di addensamento, spessore e percentuale dei vuoti.

3.4.6.1 Procedura di compattazione delle lastre

L'apparato usato in laboratorio è dotato di una ruota gommata che si muove sul campione a velocità costante. Il passaggio ripetuto e continuo su ogni punto della lastra e la corretta pressione di gonfiaggio della gomma conducono a una compattazione uniforme ed omogenea.

Il conglomerato bituminoso deve essere inizialmente scaldato assieme al cassero a 150°C per almeno 2 ore o fino a raggiungere la temperatura di compattazione adatta.

La massa M in kg del conglomerato bituminoso, che deve essere introdotta nel cassero, è funzione della massima densità TMD in kg/m^3 del conglomerato, della lunghezza, la larghezza, lo spessore della lastra e dell'indice dei vuoti v in % tramite la seguente relazione:

$$M = 10^{-6} \cdot L \cdot l \cdot s \cdot \left(TMD \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{obiettivo}}}{100} \right) \right) \cdot 0.98$$

Equazione 3-12: Calcolo di miscela bituminosa a inserire nel cassero

Dove:

L : lunghezza cassero [mm]

l : larghezza cassero [mm]

s : spessore definito della lastra [mm]

TMD : massima massa volumica del materiale [kg/m^3]

$V_{\text{obiettivo}}$: indice dei vuoti [%]

L'indice dei vuoti desiderato è pari al 4.9 %, nel caso dello spessore desiderato delle lastre è di 50 mm. Le dimensioni del cassero sono fissate e conformi alla norma, 500 mm x 180 mm. Pertanto, le lastre dovrebbero avere un volume di 4500 cm^3 .

Raggiunta la temperatura ottimale, si rimuove il cassero dal forno e si colloca nella macchina compattatrice. Poi, si unge di grasso tutta la superficie interna dello stesso e si pone un foglio di carta sulla base, così da facilitare il distacco della lastra compattata dal piano di appoggio dopo il suo raffreddamento. Successivamente si introduce il materiale preriscaldato, fino a raggiungere la quantità calcolata, avendo massima attenzione di disporre lo stesso nel modo più uniforme possibile lungo tutto lo spazio disponibile. Dopo, si devono porre le due aste di metallo lungo i due lati del cassero per finire la procedura di preparazione del materiale.

Dal pannello di controllo è possibile impostare le caratteristiche della prova da effettuarsi. Si introducono i parametri di prova quali carico iniziale e finale, aumento di carico e/o deformazione per ciclo, numero massimo di cicli e spessore finale della lastra desiderata.



Figura 3-41: Pannello di controllo di compattatore a lastre

Nella compattazione, nei primi dieci cicli, il materiale introdotto all'interno del cassero non è in grado di opporre resistenza allo schiacciamento indotto dalla ruota. I valori di carico registrati sono prossimi allo zero e addirittura in alcuni punti del provino negativi. Anche l'andamento degli abbassamenti risulta essere fluttuante, segno di una parziale redistribuzione del materiale all'interno del cassero. Nei cicli seguenti si registra invece un aumento del carico e anche gli abbassamenti di spessore diventano più significativi.

Per questa ragione si è scelto di adottare una prima fase di precompattazione per il livellamento del materiale della durata di circa 10 cicli. Invece, la seconda fase rappresenta la compattazione vera propria con un carico costante di 17 kN e numero massimo di cicli pari a 15, come prescrive la norma. Tale valore di carico, peraltro, è molto prossimo al limite macchina di 20 kN.

Una volta prodotta tale lastra, si la lascia raffreddare almeno 24 ore dalla prova. Successivamente utilizzando piccoli scalpelli, si rimuove il conglomerato compattato dal cassero di base e si elimina i residui di carta dalla lastra realizzata. In seguito, si deve misurare l'indice dei vuoti e se questo risulta non conforme al vincolo imposto prima, occorre realizzare una nuova prova, questa volta inserendo nel cassero una massa diversa, una massa corretta calcolata della seguente maniera:

$$M_{corretta} = M + M_{correzione}$$

$$M_{corretta} = 10^{-6} \cdot L \cdot l \cdot s \cdot \left(TMD \cdot \left(\frac{100 - V_{obiettivo}}{100} + \frac{V_{reale} - V_{obiettivo}}{100} \right) \right) \cdot 0.98$$

Equazione 3-13: Massa corretta per raggiungere i valori di vuoti desiderati

Se $\%V_{reale} = \%V_{obiettivo} \pm 0,5\%$ e se $h_{reale} = h_{obiettivo} \pm 2$ mm, siamo dentro i valori desiderati. Altrimenti, dobbiamo fare una correzione della massa applicando l'equazione spiegata prima.



Figura 3-42: Lastra compattata

3.4.6.2 Determinazione del contenuto dei vuoti geometrici

Una volta che la lastra è stata rimossa del cassero, l'altezza viene misurata in diverse parti usando il calibro. L'altezza della lastra su uno dei lati lunghi è misurata in 5 punti diversi e 3 punti sono misurati sul lato corto della lastra. La stessa procedura viene eseguita per gli altri due lati, ottenendo un'altezza media dei 16 valori misurati. Inoltre, le dimensioni della lastra vengono controllate misurando i lati con un centimetro.



Figura 3-43: Calibro e centimetro per misurare le dimensioni della lastra

Successivamente la lastra viene pesata per ottenere la massa a secco. Una volta che tutti questi valori sono stati raccolti, il contenuto dei vuoti geometrici della lastra può essere calcolato considerando la massa volumica massima (TMD) della miscela bituminosa studiata e le dimensioni della lastra. Con le seguenti espressioni è possibile calcolare tale valore:

$$\rho_{geo, reale} = \frac{m_{reale}}{L \cdot l \cdot h_{media}}$$

$$V_{geo, reale} = \frac{(TMD - \rho_{geo, reale})}{TMD} \times 100$$

Equazione 3-14: Contenuto di vuoti geometrici della lastra

Dove:

m_{reale} : massa della lastra asciutta [Kg]

L : lunghezza della lastra [m]

l : larghezza della lastra [m]

h_{media} : altezza media della lastra calcolata con i 16 valori misurati [m]

$\rho_{geo, reale}$: massa volumica geometrica della lastra [Kg/m³]

TMD : massa volumica massima della miscela bituminosa [Kg/m³]

$V_{geo, reale}$: indice di vuoti geometrici [%]

3.4.7 Wheel Tracking Test

Le lastre di conglomerato bituminoso sono utilizzate per essere sottoposte a prove di ormaimento attraverso una macchina chiamata Wheel Tracking Test. Questa apparecchiatura fornisce una misura della deformazione subita dalla lastra sottoposta al rotolamento ciclico di una ruota su cui agisce un carico assiale.

Questa prova si effettua per determinare la tendenza a deformarsi sotto carico dei conglomerati bituminosi ed è applicabile a miscele aventi dimensioni degli aggregati ≤ 32 mm e a lastre confezionati in laboratorio o prelevati in situ.

La deformabilità dei materiali viene testata attraverso il passaggio ripetuto di una ruota caricata a temperatura costante. La procedura può essere realizzata su dispositivi aventi tre differenti dimensioni: large, extra-large e small. Nei primi due casi i campioni sono condizionati in aria durante il test, per quanto riguarda i dispositivi piccoli, invece, i provini possono essere condizionati sia in aria che in acqua e, a differenza degli altri dispositivi, la procedura di condizionamento viene effettuata prima di iniziare la prova.

Il Wheel Tracking Test viene fatto seguendo le istruzioni della normativa europea (EN 12697-22:2003 Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Wheel tracking).

Nel caso di studio si è impiegato un dispositivo di taglia grande con dimensioni interne di (500x180x50) mm. L'apparato di wheel-tracking consiste in una ruota dotata di uno pneumatico 400 x 8 con una larghezza della carreggiata di (80 ± 5) mm. La pressione dello pneumatico deve essere (600 ± 30) kPa. Il carico rotolante applicato al provino deve essere di (5000 ± 50) N al centro dello stesso, misurato almeno quando il dispositivo è statico. La linea centrale della pista dello pneumatico non deve trovarsi a più di 5 mm dal centro teorico del campione di prova.

Per effettuare il test si deve preparare la lastra di conglomerato bituminoso, confezionata con la metodologia spiegata nel precedente paragrafo, mettendola nel cassero in cui è stato compattata e poi regolando l'altezza di ciascun appoggio stringendo o allentando le viti presenti su di esso con una chiave inglese. Una volta terminata quest'operazione è necessario eseguire sulla lastra, con un trapano, un foro per l'inserimento della sonda che permette di rilevare la temperatura di prova.

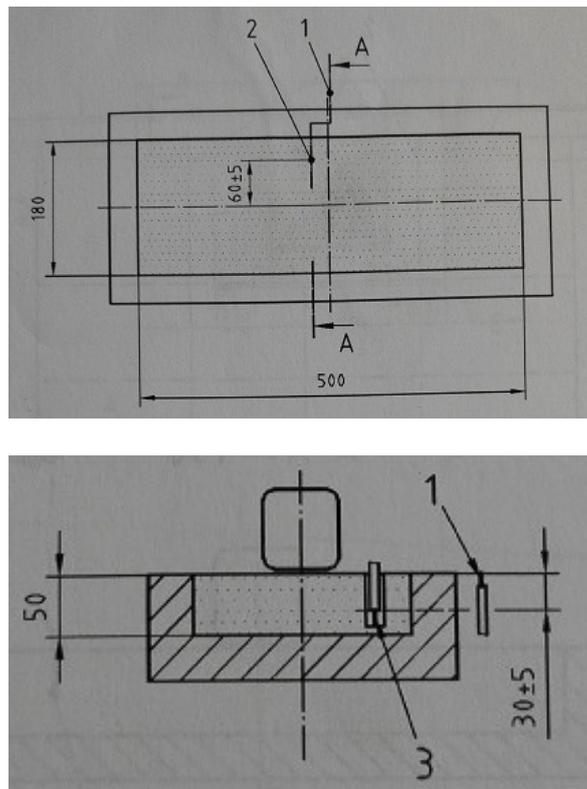


Figura 3-44: Indicazioni per fare il foro sulla lastra

Inoltre, è essenziale prima di iniziare il test, fare dei segni con un pennarello sul cassero della lastra per potere misurare 15 posizioni prestabilite dopo ogni prova, con l'obiettivo di misurare sempre nello stesso punto. La normativa stabilisce le posizioni dei punti di misurazione per dispositivi di grandi dimensioni illustrate nella seguente figura:

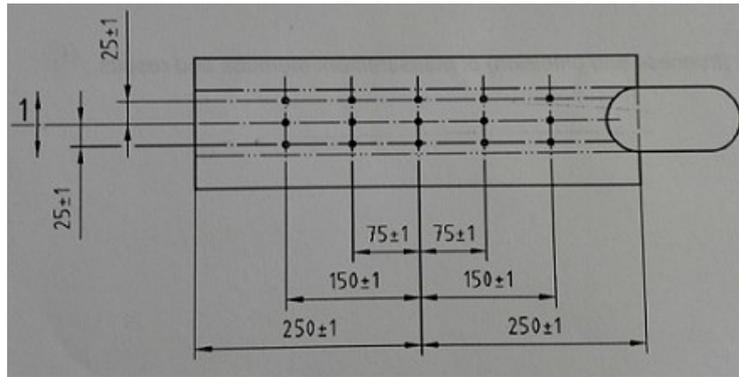


Figura 3-45: posizioni dei punti di misurazione

Si introduce, dunque, il cassero all'interno della macchina, si colloca la sonda nel foro predisposto e si configura la macchina per la prova.

Nella prima fase della prova, prima di condizionare la macchina ad una temperatura di 40°C, sono impostati 1.000 cicli a temperatura ambiente e successivamente sono effettuati le misurazioni iniziali del profilo di ciascuna lastra di prova nelle 15 posizioni prestabilite.

In seguito, si deve impostare i parametri per il condizionamento della lastra. Le prove sono state fatte sia a 40°C, previsto dalla normativa vigente, che a 60°C per studiare il comportamento del materiale in condizioni più sfavorevoli. Attraverso gli apparecchi di ventilazione presenti all'interno del macchinario, la camera viene riscaldata alla temperatura predisposta e la sonda rileva la temperatura della lastra all'interno del foro di sondaggio.



Figura 3-46: Pannello di controllo della macchina

La normativa prevede che, la temperatura dell'aria misurata utilizzando la sonda installata sulla parete laterale dello stampo non deve mai superare i 75°C. La lastra si

lascia condizionare per un periodo di tempo di 12 a 16 ore prima del test. Dopo il tempo di condizionamento previsto alla temperatura impostata si fa partire la procedura di prova.

La macchina è stata configurata per eseguire cicli di 1000, 3000, 10000 e 30000 a 40°C e a 60°C. La macchina deve essere arrestata e si deve misurare la profondità del solco nelle 15 posizioni predeterminate dopo che la lastra ha subito i cicli di carico specificati.



Figura 3-47: Procedura per misurare i solchi nei 15 punti predefiniti



Figura 3-48: Lastra testata dopo il Wheel Tracking Test

Il parametro fondamentale rilevabile da questa prova è la profondità proporzionale del solco, P_i , della lastra per il set di misure, i , dai 15 valori di deformazione locale, m_{ij} , e lo spessore della lastra, h , determinata con la relazione seguente:

$$P_i = 100 \times \sum_{j=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{(15 \times h_{media})}$$

Equazione 3-15: Calcolo della profondità proporzionale del solco

Dove:

P_i : profondità proporzionale del solco [%]

m_{ij} : deformazione locale [mm]

m_{0j} : la misurazione iniziale nella posizione j

h_{media} : lo spessore medio della lastra [mm]

3.4.8 Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

L'AMPT o Simple Performance Tester (SPT) è stata sviluppata per condurre tre test relativi alle prestazioni sul conglomerato bituminoso che sono stati raccomandati nel Progetto NCHRP 9-19 per completare il metodo di progettazione della miscela volumetrica Superpave. Questi sono modulo dinamico, Flow Number e Flow Time. Il modulo dinamico è anche l'input di materiale primario per la caratterizzazione dello strato di conglomerato bituminoso nell'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Pertanto, l'AMPT può essere impiegata per ottenere le proprietà relative alle prestazioni del conglomerato bituminoso sia per la progettazione della miscela che per la progettazione strutturale della pavimentazione.

3.4.8.1 Modulo Dinamico

Il parametro del modulo dinamico è definito come il rapporto dell'ampiezza della forza sinusoidale, misurato ad una frequenza e ad una certa temperatura, e l'ampiezza della deformazione sinusoidale, misurato alla stessa frequenza e temperatura. Il metodo di prova per la determinazione del modulo dinamico delle miscele di conglomerato bituminoso a caldo (Master Curve), corrisponde a un test in cui valutare le proprietà meccaniche del materiale in diverse condizioni di temperatura e velocità di caricamento. L'importanza di ottenere questo parametro è che è stata costituito come elemento fondamentale nella progettazione della pavimentazione, in quanto consente di caratterizzare in modo razionale, il comportamento di deformazione da sforzo dei materiali che compongono la struttura della miscela di conglomerato bituminoso.

Campioni di prova

Il campione consiste in una miscela di conglomerato bituminoso, prodotta in impianto per conglomerati bituminosi, compattata nella pressa giratoria. Le dimensioni dei nuclei sono di 100 ± 2 mm di diametro e $150 \pm 2,5$ mm di altezza. Il numero di campioni dipende

dal coefficiente di variazione che si desidera ottenere nel test, tuttavia, per condizioni tipiche, 3 campioni vengono realizzati utilizzando la pressa giratoria da cui vengono estratti i 3 nuclei per il test tramite la macchina carotatrice.



Figura 3-49: Carotaggio di campione

La prova è stata eseguita seguendo le istruzioni della norma AASHTO (PP 61 e TP 79).

Sintesi della procedura

La serie di prova consiste nell'eseguire il test mediante una scansione di 3 temperature (4, 20 e 40 °C) a 10 frequenze di carico (0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 e 25 Hz). Una sollecitazione compressiva sinusoidale controllata viene applicata con ripetuti sforzi ciclici di grandezza fissa che dipendono dalle frequenze. Le tensioni applicate e le deformazioni assiali risultanti sono misurate in funzione del tempo e utilizzate per calcolare il modulo dinamico e l'angolo di fase.

I campioni devono essere preparati per il test, introducendo in ciascun campione dadi in acciaio attraverso una dima per montaggio spine di riferimento, con l'utilizzo di una colla specifica.



Figura 3-50: Dadi in alluminio e colla utilizzata



Figura 3-51: Dima per montaggio spine di riferimento trasduttori LVDT

Prima di iniziare il test, i campioni vengono pre-condizionati alle temperature di test definite in una camera climatica al meno 12 ore.



Figura 3-52: Campioni pre-condizionati in camera climatica

Tre LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sono montati sui dadi in acciaio e sono regolati in modo che abbiano una gamma sufficiente per registrare la deformazione massima del provino a tutte le frequenze della prova nelle temperature della prova selezionati. I sensori LVDT misurano la deformazione quando il campione è sottoposto a tensione. Una volta che il campione è stato aggiustato con tutti tre gli LVDT, quindi viene posizionata la piastra superiore sul campione. Il campione è pronto per il test.

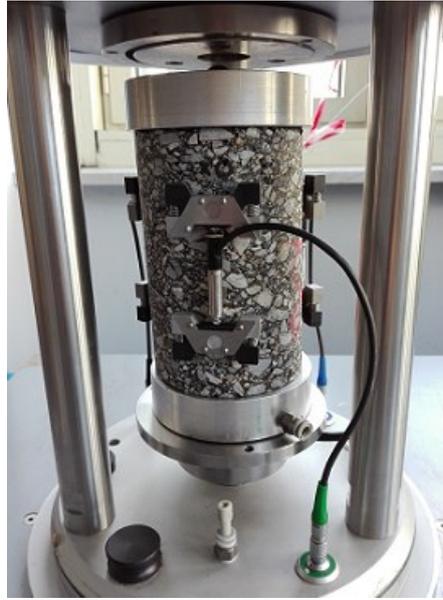


Figura 3-53: Campione pronto per essere testato

Riassunto dei passaggi per eseguire la prova del modulo dinamico:

- Misurare il diametro del campione e altezza precisamente in diverse posizioni con il calibro.
- Condizionare il campione alla temperatura di prova.
- Assicurarsi che il campione sia perfettamente centrato.
- Posizionare e regolare LVDT.
- Scegliere le frequenze di cui abbiamo bisogno per il test.
- Assegnare un nome al test correttamente.
- Eseguire il test.
- Ispezionare e salvare i risultati e verificare con requisiti di specifica.

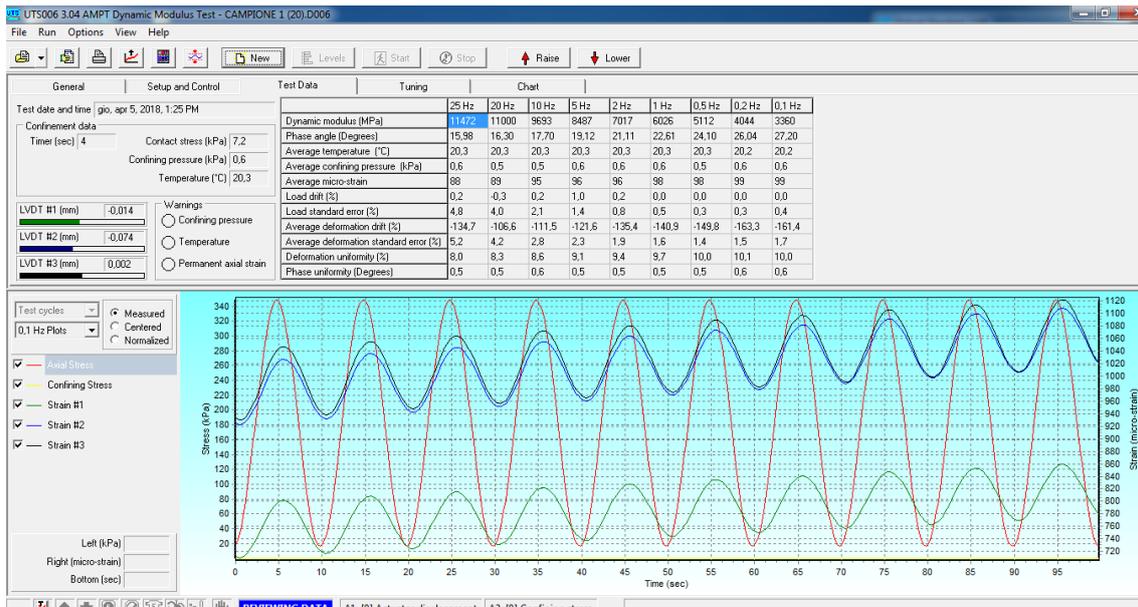


Figura 3-54: Layout generale del test di Modulo Dinamico a 20°C

Le statistiche sulla qualità dei dati sono fornite dal software APMT. Nell'immagine seguente è possibile vedere come il software fornisce i risultati di un test di modulo dinamico.

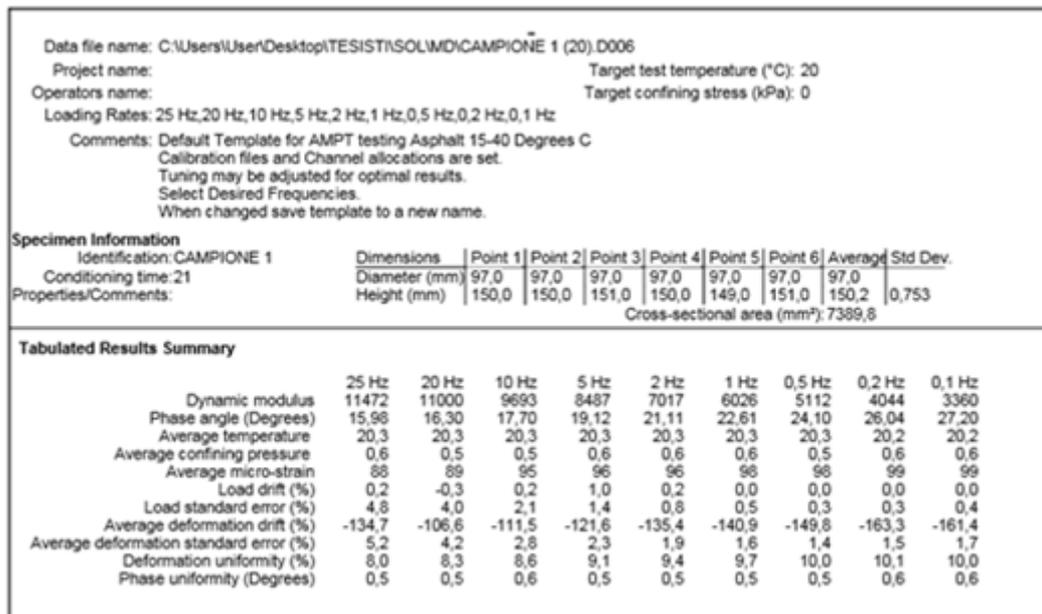


Figura 3-55: Riassunto dei dati del test forniti dal software

Procedura per generare la Master Curve

Il comportamento reologico di un materiale viscoelastico, come il conglomerato bituminoso, è fortemente dipendente dalla temperatura e dal tempo di carico o dalla frequenza, cioè il reciproco del periodo. Per confrontare i risultati restituiti dalle prove

sul materiale a diverse temperature si usa normalizzare una delle due variabili. Si arriva, cioè, a riunire in un'unica curva i dati registrati alle diverse isoterme, in virtù del principio di sovrapposizione tempo-temperatura. Tale principio implica che la stessa variazione di una grandezza meccanica, in questo caso il modulo dinamico, ottenuta variando la temperatura a frequenza fissata, può essere ottenuta variando la frequenza e tenendo fissa la temperatura.

La singola curva alla quale vengono ricondotti i dati relativi alle diverse temperature prende il nome di “Master Curve”, o Curva Maestra. Questa curva si ottiene scegliendo una temperatura di riferimento e traslando orizzontalmente i valori del Modulo ottenuti alle rimanenti temperature di prova. Si assume come fondamentale il tratto di curva $E(f)$ ricavato alla temperatura di riferimento e si traslano le altre isoterme mantenendole parallele a le stesse, lungo l'asse del logaritmo delle frequenze fino a coincidenza delle curve.

Tale principio è applicabile solo ai materiali a comportamento termoreologicamente semplice, come il conglomerato bituminoso, per i quali le proprietà viscoelastiche variano con la temperatura per effetto di una modificazione della scala dei tempi.

I metodi per la costruzione delle Master Curve disponibili sono diversi. In questo studio sono stati utilizzati due per poterne fare un confronto e verificare la conformità dei risultati ottenuti. Tali metodi sono: il modello sigmoidale sviluppato dal NCHRP standardizzato all'interno della AASHTO PP 61-13 “Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)” e il modello di Hirsch. Prendendo in considerazione i dati disponibili dalle prove eseguite, si è deciso di tracciare la “Master Curve” alla temperatura di riferimento intermedia, cioè 20 °C, secondo i due diversi metodi di calcolo.

Il modello sigmoidale è una funzione che applica una trasformazione sui valori di Modulo di rigidità sperimentali in modo che essi possano essere visualizzati tramite una curva con la caratteristica forma ad “S” in funzione della frequenza ridotta. La giustificazione dell'utilizzo di un modello sigmoidale per l'adeguamento dei dati sperimentali è basata su osservazioni fisiche.

La forma generale della curva maestra del modulo dinamico è una versione modificata dell'equazione della curva maestra del modulo dinamico inclusa nel MEPDG.

Le curve maestre $|E^*|$ sono costruite usando la frequenza-temperatura, concetti di sovrapposizione rappresentati da fattori di spostamento. Gli effetti combinati della

temperatura e della velocità di caricamento possono essere rappresentati sotto forma di una curva maestra relativa a $|E^*|$ a una frequenza ridotta (f_r) mediante una funzione sigmoideale. Il parametro della frequenza ridotta [f_r] utilizza un'equazione della funzione sigmoideale della curva maestra $|E^*|$. La equazione della curva maestra del modulo dinamico $|E^*|$ che utilizza una frequenza ridotta (f_r) in questo studio è descritto come segue:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max-\delta)}{1+e^{\beta+\gamma \cdot \log f_r}}$$

Equazione 3-16: Calcolo del Modulo Dinamico

Dove:

$|E^*|$ = Modulo Dinamico [psi]

δ, β e γ = Parametri adeguati

Max = Modulo massimo limite [psi]

f_r = Frequenza ridotta [Hz]

I parametri δ, β e γ descrivono la curvatura della funzione sigmoideale S e la distanza orizzontale tra l'origine e il punto di flesso. I moduli di rigidezza max e min sono i moduli massimo e minimo assoluti del materiale ottenuti sperimentalmente.

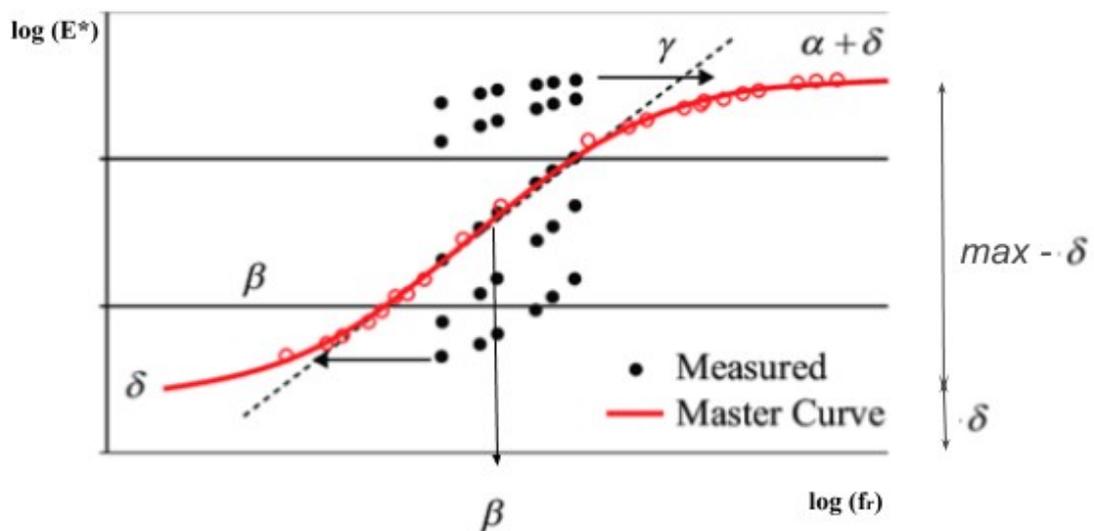


Figura 3-56: Forma e parametri della funzione sigmoideale

Le frequenze ridotte f_r possono essere determinate tramite la equazione di Arrhenius:

$$\log f_r = \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Equazione 3-17: Calcolo frequenza ridotta

Dove:

f_r = Frequenza ridotta alla temperatura di riferimento [Hz]

f = Frequenza di caricamento alla temperatura di prova [Hz]

ΔE_a = energia di attivazione (trattato come un parametro adatto)

T = Temperatura di prova [°K]

T_r = Temperatura di riferimento [°K]

La forma finale della equazione della curva maestra del modulo dinamico è la seguente:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left\{ \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right] \right\}}}$$

Dove:

$$\log[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Equazione 3-18: Calcolo di Shift Factor

$\log[a(T)]$ = Shift Factor alla temperatura T

I parametri incogniti del problema sono cinque: $\log(Max)$, ΔE_a , δ , β e γ . Queste incognite vengono determinate simultaneamente, utilizzando la funzione Risolutore (“Solver”) di Microsoft Excel, minimizzando la somma dei quadrati degli errori tra i valori del Modulo dinamico calcolati tramite l’equazione del modello e i valori determinati sperimentalmente. Le seguenti stime iniziali sono raccomandate:

- ✓ $\delta = 0.5$
- ✓ $\beta = -1.0$
- ✓ $\gamma = -0.5$
- ✓ $\Delta E_a = 200000$

L’operazione iterata che svolge il Risolutore è, quindi, quella di determinare i valori delle cinque incognite in modo che esse minimizzino la somma dei quadrati degli errori tra i dati sperimentali e quelli calcolati utilizzando l’equazione del modello sigmoidale. Il risultato ottenuto è il grafico della “Master Curve” in forma sigmoidale, che riporta i valori del logaritmo del Modulo di rigidità in funzione della frequenza ridotta.

Nel caso del modello di HIRSCH, sono stati eseguiti gli stessi passaggi per ottenere le curve maestre, ma al momento di utilizzare il Risolutore "Solver" per determinare le incognite, è stato utilizzato un modulo limite massimo precedentemente calcolato riducendo il numero di incognite a quattro.

Christensen (et al., 2003) ha esaminato quattro diversi modelli basati sul modello parallelo della legge delle miscele e ha scelto il modello che incorpora il modulo binder, VMA e VFA perché fornisce risultati accurati nella forma più semplice. Le altre forme più complicate cercano di incorporare il modulo del mastice o lo spessore del film, che sono parametri difficili da misurare. Il modello suggerito per $|E^*|$ è stimato dalle proprietà volumetriche della miscela di asfalto e è stato calcolato con la seguente espressione:

$$|E^*|_{max} = P_c \cdot \left[4,200,000 \left(1 - \frac{VMA}{100}\right) + 435,000 \left(\frac{VFA \times VMA}{10,000}\right) + \frac{1 - P_c}{\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100}\right)}{4,200,000} + \frac{VMA}{435,000(VFA)}} \right]$$

Equazione 3-19: Modello HIRSCH - Calcolo di Modulo limite massimo

Dove:

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{435,000(VFA)}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{435,000(VFA)}{VMA}\right)^{0.58}}$$

$|E^*|_{max}$ = modulo dinamico limite massimo della miscela di asfalto [psi]

VMA = vuoti nell'aggregato minerale [%]

VFA = vuoti pieni di asfalto [%]

P_c = volume di contatto aggregato.

Infine, si deve valutare la curva maestra adattata tramite il calcolo della varianza spiegata. Per ottenere questo valore è necessario calcolare la bontà di adattamento statistiche "Goodness of Fit".

Come primo passo, si deve calcolare la deviazione standard del logaritmo dei valori medi misurati del modulo dinamico per ciascuna combinazione di temperatura/frequenza. Tale valore viene chiamato S_y . Successivamente viene determinato l'errore standard tramite la seguente espressione:

$$S_e = \left[\frac{1}{6} \sum_1^{10} \left(\log|\hat{E}^*|_i - \log|E^*|_i \right)^2 \right]^{0.5}$$

Equazione 3-20: Calcolo dell'errore standard

Dove:

S_e = errore standard di stima

$\log|\hat{E}^*|_i$ = valore previsto dall'equazione di modulo dinamico finale dopo l'ottimizzazione per ciascuna combinazione di temperatura / frequenza

$\log|E^*|_i$ = logaritmo del modulo dinamico medio misurato per ciascuna combinazione di temperatura/frequenza.

Finalmente è determinato il valore della varianza R^2 con la seguente espressione:

$$R^2 = 1 - \frac{8S_e^2}{9S_y^2}$$

Equazione 3-21: Calcolo della varianza

Dove:

R^2 = varianza

S_e = errore standard di stima

S_y = deviazione standard del logaritmo del modulo dinamico medio.

Come fase finale della procedura, le curve maestre calcolate devono essere valutate controllando che:

- ✓ il rapporto tra S_e e S_y dovrebbe essere inferiore a 0,05.
- ✓ la varianza spiegata dovrebbe superare 0,99.

3.4.8.2 Flow Number

Il test di Flow Number corrisponde a un test alternativo al test del modulo dinamico per valutare la resistenza alla deformazione permanente. Questo test viene eseguito seguendo la normativa AASHTO (TP 79-13).

Il test di Flow Number è una variazione del test di deformazione permanente a carico ripetuto che è stato utilizzato dai ricercatori per misurare il potenziale di rutting delle miscele di conglomerato bituminoso. La figura seguente presenta uno schema del caricamento ripetuto utilizzato in questo test. Gli impulsi del carico compressivo assiale di Haversine vengono applicati al provino. La durata dell'impulso di carico è di 0,1 secondi seguita da un periodo di riposo di 0,9 secondi. La deformazione assiale permanente misurata alla fine del periodo di riposo viene monitorata durante il caricamento ripetuto e convertita in deformazione dividendo per la lunghezza del calibro

originale. Il test può essere condotto con o senza pressione di confinamento. Se si utilizza la pressione di confinamento, rimane costante durante il test.

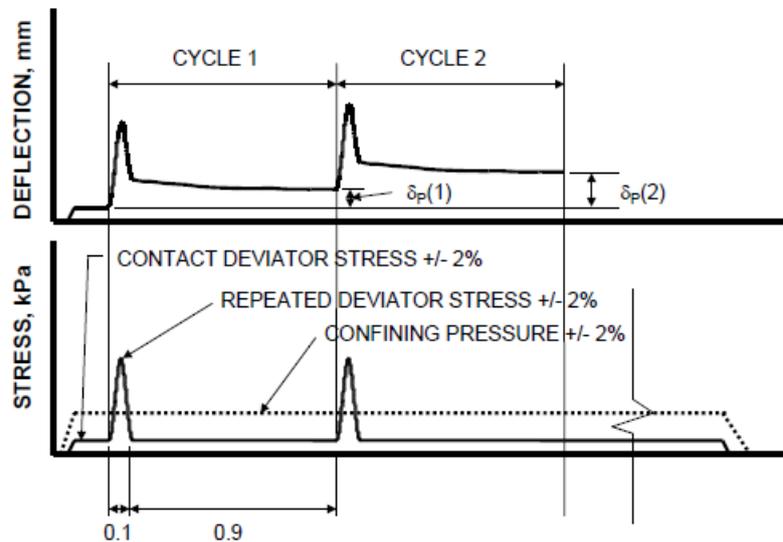


Figura 3-57: Caricamento nel test di Flow Number

Campioni di prova

I campioni utilizzati per questo test sono realizzati nello stesso modo del test del modulo dinamico. Nel nostro progetto di tesi, sono stati impiegati gli stessi campioni precedentemente testati con il test del modulo dinamico. Questi campioni sono stati fatti con la pressa giratoria. Le dimensioni dei nuclei sono di 100 ± 2 mm di diametro e $150 \pm 2,5$ mm di altezza. Per ogni test, vengono estratti 3 nuclei tramite la macchina carotatrice.

Prima di iniziare il test, i campioni vengono pre-condizionati alle temperature di test definite in una camera climatica al meno 12 ore. La prova è stata eseguita per due diverse temperature, 40 e 60°C.

Per questa prova è necessario da impiegare i riduttori di frizione in doppio lattice ingrassati. Questi vengono fabbricati tagliando due fogli di lattice circolari da una membrana di lattice usata per confinare i campioni, applicando una determinata quantità di grasso siliconico uniformemente su uno dei fogli di lattice e quindi posizionando il secondo foglio di lattice sul primo. Questi riduttori di attrito sono obbligatori per il test di Flow Numer e sono posizionati tra il campione e i piatti, che sono sotto e sopra di esso.



Figura 3-58: Confezione di riduttori di frizione in doppio lattice ingrassati



Figura 3-59: Campione pronto per essere testato

Sintesi della procedura

Il test Flow Number consiste nell'applicazione di un impulso ripetuto di sollecitazione di compressione a un campione di miscela di conglomerato bituminoso. Ogni ripetizione di carica genera una deformazione permanente nel campione, che viene registrata dall'apparecchiatura. Prima di iniziare il test, viene applicata solo una pressione di contatto di 30 kN (senza confinamento). La camera è impostata a una temperatura di 40°C e poi di 60°C, ai fini della presente indagine, e inizia con l'applicazione degli impulsi di carica, che consistono in una forza di deviazione di 600 kPa ad ogni secondo di carico. Da questa informazione, una curva di deformazione permanente viene generata contro i cicli di carico e infine il numero di Flow Number viene riportato come il valore della curva in cui il tasso di deformazione permanente accumulata registra il valore minimo.

La seguente figura presenta un esempio di una tipica risposta di deformazione assiale permanente e il calcolo del Flow Number.

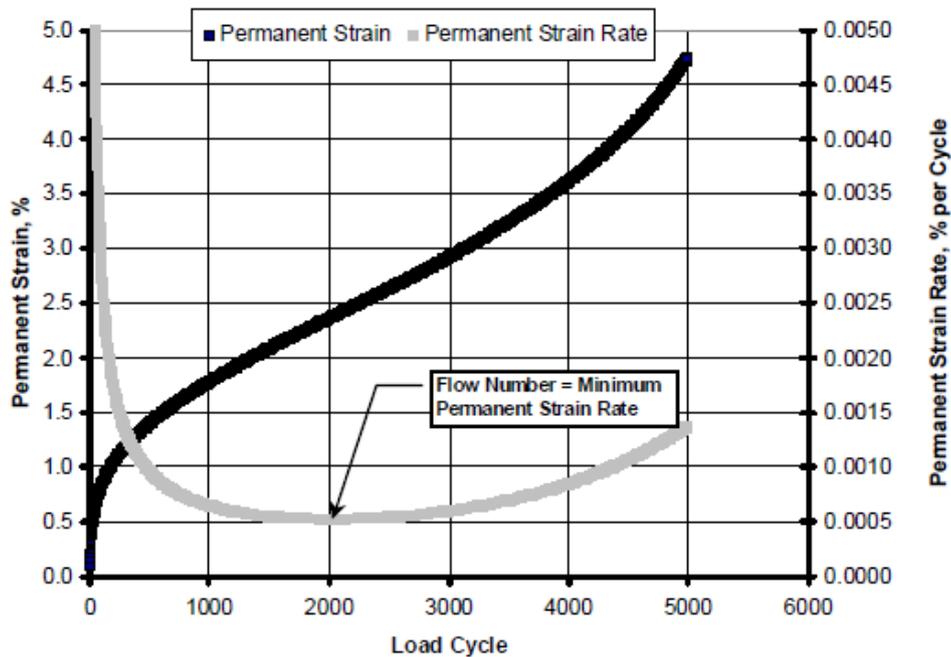


Figura 3-60: Esempio di dati del test di Flow Number

Sono stati proposti vari algoritmi per identificare il Flow Number nel test. Due di questi algoritmi sono stati implementati in Asphalt Mixture Performance Tester: la differenza centrale lisciata e il modello di Francken.

Nell'algoritmo di differenza centrale arrotondato, la derivata in ciascun punto viene calcolata utilizzando i dati di deformazione permanente grezza e la seguente equazione:

$$\frac{d(\varepsilon_p)_i}{dN} = \frac{(\varepsilon_p)_{i+\Delta N} - (\varepsilon_p)_{i-\Delta N}}{2\Delta N}$$

Equazione 3-22: Tasso di variazione di deformazione assiale permanente

Dove:

$\frac{d(\varepsilon_p)_i}{dN}$ = tasso di variazione di deformazione assiale permanente rispetto a cicli o tasso di deformazione permanente a ciclo i [1/ciclo]

$(\varepsilon_p)_{i+\Delta N}$ = deformazione permanente ai cicli $i + \Delta N$

$(\varepsilon_p)_{i-\Delta N}$ = deformazione permanente ai cicli $i - \Delta N$

ΔN = intervallo di campionamento.

Il tasso di deformazione permanente per ciascun ciclo viene quindi livellata usando una media mobile del tasso di deformazione permanente nel punto in questione e due punti prima e dopo il punto in questione. I primi test con questo algoritmo indicavano che il Flow Number era sensibile all'intervallo di campionamento utilizzato. Inoltre, per un intervallo di campionamento di uno, il Flow Number dei test replicati sullo stesso materiale era altamente variabile a causa del rumore elettrico sul segnale del trasduttore di deformazione.

Nel lavoro successivo sul Flow Number, i ricercatori della Arizona State University hanno raccomandato l'uso del modello Francken per adattarsi alla deformazione permanente rispetto al numero della curva dei cicli di carico, e quindi eseguire la differenziazione sulla curva adattata. Tale modello fornisce un'equazione che è una combinazione di un modello di potere e una esponenziale ed è in grado di adattarsi a varie forme di curve di deformazione permanente.

$$\varepsilon_p = An^B + C(e^{Dn} - 1)$$

Equazione 3-23: Modello di Francken-Calcolo di deformazione assiale permanente

Dove:

ε_p = deformazione assiale permanente

n = numero di cicli

A, B, C e D = coefficienti di adattamento.

I coefficienti di adattamento sono determinati dall'ottimizzazione numerica. Una volta installato, il primo e il secondo derivato del modello Francken sono facilmente determinabili analiticamente. I derivati del modello Francken sono i seguenti:

✓ Prima derivata:

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} = ABn^{B-1} + CDe^{Dn}$$

✓ Seconda derivata:

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn}$$

Dove:

$\frac{d^2 \epsilon_p}{dn^2}$ = derivata seconda della deformazione permanente rispetto al numero di cicli di caricamento.

Il Flow Number è il ciclo in cui la derivata seconda passa da negativa a positiva.

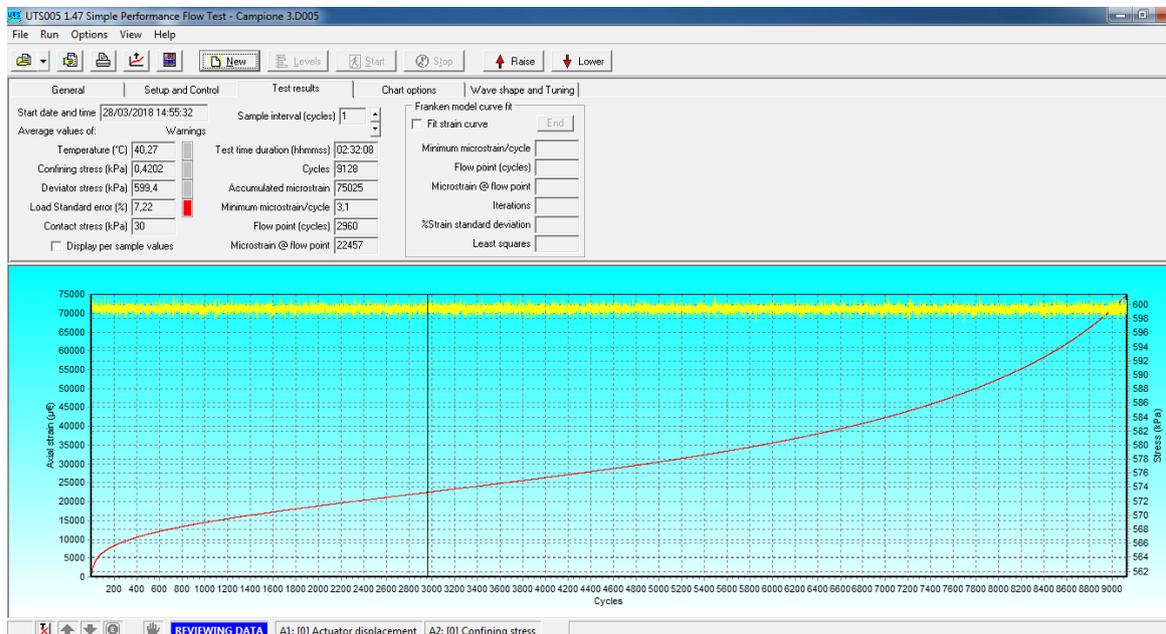


Figura 3-61: Layout generale del test di Flow Number a 40°C

Modellazione del comportamento di deformazione permanente trifase delle Miscele di Conglomerato Bituminoso

Questa analisi è stata effettuata seguendo i concetti descritti in “Verification and Modeling of three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes” pubblicato nel Journal of Transportation Engineering – ASCE, July/August 2004.

Per la miscela di conglomerato bituminoso, un carico di compressione dell'impulso haversine di 0,1 s e 0,9 s tempo di riposo viene applicato a 40°C e a 60°C per determinare la sua proprietà di deformazione permanente. Durante il test, la deformazione permanente cumulativa viene registrata in funzione del numero di ripetizioni del carico.

La seguente figura illustra la relazione tipica tra la deformazione totale cumulativa e il numero di ripetizioni del carico. La deformazione permanente cumulativa è composta da tre fasi: primaria, secondaria e terziaria. Nella fase primaria, la deformazione permanente si accumula rapidamente. Tuttavia, la deformazione permanente per ciclo tende a

diminuire, raggiungendo un valore costante che è definito come l'inizio della fase secondaria. Infine, la deformazione permanente per ciclo comincia ad aumentare e la deformazione permanente si accumula rapidamente di nuovo. Questo aumento segna l'inizio della fase terziaria. Il numero di ripetizioni del carico a cui inizia il flusso terziario viene definito "Flow Number".

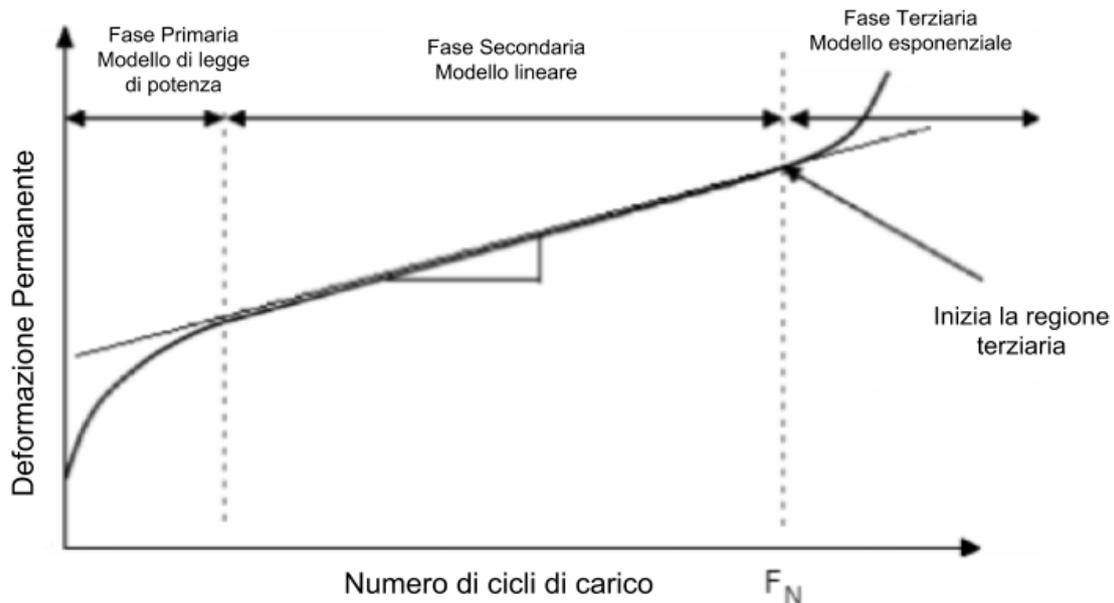


Figura 3-62: Rapporto tipico tra deformazione permanente e numero di cicli nel test di deformazione permanente a carico ripetuto

Dalla curva delle deformazioni permanenti si possono definire i seguenti punti: il numero di ripetizioni del carico e la deformazione permanente accumulata nel punto di transizione tra la fase primaria e quella secondaria sono definite come N_{PS} e ϵ_{PS} . Allo stesso modo, N_{ST} e ϵ_{ST} rappresentano il punto di transizione dalla fase secondaria a quella terziaria.

Gli obiettivi di questo studio sono individuare i tre fasi che si sviluppano in una curva di deformazione permanente mediante la determinazione dei punti di transizione tra di loro attraverso un modello matematico completo, in cui il valore terziario o Flow Number è possibile ottenerlo del test di laboratorio utilizzando l'apparecchiatura AMPT.

Modello di deformazione permanente a tre fasi proposto

Il modo semplice per sviluppare il modello di deformazione permanente a tre fasi è definendo un modello separato per ogni fase. Per descrivere la fase primaria della curva di deformazione permanente è selezionato il modello di legge di potenza.

$$\varepsilon_p = aN^b, N \leq N_{PS}$$

Equazione 3-24: Calcolo deformazione permanente tramite modello di legge di potenza

Dove:

ε_p = deformazione permanente

a e b = costante del materiale

N = numero di cicli

N_{PS} = numero di ripetizioni di carico corrispondenti all'inizio della fase secondaria.

La fase secondaria viene rappresentata seguendo un modello lineare semplice. Si raccomanda usare questo modello per caratterizzare questa fase, perché la deformazione permanente si accumula linearmente.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{PS} + c(N - N_{PS}), \quad N_{PS} \leq N \leq N_{ST}, \text{ e } \varepsilon_{PS} = aN_{PS}^b$$

Equazione 3-25: Calcolo deformazione permanente tramite modello lineare

Dove:

c = costante del materiale

N_{ST} = numero di ripetizioni di carico corrispondenti all'inizio della fase terziaria o

Flow Number

ε_{PS} = deformazione permanente corrispondente all'inizio della fase secondaria.

Dopo la fase secondaria, la deformazione permanente per ciclo aumenta rapidamente e le miscele di conglomerato bituminoso si rompono gradualmente. Il modello esponenziale è proposto per caratterizzare la fase terziaria.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ST} + d(e^{f(N-N_{ST})} - 1), \quad N \geq N_{ST} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{ST} = \varepsilon_{PS} + c(N_{ST} - N_{PS})$$

Equazione 3-26: Calcolo deformazione permanente tramite modello esponenziale

Dove:

d e f = costante del materiale

ε_{ST} = deformazione permanente corrispondente all'inizio della fase terziaria.

Algoritmo utilizzato per determinare i punti di transizione e i parametri del modello di deformazione permanente a tre fasi

Il modello di deformazione permanente a tre fasi è composto da equazioni presentate precedentemente. Dove ogni equazione e i parametri associati possono essere facilmente determinati mediante semplice analisi di regressione, se N_{PS} , ε_{PS} , N_{ST} e ε_{ST} sono

conosciuti. La chiave per determinare i parametri del modello di deformazione diventa come individuare i punti di transizione tra le fasi.

Il primo passo è determinare il punto iniziale della fase secondaria usando il modello di legge di potenza. Successivamente, il modello lineare viene utilizzato per determinare il punto terziario. Questo processo in due fasi è anche la chiave per lo sviluppo del modello a tre fasi.

✓ Algoritmo per identificare il punto iniziale della fase secondaria

1° passo: determinare i coefficienti di regressione (a, b) del modello di legge di potenza utilizzando i set di dati K raccolti. I sets K sono sets di dati di deformazione permanente raccolti da 2 a N_{max} sotto test di carico ripetuto.

2° passo: calcolare la deformazione permanente cumulativa al numero di ripetizioni di carico corrispondenti all'attuale set K th utilizzando l'equazione di potenza determinata al punto 1.

3° passo: confrontare la deformazione permanente accumulata misurata con quello previsto al numero di ripetizioni del carico corrispondente all'attuale set K th. Se la deviazione (D_e) è vicina a 0 % e il numero di ripetizioni di carico corrispondenti all'attuale set K th è inferiore a N_{max} , viene determinato l'inizio della fase secondaria. Cioè, il punto corrispondente all'attuale gruppo K th. La deviazione è definita con la seguente equazione:

$$D_e [\%] = \frac{\Delta}{\varepsilon_p \text{ Misurato}} = \frac{|\varepsilon_p \text{ Misurato} - \varepsilon_p \text{ Previsto}|}{\varepsilon_p \text{ Misurato}} \times 100$$

Equazione 3-27: Calcolo della Deviazione per determinare l'inizio della fase secondaria del modello

4° passo: rimuovere il set K th di dati. Successivamente impostare i set di dati K di deformazione permanente da 2 fino al valore ottenuto precedentemente con una deviazione vicina al 0%. Con questi dati raggiunti, determinare i coefficienti di regressione (a, b) del modello di legge di potenza definitivo.

✓ Procedura per identificare i parametri della fase secondaria e terziaria del modello

Sulla base della definizione della fase secondaria, il tasso crescente di deformazione permanente cumulativa con il numero di ripetizioni del carico è lineare. È definito di seguito un modello lineare con la seguente forma:

$$\varepsilon'_p = cN' + d$$

Assunzioni:

- Ci sono M sets di dati di deformazione permanente raccolti da N_{PS} a N_{FN} .
- Il valore di Flow Number (N_{ST}) è conosciuto grazie alla prova di FN realizzata precedentemente con l'AMPT.

1° passo: pre-elaborare il set di dati M e lasciare che il punto iniziale della fase secondaria diventi la nuova origine del set di dati. Inoltre, è necessario dedurre il valore ε_{PS} e N_{PS} dalla deformazione permanente accumulata e il numero di ripetizioni del carico per potere formulare la espressione finale del modello lineare.

2° passo: regredire i parametri del modello lineare (c, d) utilizzando i set di dati M dopo aver regolato l'origine fino al valore di FN, chiamato anche N_{ST} .

3° passo: regredire i parametri del modello esponenziale (d, f) impiegando i set di dati di deformazione permanente rimanenti, cioè dal valore di N_{ST} (FN) al valore di N_{max} . Inoltre, è necessario dedurre il valore ε_{ST} e N_{ST} dalla deformazione permanente accumulata e il numero di ripetizioni del carico per potere formulare la espressione finale del modello esponenziale.

Dopo aver identificato entrambi i punti di transizione di ogni curva analizzata, i parametri del modello di deformazione permanente a tre fasi sono facilmente determinati tramite l'analisi di regressione come si ha spiegato sopra.

Nel capitolo seguente, sono illustrate in una tabella le espressioni finali del modello a tre fasi per ciascun campione analizzato e le analisi corrispondenti.

CAPITOLO 4

4 ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo si dettagliano tutti i risultati ottenuti dall'analisi compositiva del conglomerato bituminoso, dalle prove volumetriche effettuate sia con la pressa giratoria sia con il compattatore automatico Marshall che con il compattatore a lastre e dalle prove meccaniche eseguite.

4.1 Analisi compositiva della miscela

4.1.1 Massa volumica massima (T.M.D)

Questa prova è fondamentale per il calcolo dell'indice dei vuoti dei provini cilindrici e delle lastre confezionate con il compattatore a lastre. Da questa prova si ottiene la massima massa volumica (TMD) di una miscela bituminosa non compattata e nelle condizioni di addensamento limite, corrispondenti all'assenza di vuoti residui. Tale valore rappresenta la massa volumica degli aggregati rivestiti del film di bitume che ha la funzione di legante.

Tale prova è stata realizzata con il conglomerato bituminoso di esame tre volte, impiegando due picnometri ogni volta eseguita. In ogni ripetizione è stato utilizzato un chilogrammo di miscela, collocando in ciascun picnometro 500 g di materiale. Nella seguente tabella si illustra la media delle TMD ottenuti dai picnometri e i valori di deviazione standard e c.v. di loro.

Massa volumica massima (TMD)		
Media	Deviaz. St	C.V
2537 kg/m ³	4.6	0.2

Tabella 4-1: Media delle TMD ottenuti con le 3 ripetizioni eseguiti

Una volta conosciuta la massa volumica, si è eseguito differenti calcoli per la preparazione di provini cilindrici con la pressa giratoria e con il compattatore automatico Marshall e la preparazione di lastre con il compattatore a lastre.



Figura 4-1: Picnometri riempiti con miscela e acqua distillate

4.1.2 Verifica del contenuto di bitume

Per eseguire questa prova, è stato utilizzato un chilo di miscela bituminosa per controllare che il percentuale di bitume nella stessa fosse quello da lo richiesto nel capitolato.

La prova è stata eseguita impiegando la Carbolite, dove in primo luogo il materiale è stato separato e disgregato in due porzioni da 500 gr ciascuno e collocato nei due cestelli. Successivamente, sono stati introdotti i cestelli nella Carbolite per eliminare il contenuto di bitume della miscela.

Una volta che la prova è finita, è possibile calcolare il percentuale di bitume della miscela tramite la differenza di peso del materiale, prima e dopo la prova. Nella tabella seguente viene presentato il risultato della prova nel caso di miscela con il 5.1% di bitume. Si ha fatto la media di due ripetizioni e quello valore è dentro dei limiti della tolleranza ammessa, cioè un contenuto di legante compreso tra il 4,5 e 5,7 %.

TARA	NETTO _{ante} ignizione	LORDO _{ante} ignizione	LORDO _{post} ignizione	NETTO _{post} ignizione	%B _{conglomerato}	%B _{aggregato}
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
2840.8	996.9	3837.7	3784.7	943.9	5.03	5.30

Tabella 4-2: Risultato della Carbolite e calcolo del % di bitume della miscela

- Contenuto di bitume riferito agli aggregati 5,30 %
- Contenuto di bitume riferito alla miscela 5,03 %

4.1.3 Analisi granulometrica degli aggregati

In un conglomerato bituminoso si cerca di ottenere la massima densità impiegando la maggior quantità possibile di aggregati: tale obiettivo si ottiene quando i granuli hanno dimensioni diverse, in modo che i più piccoli possano penetrare nei vuoti lasciati dai più grandi.

L'analisi granulometrica è il procedimento che consente di determinare, mediante vagliatura, la distribuzione dimensionale degli aggregati.

Per realizzare questa analisi granulometrica si impiegano dei setacci con dimensioni standardizzate.

Gli aggregati lapidei estratti dalla miscela bituminosa sono stati sottoposti a una setacciatura preliminare in maniera tale da essere suddivisi nelle frazioni granulometriche desiderate: 16; 14; 12,5; 10; 8; 6,3; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063. Tali frazioni sono state impiegate per confezionare la curva granulometrica relativa al conglomerato bituminoso, oggetto di studio nella sperimentazione.

Si riportano nella tabella e nel grafico successivo i risultati ottenuti.

SETACCIO	TRATTENUTO	TRATTENUTO _{prog}	TRATTENUTO _{prog}	PASSANTE _{prog}
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
16	0.0	0.0	0.0	100.0
14	8.8	8.8	0.9	99.1
12.5	42.3	51.0	5.4	94.6
10	81.1	132.1	13.9	86.1
8	70.1	202.2	21.3	78.7
6.3	75.9	278.2	29.3	70.7
4	208.0	486.2	51.2	48.8
2	192.3	678.5	71.5	28.5
1	86.5	765.0	80.6	19.4
0.5	44.9	809.9	85.3	14.7
0.25	31.8	841.7	88.7	11.3
0.125	28.6	870.3	91.7	8.3
0.063	23.4	893.6	94.1	5.9

Tabella 4-3: Analisi Granulometrica del materiale di studio

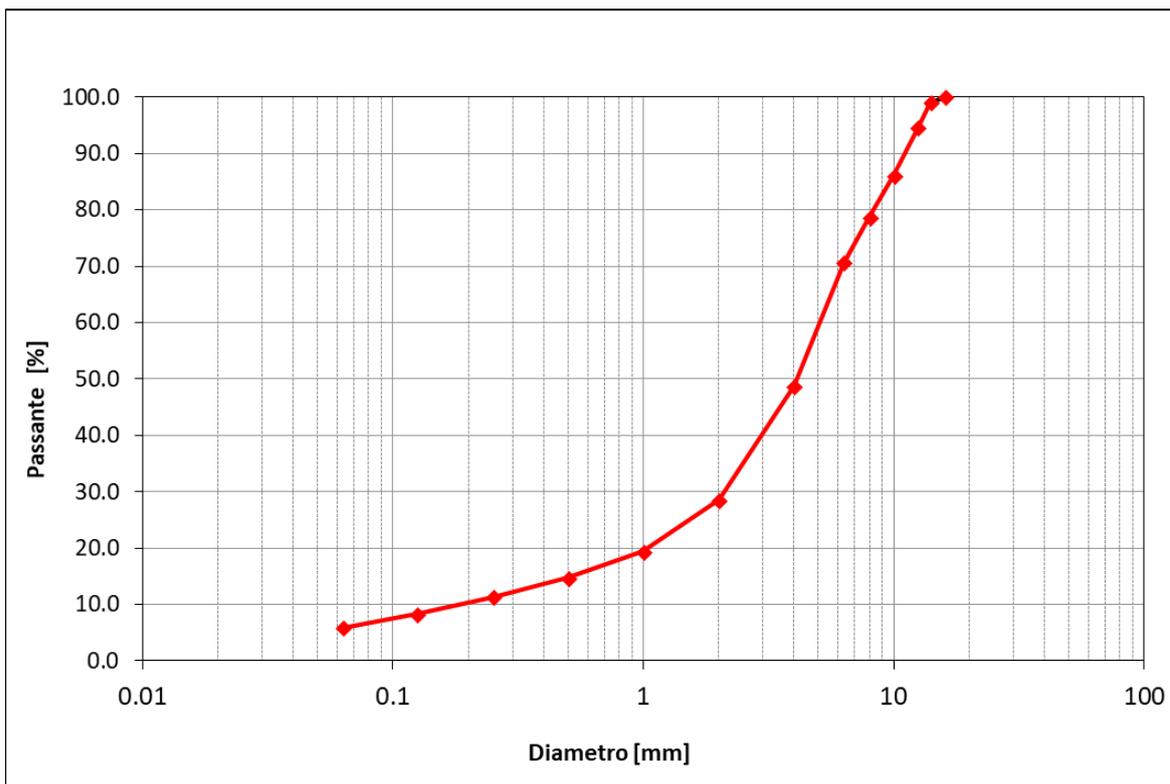


Figura 4-2: Curva granulometrica della miscela bituminosa

4.2 Caratteristiche volumetriche

I provini sono compattati alla temperatura di 150°C dovuto alla indagine fatta precedentemente sulla viscosità del bitume, nella quale si ha trovato questa legge e dove si ha visto che la temperatura conveniente di compattazione è quella.

Nei provini ottenuti mediante i diversi processi di compattazione, vengono presentate le prove volumetriche a cui essi sono stati sottoposti. Tali prove sono utilizzate per ottenere caratteristiche sulla massa volumica massima e relativa e sulla percentuale dei vuoti dei provini.

4.2.1 Caratteristiche volumetriche dei provini confezionati con compattatore Marshall

Come precedentemente indicato, sono stati compattati con il compattatore Marshall tre campioni alla temperatura di 150°C, con 75 colpi inseriti su ciascun lato.

La percentuale dei vuoti, ottenuta dal valore della densità massima ed apparente, dipende anch'essa dagli aggregati, dalla percentuale di bitume e dalla metodologia di

compattazione. Giacché la densità apparente di un provino dipende dal tipo di procedimento adottato.

Calcolate le masse volumiche massime ed apparenti, si è quindi conseguito la percentuale dei vuoti di ogni singolo provino. La percentuale totale dei vuoti di un conglomerato bituminoso compactato con un determinato metodo non è altro che la media dei valori ottenuti dai singoli provini e viene rappresentata nella tabella seguente.

ID	m _{aria}	m _{acqua}	m _{SSD}	T	ρ _w	ρ _{SSD}	ρ _{mw}	v
[-]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
M ₁	1215.3	717.8	1216.9	19.6	998.4	2431	2541	4.3
M ₂	1215.0	716.0	1219.2	19.6	998.4	2411	2541	5.1
M ₃	1214.6	720.5	1223.2	19.6	998.4	2412	2541	5.1

Media	2418	4.8
Dev.St.	11.3	0.4
C.V.	0.5	9.3

Tabella 4-4: Massa volumica apparente e % vuoti di miscela bituminosa compactata mediante compactatore Marshall

4.2.2 Caratteristiche volumetriche dei campioni confezionati con pressa giratoria

Sono stati compactati 3 campioni con PTG (pressa a taglio giratorio) a 150°C utilizzando una fustella di diametro pari a 100 mm, mediante 180 giri, valutandone caratteristiche volumetriche e parametri di lavorabilità.

Per ogni campione è stata determinata la massa volumica massima e la massa volumica apparente, parametri necessari alla determinazione dell'indice dei vuoti (UNI EN 12697-8) in conformità alle normative vigenti. Nella seguente tabella si riportano i valori di ciascun campione compactati.

ID	m _{aria}	m _{acqua}	m _{SSD}	T	ρ _w	ρ _{SSD}	ρ _{mw}	v
[-]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
G ₁	1332.4	795.8	1336.3	18.8	998.5	2461	2534	2.8
G ₂	1331.8	796.3	1334.9	18.8	998.5	2469	2534	2.5
G ₃	1333.4	792.6	1336.9	18.8	998.5	2446	2534	3.5

Media	2459	2.9
Dev.St.	11.7	0.5
C.V.	0.5	15.6

Tabella 4-5: Massa volumica apparente e % vuoti di miscela bituminosa compactata mediante pressa giratoria

Le curve di compattazione ricavate dai dati registrati in continuo dalla pressa giratoria durante il graduale addensamento del materiale hanno consentito di ottenere tre parametri fondamentali per la valutazione della attitudine del conglomerato bituminoso ad essere posato in opera: addensabilità, relativa alla fase iniziale della compattazione, lavorabilità e contenuto di vuoti residui alla fine della compattazione.

Durante i periodi di compattazione con la pressa giratoria sono stati acquisiti, per ogni campione, i dati relativi all'altezza media del materiale sottoposto a compressione all'interno della fustella in funzione del numero di giri. La rielaborazione dei dati ha consentito la costruzione delle curve di addensamento e controllo delle relative caratteristiche volumetriche, riportate in la seguente tabella.

ID	k	C ₁	V ₁₀	V ₁₀₀	V ₁₈₀	V _{180G}
G ₁	8.85	77.4	14.1	4.7	2.8	6.0
G ₂	8.67	78.2	13.5	4.3	2.5	4.8
G ₃	8.25	78.2	13.9	5.2	3.5	6.1

Tabella 4-6: Campioni realizzati – quadro di sintesi e risultati addensamento

Vengono di seguito riportate le curve di compattazione di ogni campione alla temperatura data sullo stesso grafico.

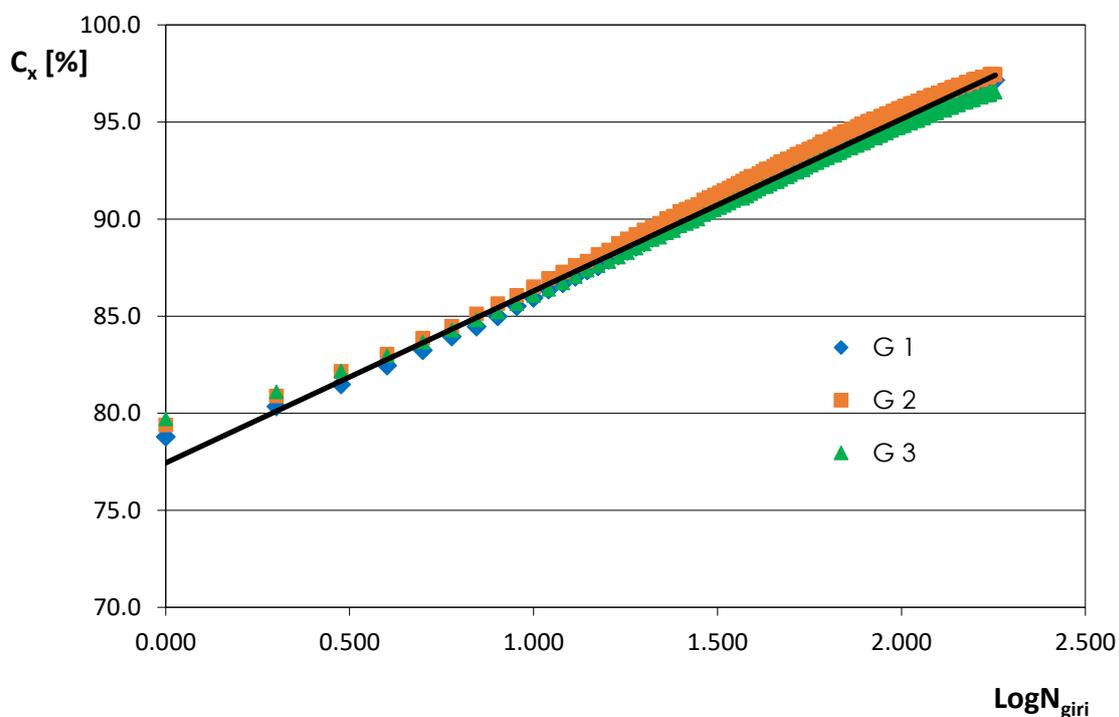


Figura 4-3: Grado di addensamento di miscela bituminosa a 150°C

Nella sezione degli allegati, sono aggiunte le curve di compattazione di ogni singolo campione compattato con PTG.

4.2.3 Caratteristiche volumetriche delle lastre confezionati con compattatore a lastre

Di seguito sono presentati nella tabella seguente le dimensioni che deve avere ogni lastra e la quantità di materiale che si deve introdurre nel cassero per compattare le lastre ad una temperatura di 150°C.

L	I	s	V	ρ_{mw}	$V_{100, medi}$	ρ_{target}	$m_{inserita}$
[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[g]
500	180	50	0.0045	2537	4.9	2363	10665

Tabella 4-7: Parametri di compattazione con compattatore a lastre

Si riporta di seguito nella tabella seguente, i risultati volumetrici in seguito alla compattazione delle 7 lastre con il compattatore a lastre. Tale lastre sono state confezionate con la miscela bituminosa di studio alla temperatura di compattazione di 150°C.

ID	h_{media}	m_{reale}	V_{geo}	Descrizione
[-]	[mm]	[g]	[%]	
L ₁	52.3	10664.6	10.7	Tagliata per analisi
L ₂	49.9	10634	6.6	Non testato
L ₃	49.8	10614.6	6.6	Wheel Tracking Test a 40°C
L ₄	50.4	10596.8	8.0	Wheel Tracking Test a 40°C
L ₅	49.8	10542.3	7.2	Non testato
L ₆	49.6	10597.8	6.5	Wheel Tracking Test a 60°C
L ₇	49.8	10597.6	6.7	Wheel Tracking Test a 60°C

Tabella 4-8: Caratteristiche delle lastre compattate con compattatore a lastre

Al termine della prova di compattazione, atteso il raffreddamento del conglomerato bituminoso, la prima lastra viene sottoposta al calcolo della densità apparente e quindi viene suddivisa in 12 provini mediante una macchina con sega a disco, con il fine di analizzare in dettaglio l'indice dei vuoti nell'intera lastra.

ID	m_{aria}	m_{acqua}	m_{SSD}	T	ρ_w	ρ_{SSD}	ρ_{mw}	v
[-]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
L ₁	10664.6	6293	10833.5	17.7	998.7	2345.8	2536.6	7.5

Tabella 4-9: Massa volumica apparente e % vuoti di Lastra 1

Nel paragrafo seguente sono illustrate i travetti ottenuti dal taglio della lastra 1 con le rispettive percentuali di vuoti.

4.2.3.1 Caratteristiche volumetriche dei travetti tagliati



Figura 4-4: Suddivisione e taglio della lastra 1

Si hanno calcolato le caratteristiche volumetriche dei travetti della lastra 1 dove sono stati determinati per ogni settore la massa volumica apparente e % vuoti.

SETTORE 1 Massa volumica 2340 kg/m3 Contenuto vuoti 7.9 %	SETTORE 2 Massa volumica 2342 kg/m3 Contenuto vuoti 7.8 %	SETTORE 3 Massa volumica 2367 kg/m3 Contenuto vuoti 6.8 %	SETTORE 4 Massa volumica 2352 kg/m3 Contenuto vuoti 7.4 %
SETTORE 5 Massa volumica 2338 kg/m3 Contenuto vuoti 8.0 %	SETTORE 6 Massa volumica 2362kg/m3 Contenuto vuoti 7.0 %	SETTORE 7 Massa volumica 2377kg/m3 Contenuto vuoti 6.5 %	SETTORE 8 Massa volumica 2382kg/m3 Contenuto vuoti 6.3 %
SETTORE 9 Massa volumica 2352kg/m3 Contenuto vuoti 7.4 %	SETTORE 10 Massa volumica 2381kg/m3 Contenuto vuoti 6.3 %	SETTORE 11 Massa volumica 2377kg/m3 Contenuto vuoti 6.4 %	SETTORE 12 Massa volumica 2368kg/m3 Contenuto vuoti 6.8 %

Figura 4-5: Caratteristiche volumetriche dei travetti della lastra 1

Dall'analisi della prima lastra, è stato deciso di compattare le lastre rimanenti con una minore quantità di materiale (da 30 gr a 50 gr in meno) e utilizzando uno spessore di acciaio di 2 mm, al fine di raggiungere l'altezza desiderata (50 mm) sulla lastra con il compattatore a lastre.

4.2.4 Caratteristiche volumetriche delle cuore dei campioni carotati

Sono state compattati 8 campioni a 150°C con la miscela bituminosa di studio, impiegando la pressa di taglio giratorio e fissando l'altezza finale di ogni campione pari a 170 mm. Inoltre, sono stati utilizzati fustelle cilindriche con diametro di 150 mm. Di tali

campioni vengono estratti i nuclei tramite la macchina carotatrice, per le prove di Modulo dinamico e Flow Number, con diametro pari a 100 mm e successivamente sono tagliati per ottenere una altezza finale di 150 mm. Durante il taglio, abbiamo lavorato attentamente con l'obiettivo di ottenere campioni con facce parallele per evitare sforzi di pressoflessione durante la prova con l'AMPT.



Figura 4-6: Macchina troncitrice e campione tagliato

Nella seguente tabella sono presentati i risultati delle caratteristiche volumetriche dei campioni compattati con PTG e dei cuori dei campioni carotati. Inoltre, si specifica le prove eseguiti su ciascun cuore di campione con la macchina AMPT.

Le curve di compattazione di ciascun campione e i dettagli delle caratteristiche volumetriche di tutti i cuori di campioni, sono illustrati nella sezione di allegati.

ID	k	C ₁	N _{giri finali}	Campione PTG		Cuore		Descrizione
				V ₁₀	V _{finali}	V _{geo}	V _{reali}	
[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	
A ₁	8.7	78.1	41	13.5	7.7	7.7	6.8	Testato per MD e per FN a 60°C
A ₂	9.0	78.8	49	12.5	5.7	6.4	5.7	Testato per FN a 40°C
A ₃	9.0	78.2	48	13.1	6.5	6.5	6.5	Testato per FN a 40°C
A ₄	9.2	77.8	54	13.4	6.2	6.6	6.2	Testato per FN a 40°C
A ₅	9.1	78.1	57	13.1	5.8	7.7	5.8	Non testato
A ₆	9.1	78.1	53	13.1	6.0	6.8	6.0	Testato per FN a 60°C
A ₇	9.1	77.8	53	13.4	6.3	7.0	6.3	Testato per MD e per FN a 60°C
A ₈	9.1	77.9	53	13.3	6.2	7.1	6.2	Testato per MD e per FN a 60°C

Tabella 4-10: Caratteristiche volumetriche dei campioni compattati con PTG e dei cuori dei campioni

4.3 Caratteristiche meccaniche

I risultati delle prove verranno rappresentati mediante l'utilizzo di tabelle e appositi grafici in grado di dare una visione grafica precisa delle caratteristiche prestazionali dei campioni esaminati. Si procede ora con l'analisi dei risultati delle prove meccaniche.

4.3.1 Stabilità e Rigidezza Marshall

La prescrizione di capitolato evidenzia come i risultati delle prove Marshall debbano essere analizzati in termini di stabilità e rigidezza Marshall, tenendo in conto anche il contenuto di vuoti residui fornito dalla miscela studiata.

I risultati di stabilità e rigidezza Marshall, ottenuti per i tre provini di conglomerato bituminoso sono presentati nella tabella seguente, dove i valori minimi per queste due caratteristiche sono pari a 11 kN per la stabilità e 2,5 kN/mm per la rigidezza, prescritti dai più diffusi capitolati stradali per miscele chiuse. Nella tabella seguente sono, inoltre, riportati i corrispondenti valori medi della stabilità, dello scorrimento, della rigidezza e il valore medio del contenuto di vuoti residui relativo ai tre provini compattati, che da capitolato dovrebbe essere compreso tra il 3% ed il 5%.

ID	Vuoti	Stabilita	F	Rigidezza
[-]	[%]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
M₁	4.3	14.8	2.2	6.6
M₂	5.1	12.8	2.5	5.1
M₃	5.1	14.9	2.2	6.8
Media	4.8	14.2	2.3	6.2
Dev.St.	0.4	1.2	0.2	0.9
C.V.	9.3	8.5	7.4	15.2

Tabella 4-11: Risultati medi relativi alla prova Marshall

In termini di percentuale di vuoti, la prima colonna della tabella mostra come soltanto nel caso del provino M₁ sia stato ottenuto un valore intermedio con i limiti dell'intervallo richiesto da capitolato (3÷5%) mentre nei provini M₂ e M₃ il contenuto dei vuoti è risultato superiore, solo superando il limite superiore in 0,1%. Questa proprietà volumetrica non soddisfacente della miscela analizzata è dovuta essenzialmente alla modalità di compattazione Marshall, i cui effetti sull'addensamento si discostano

notevolmente da quelli ottenibili con la compattazione con pressa giratoria, con la quale è stato eseguito il progetto. L'elevato contenuto dei vuoti residui riscontrato sui provini, si riflette in maniera diretta sul comportamento meccanico della miscela ed in particolare sui valori di stabilità Marshall, che tende a diminuire al crescere dei vuoti all'interno della miscela, indipendentemente dalla tipologia di legante considerato.

Nella sezione degli allegati, sono illustrate le curve di stabilità in funzione dello scorrimento di ciascun provino sottoposto alla Prova Marshall.

4.3.2 Ormaiamento

Sono state sottoposte quattro lastre al Wheel Tracking Test, dove due di questi sono stati testati ad una temperatura di 40°C e gli altri due a 60°C. Per entrambe le temperature, sono stati configurati 1000, 3000, 10000 e 30000 cicli come specificato nella normativa. Alla fine di ogni fase, è stato misurato l'ormaiamento delle lastre nei 15 punti definiti precedentemente, al fine di ottenere la percentuale di profondità dei solchi (P_i) ad ogni numero di cicli.

Quando le due lastre sono state condizionate a 40°C hanno dato risultati non particolarmente discordanti. Quando, invece, la prova di ormaiamento è stata effettuata ad una temperatura di 60°C, le carenze meccaniche e strutturali delle lastre confezionate si sono fatte sentire molto raggiungendo un valore di P_i pari a 5,4 % per i 30000 cicli.

Dalle prove eseguite con il Wheel Tracking Test, sono presentati i risultati nelle seguenti tabelle con sui rispettivi grafici.

ID lastra	V_{geo}	Cicli			
		1000	3000	10000	30000
[-]	[%]	P_i [%]			
USURA_L3	6.6	1.5	2.0	2.7	3.0
USURA_L4	8.0	1.4	1.7	2.1	2.6
Media	7.3	1.5	1.9	2.4	2.8

Tabella 4-12: Abbassamenti provocati dal Wheel Tracking Test a 40°C

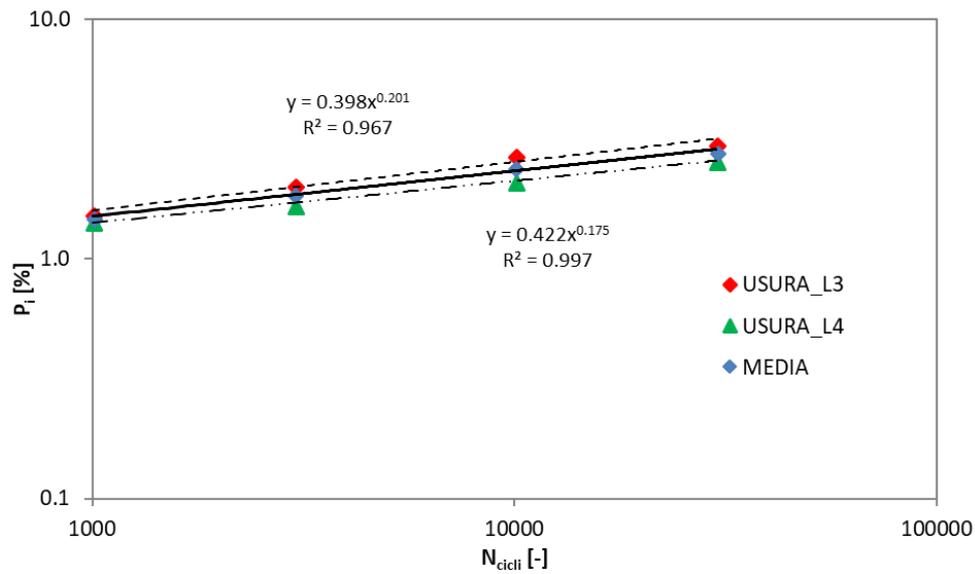


Figura 4-7: Abbassamenti vs N°cicli, provocati dal Wheel Tracking Test a 40°C



Figura 4-8: Lastre L₃ e L₄ dopo Wheel Tracking Test a 40°C

ID lastra	v _{geo}	Cicli			
		1000	3000	10000	30000
		P _i [%]			
USURA_L6	6.5	3.8	4.5	5.0	5.3
USURA_L7	6.7	4.0	4.4	5.0	5.5
Media	6.6	3.9	4.5	5.0	5.4

Tabella 4-13: Abbassamenti provocati dal Wheel Tracking Test a 60°C

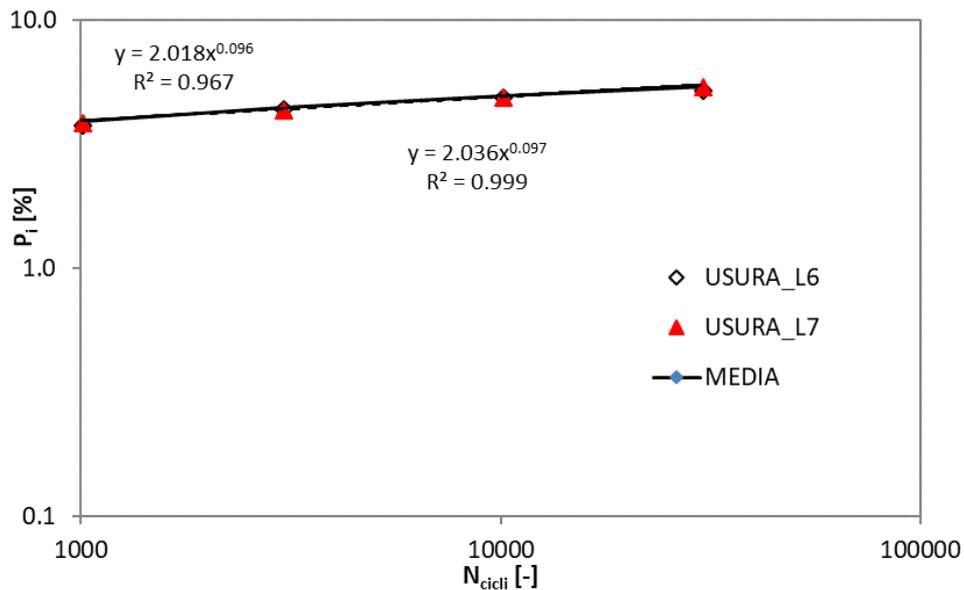


Figura 4-9: Abbassamenti vs N°cicli, provocati dal Wheel Tracking Test a 60°C



Figura 4-10: Lastra L7 dopo Wheel Tracking Test a 60°C

In base agli risultati e ai grafici ottenuti della prova è possibile analizzare le seguenti conclusioni:

- le lastre testati a 40°C mostrano risultati simili allo che succede nella prima fase del ormaiamento, cioè quello che si osserva nelle prime settimane a seguire l'apertura della strada al traffico, infatti si assiste ad un più o meno omogeneo cedimento di tutta la pavimentazione dovuto al ridursi dei vuoti. Tale consolidazione non è altro che una deformazione permanente non più recuperabile, ma non è il vero e proprio scorrimento che fa allarmare.
- analizzando le lastre testati a 60°C è possibile associare i risultati con la seconda fase del ormaiamento, che si origina quando sono stati saturati tutti i vuoti e i veicoli continuano a passare alle alte temperature. In queste condizioni

si sviluppano degli scorrimenti viscosi e da ciò nasce il vero fenomeno dell'ormaiamento in cui si addensa materiale sotto la ruota e refluisce ai lati.

4.3.3 Modulo Dinamico

Impiegando la apparecchiatura Asphalt Mixture Performance Tester se effettuo il test del modulo dinamico. Se hanno testati 3 campioni con un'altezza di 150 mm e un diametro pari a 100 mm. Tre temperature di prova sono state definite in base alla normativa per testare ciascun campione (4°C, 20°C e 40°C).

Le proprietà del modulo dinamico di miscele di conglomerato bituminoso sono una funzione di: temperatura, rapporto di carico, invecchiamento e caratteristiche della miscela come viscosità e contenuto di legante, granulometria dell'aggregato e vuoti. Un modo per sintetizzare i risultati è tenere conto degli effetti della temperatura e del rapporto di carico da una curva maestra del modulo dinamico.

I risultati ottenuti della prova del modulo dinamico vengono visualizzati nella tabella seguente per i tre campioni testati. I risultati specifici per i campioni sono illustrati in dettaglio nella sezione di allegati.

Campione A ₁			Campione A ₇			Campione A ₈		
Temperatura	Frequenza	Modulo	Temperatura	Frequenza	Modulo	Temperatura	Frequenza	Modulo
[°C]	[Hz]	[MPa]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[°C]	[Hz]	[MPa]
4	0.1	10216	4	0.1	11736	4	0.1	11854
4	0.2	11303	4	0.2	12851	4	0.2	12852
4	0.5	12926	4	0.5	14368	4	0.5	14254
4	1	14251	4	1	15525	4	1	15391
4	2	15692	4	2	16698	4	2	16582
4	5	17687	4	5	18238	4	5	18145
4	10	19271	4	10	19414	4	10	19401
4	20	20878	4	20	20650	4	20	20701
4	25	21495	4	25	21087	4	25	21264
20	0.1	3360	20	0.1	4012	20	0.1	4507
20	0.2	4044	20	0.2	4748	20	0.2	5248
20	0.5	5112	20	0.5	5858	20	0.5	6364
20	1	6026	20	1	6776	20	1	7282
20	2	7017	20	2	7819	20	2	8260
20	5	8487	20	5	9262	20	5	9615
20	10	9693	20	10	10473	20	10	10693
20	20	11000	20	20	11740	20	20	11805
20	25	11472	20	25	12188	20	25	12177
40	0.1	536.2	40	0.01	293.5	40	0.01	384.6
40	0.2	701.4	40	0.1	650.2	40	0.1	858.2
40	0.5	996.1	40	0.2	843.2	40	0.2	1089
40	1	1301	40	0.5	1173	40	0.5	1479
40	2	1691	40	1	1485	40	1	1830
40	5	2366	40	2	1871	40	2	2253
40	10	2978	40	5	2530	40	5	2960
40	20	3712	40	10	3109	40	10	3574
40	25	3948	40	20	3789	40	20	4291
			40	25	4001	40	25	4489

Tabella 4-14: Risultati del test di MD per i campioni A₁, A₇ e A₈

I risultati ottenuti sono coerenti con quanto si può trovare in letteratura, dove il modulo dinamico aumenta a parità di condizioni di prova (da 0.1 Hz a 25 Hz) e nel caso dell'angolo di fase, diminuisce a parità di condizioni di prova. Come risultato, nel conglomerato bituminoso di studio, le deformazioni registrate sono relativamente di bassa entità e di tipo reversibile, indice di un comportamento prevalentemente elastico.

Una volta ottenuti i valori della prova di modulo dinamico, sfruttando il principio di equivalenza tempo-temperatura, sono state redatte le curve maestre, che permettono di

introdurre un'unica variabile ridotta per descrivere la variazione del modulo e dell'angolo di fase con la frequenza e la temperatura.

4.3.3.1 Curve Maestre

Le curve maestre sono state costruite usando il principio di sovrapposizione tempo-temperatura. La procedura per la determinazione di questi consiste essenzialmente nel selezionare una temperatura di riferimento, in questo caso 20°C, e successivamente regolare i dati delle altre temperature di prova rispetto al tempo fino a quando le curve si uniscono in una singola funzione levigata.

Per la calibrazione delle curve maestre dai risultati del test, sono stati utilizzati la formula generale sigmoideale e il fattore di aggiustamento, per i quali sono stati ottenuti eccellenti bontà di adattamento, con valori superiori a 99% di rappresentatività dei risultati. Le curve maestre generate sono mostrate nella figura seguente. A titolo di confronto, le tre curve maestre del modulo dinamico sono illustrate insieme.

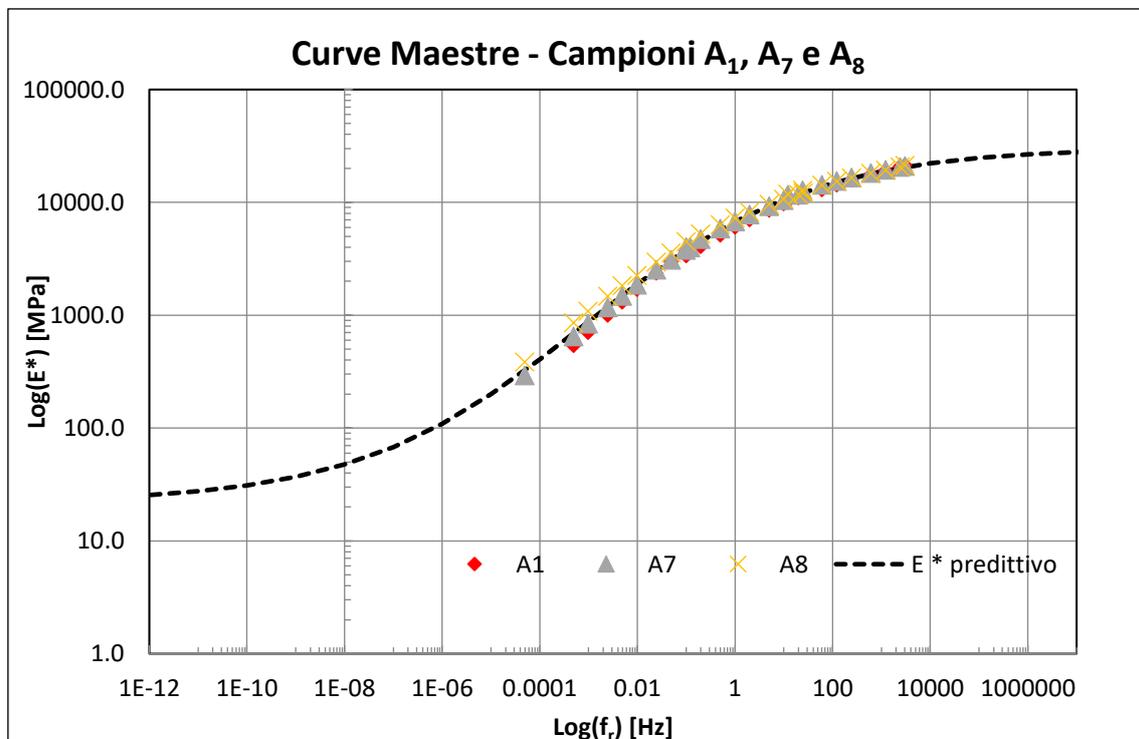


Figura 4-11: Curve maestre di MD dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG

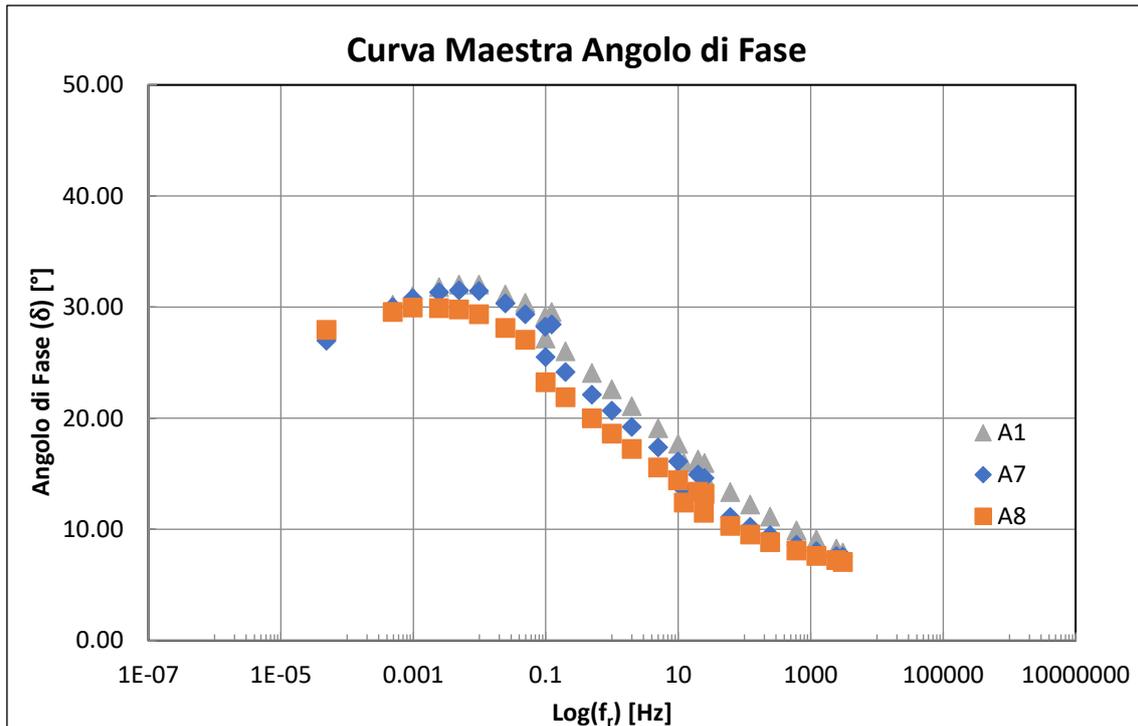


Figura 4-12: Curve maestre di Angolo di fase dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG

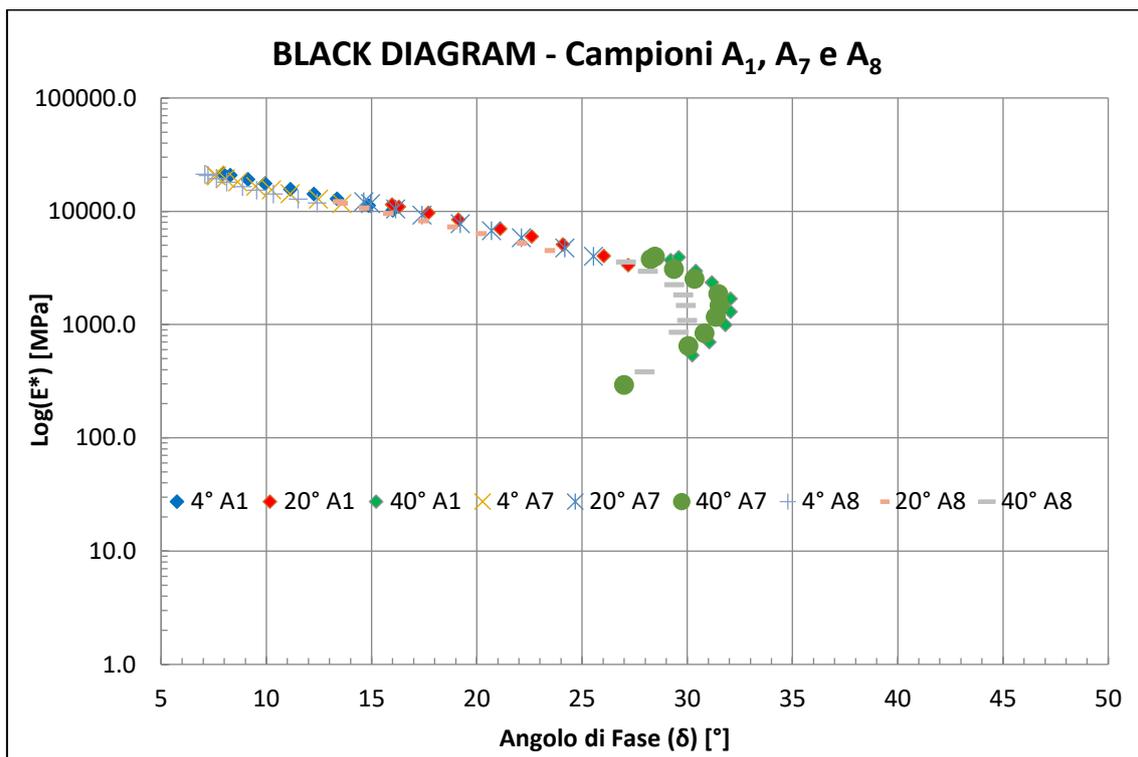


Figura 4-13: Black Diagram dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG

Con i risultati delle prove, anche sono state determinate le curve maestre utilizzando il modello MEPDG-HIRSCH. In tale modello viene utilizzato una formula per il calcolo del modulo massimo limite. Nelle seguenti figure sono rappresentati le curve dei tre campioni testati come nel caso precedente.

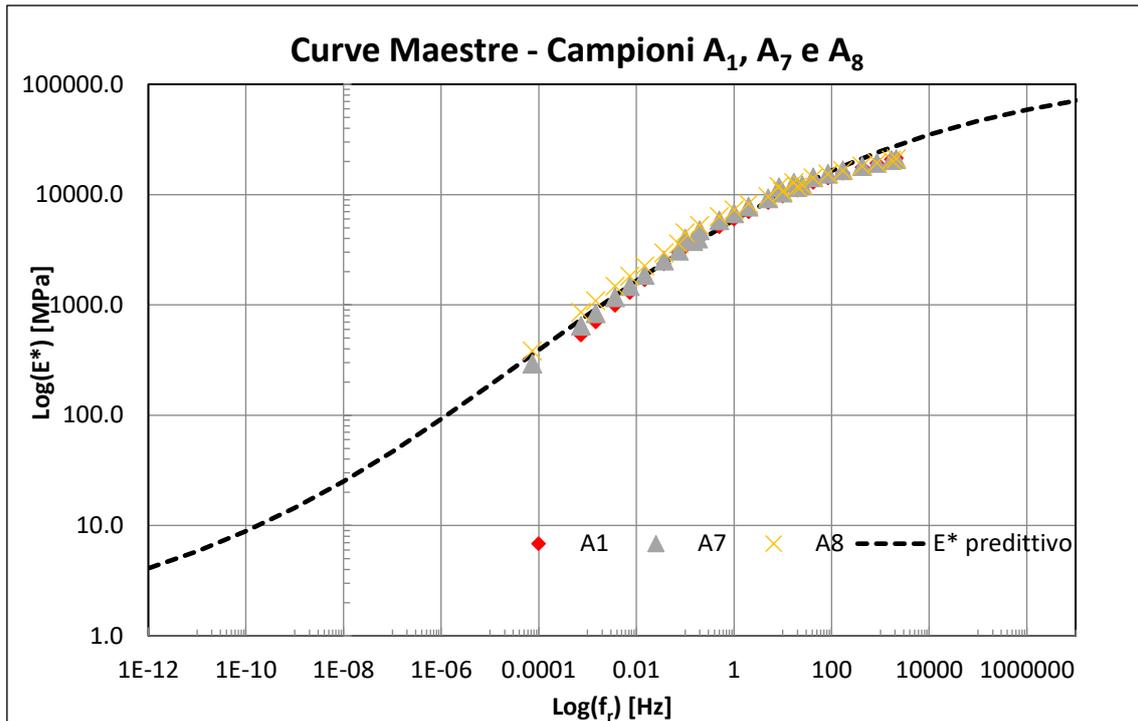


Figura 4-14: Curve maestre di MD dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG-HIRSHCH

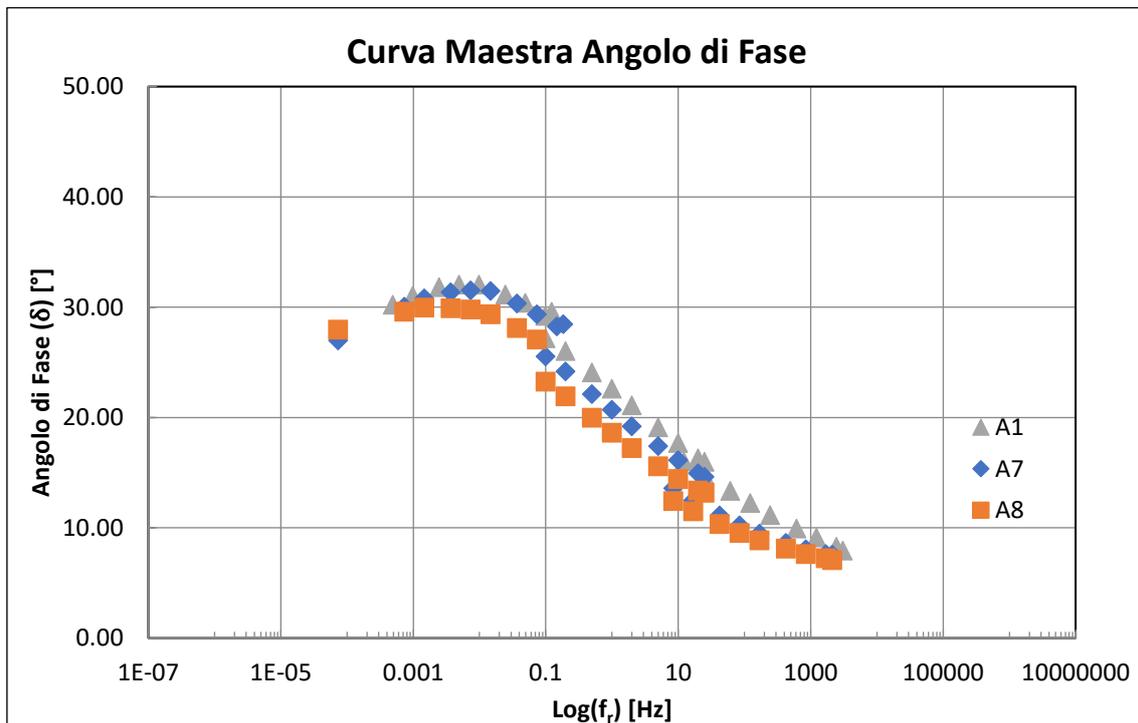


Figura 4-15: Curve maestre di Angolo di fase dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG-HIRSHCH

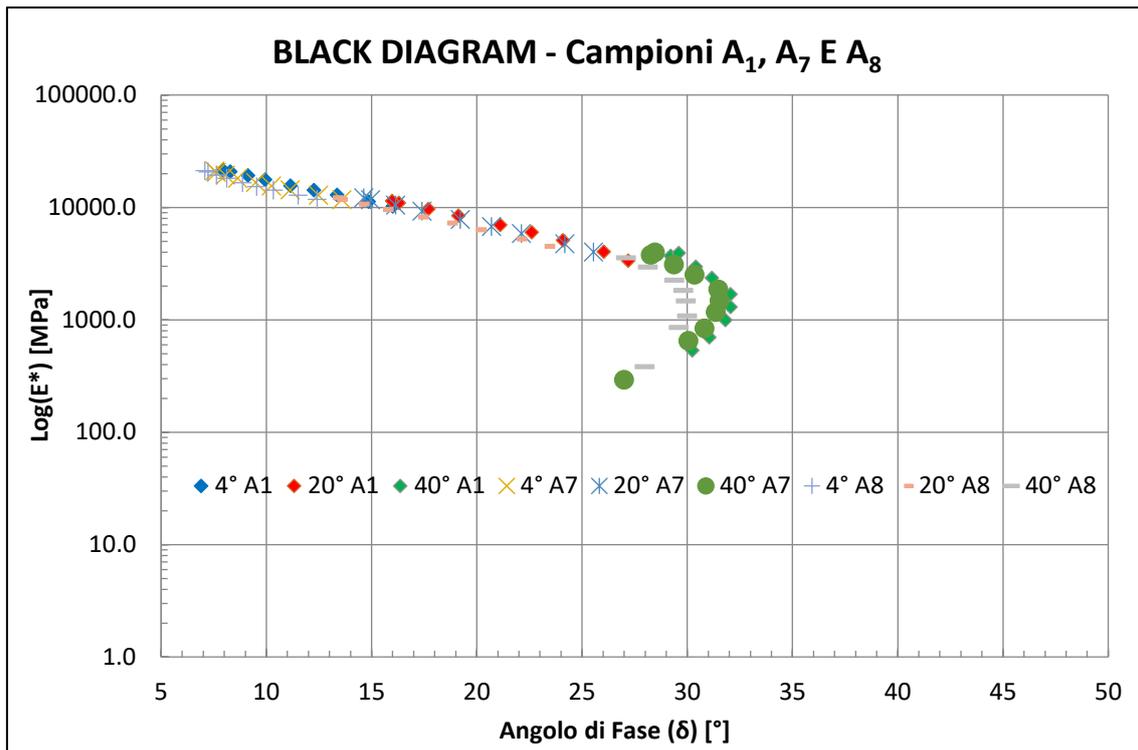


Figura 4-16: Black Diagram dei campioni A₁, A₇ e A₈ - Modello MEPDG-HIRSHCH

Dai risultati illustrati sopra, si evidenziano le seguenti conclusioni:

- Dal confronto delle curve maestre dei moduli predittivi si osserva che a basse temperature, i valori di rigidità sono molto simili tra i tre campioni, i campioni A₇ e A₈ descrivono praticamente la stessa curva, mentre il campione A₁ si separa leggermente al di sotto delle altre curve.
- A temperature elevate (40°C) e basse frequenze di carico viene identificata una distinzione tra le curve maestre, che è dovuta a importanti differenze nelle grandezze dei moduli registrati.
- Analizzando i risultati in modo tempestivo, si può vedere che a temperature elevate i valori di MD sono leggermente più alti per il campione A₈, mentre a bassa temperatura (4°C) il comportamento è invertito, dove il campione A₁ presenta valori MD più alti rispetto ad A₈ solo nelle due frequenze più alte, ma nelle frequenze più basse il campione A₈ presenta ancora i valori più alti di modulo.
- Il Black diagram esprime la variazione della norma del modulo complesso $|E^*|$ in funzione dell'angolo di fase corrispondente. Poiché il materiale si avvale del principio di sovrapposizione tempo – temperatura, la curva che si ottiene è unica e caratteristica della miscela testata. Nei grafici 4-13 e 4-16 ottenuti con

i campioni testati, si evidenzia un diverso comportamento della miscela bituminosa alle temperature alte (40°C).

Per quanto riguarda il raggruppamento, poiché i tre campioni condividono la stessa miscela bituminosa, viene interpretato che non vi sono differenze significative tra loro.

4.3.4 Flow Number

La prova di Flow Number consente di valutare mediante un metodo empirico la suscettibilità alla deformazione permanente dei campioni.

Tramite l'impiego della AMPT sono stati testati 6 campioni con un'altezza di 150 mm e un diametro pari a 100 mm. Tali campioni sono stati compattati tramite la pressa giratoria e successivamente carotati per ottenere le dimensioni adeguate alla prova di Flow Number. Due temperature di prova sono state definite in base alla normativa per testare i campioni (40°C e 60°C). Sono stati testati tre cuori di campioni a 40°C e gli altri tre a 60°C.

La durata massima della prova è di circa 2 ore per ciascun campione testato a 40°C e nel caso dei campioni testati a 60°C la durata è di circa 20 minuti. Prima di cominciare la prova, è stato impostato un numero massimo di cicli pari a 15000. Si ha un ciclo al secondo. Comunque, in tutti i campioni testati la prova è sempre terminata prima a causa del raggiungimento della massima deformazione.

Le tabelle seguenti mostrano un riepilogo dei principali risultati del test Flow Number per le due temperature applicate. I risultati specifici dei test di Flow Number per ciascun campione appaiono in dettaglio nella sezione Allegati.

ID	Flow Number	Francken Model Fitted	Deformazione permanente a FN
[-]	[cicli]	[cicli]	[ε_p]
A₂	3573	3111	19860
A₃	2960	3310	22457
A₄	2559	3356	19014
Media	3031	3259	20444
Dev.St.	511	130	1794

Tabella 4-15: Riassunto dei risultati del test di Flow Number a 40°C



Figura 4-17: Campione testato a 40°C

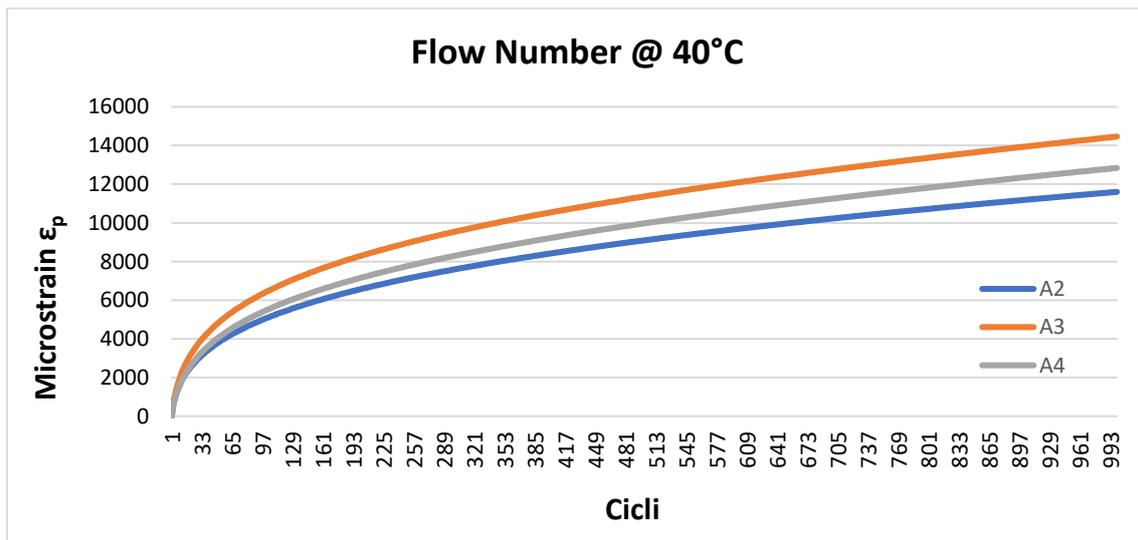


Figura 4-18: Deformazione permanente cumulata vs ciclo di carico per miscela bituminosa testata a 600 kPa a 40°C - Fase primaria della curva di deformazione permanente

ID	Flow Number	Francken Model Fitted	Deformazione permanente a FN
[-]	[cicli]	[cicli]	[ε _p]
A ₆	279	299	22450
A ₇	297	347	22907
A ₈	485	595	22074
Media	354	414	22477
Dev.St.	114	159	417

Tabella 4-16: Riassunto dei risultati del test di Flow Number a 60°C



Figura 4-19: Campione testato a 60°C

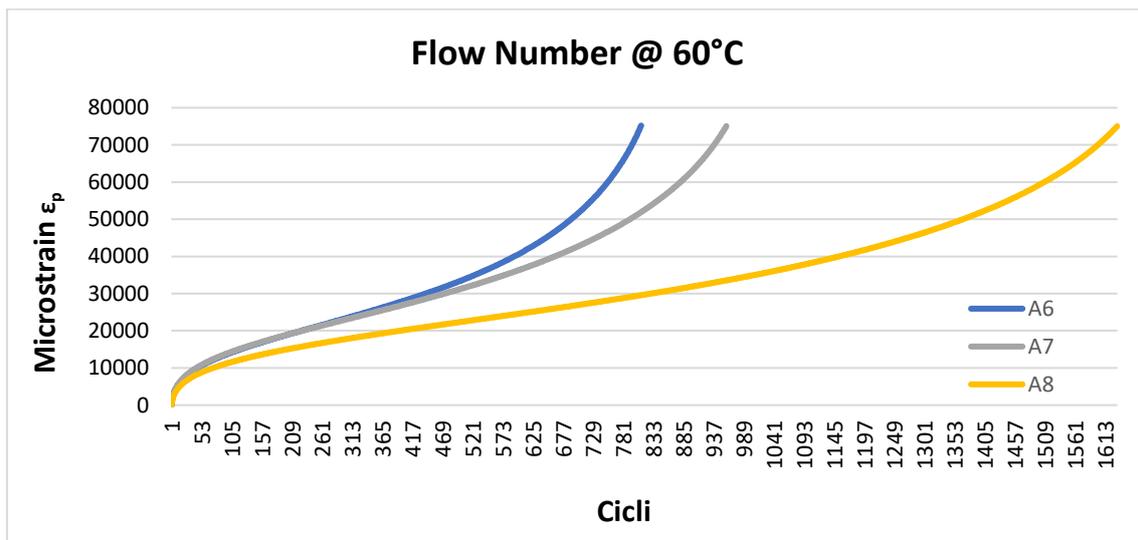


Figura 4-20: Deformazione permanente cumulata vs ciclo di carico per miscela bituminosa testata a 600 kPa a 60°C

Per quanto riguarda le Tabelle 4-15 e 4-16 e i grafici, sono elencate le seguenti conclusioni:

- Il numero più alto di cicli medi è stato registrato per i campioni testati a 40°C, in cui sono stati segnalati 3259 cicli impiegando il modello di Francken. Per i campioni testati a 60°C, è stata ottenuta una media di 414 cicli utilizzando lo stesso modello.
- Per quanto riguarda le deformazioni misurate nel test di Flow Number, i risultati sono coerenti in termini di tendenza mostrata per il Flow Number. La prova testata

a 40°C ha riportato la minima deformazione e infine, la massima deformazione è stata ottenuta con la prova testata a 60°C raggiungendo un valore medio di 22477.

- La massima variabilità riportata nei risultati del Flow Number è stata ottenuta nel test a 40°C, sia nel numero di cicli che nei valori di deformazione.
- Nei grafici si illustrano come i campioni di una stessa miscela bituminosa aventi le stesse caratteristiche compositive hanno comportamenti diversi a differenti temperature. Nel caso dei campioni A₂, A₃ e A₄ mostrano migliori prestazioni a temperature di esercizio della pavimentazione più basse in quanto la condotta della miscela bituminosa risulta essere più rigida.
- Inevitabilmente si può vedere che, aumentando la temperatura il valore del Flow Number tende a diminuire.
- È possibile osservare che i valori medi del Flow Number ottenuti a 40°C e 60°C rispettano i valori minimi richiesti dalla normativa. Nella seguente tabella si riportano i requisiti minimi raccomandati per il Flow Number.

Traffic Level Million ESALs	Minimum Flow Number Cycles
< 3	---
3 to < 10	53
10 to < 30	190
≥ 30	740

Figura 4-21: Requisiti minimi per il Flow Number medio

4.3.4.1 Modellazione del comportamento di deformazione permanente trifase delle Miscele di Conglomerato Bituminoso

In questa sezione della tesi, abbiamo cercato di indentificare le tre fasi che si sviluppano in una curva di deformazioni permanenti di un campione di conglomerato bituminoso, testato con L'AMPT, mediante la determinazione dei punti di transizione tra le fasi e dove il valore terziario (FN) è possibile ottenerlo dal test di Flow Number.

Per determinare ciascuna fase della curva, sono stati utilizzati i passaggi spiegati sopra nel capitolo 3. Sono state analizzate 6 curve ottenute dai test Flow Number, di cui 3 provengono dai campioni testati a 40°C e il resto proviene dai campioni testati a 60°C.

Nei grafici seguenti sono illustrati le fasi della curva di deformazioni permanenti ottenuti per ogni campione.

Campione A₂

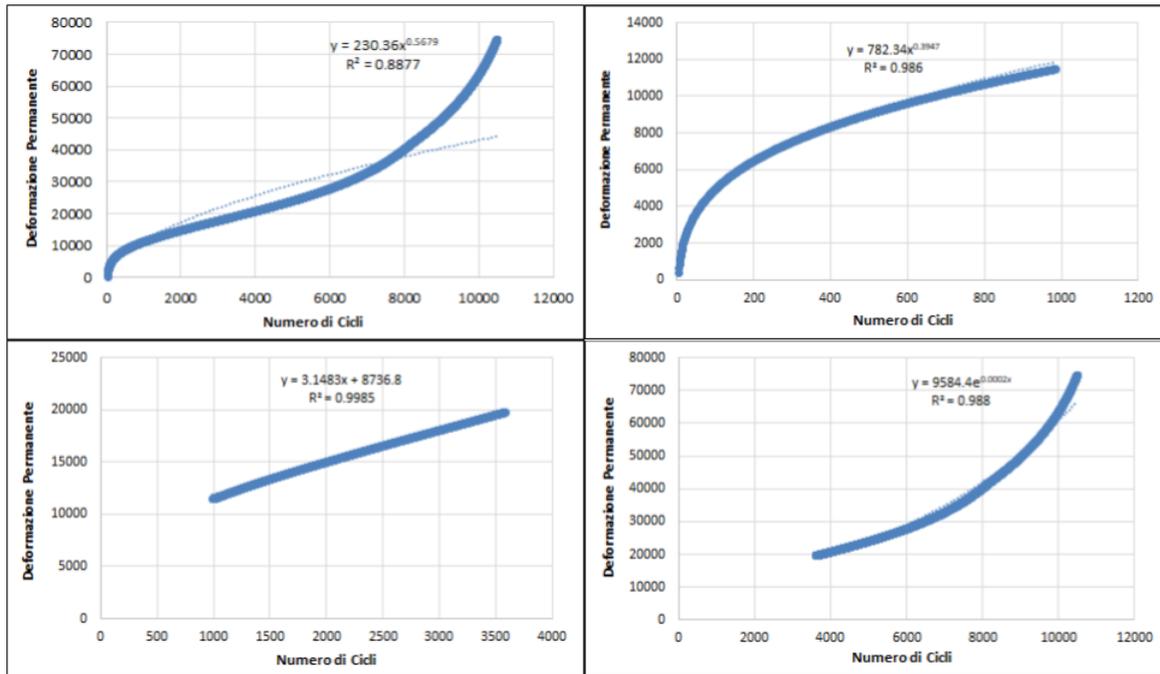


Figura 4-22: Modello reale di Campione A₂ testato a 40°C

Campione A₃

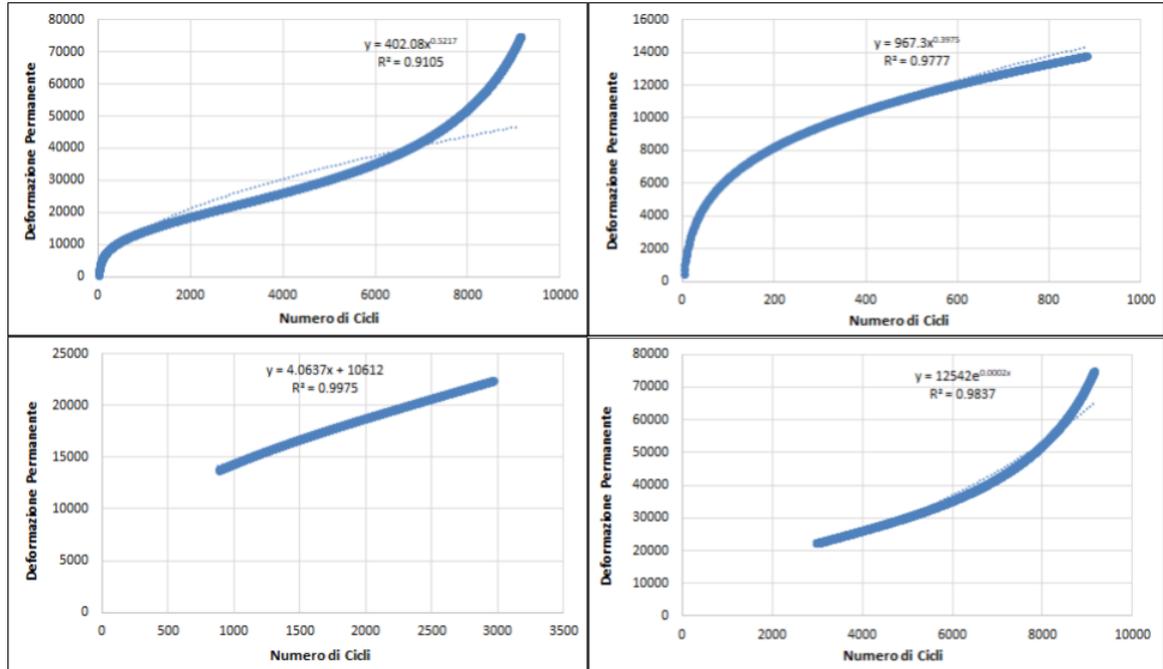


Figura 4-23: Modello reale di Campione A₃ testato a 40°C

Campione A₄

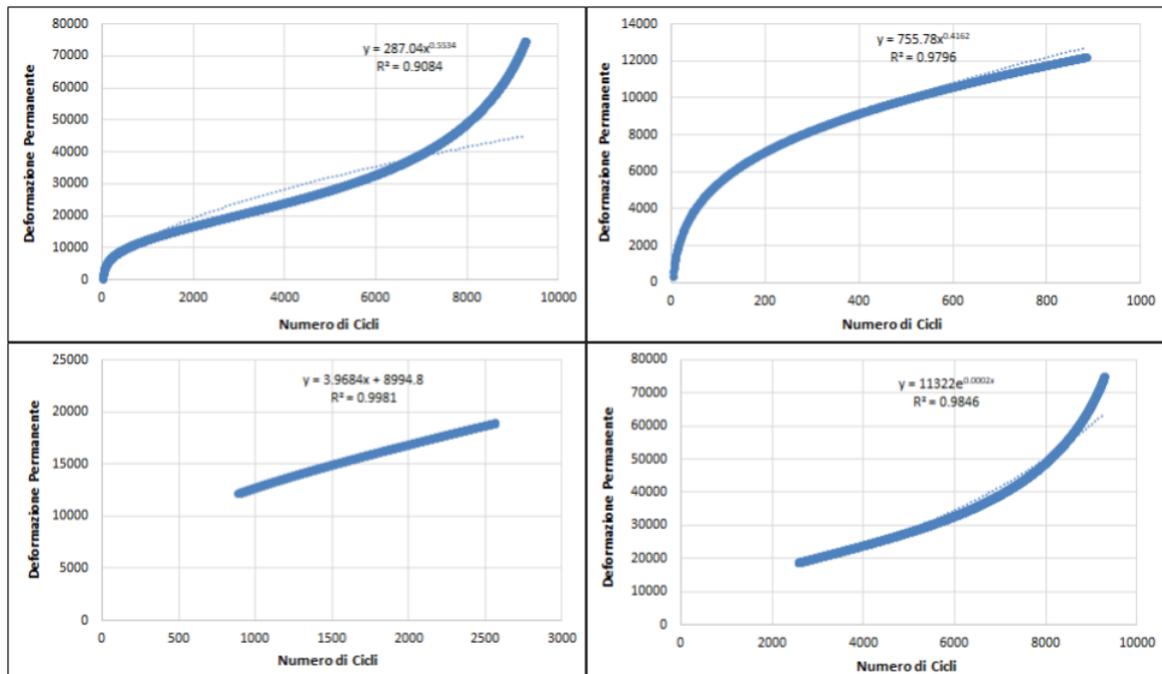


Figura 4-24: Modello reale di Campione A₄ testato a 40°C

Campione A₆

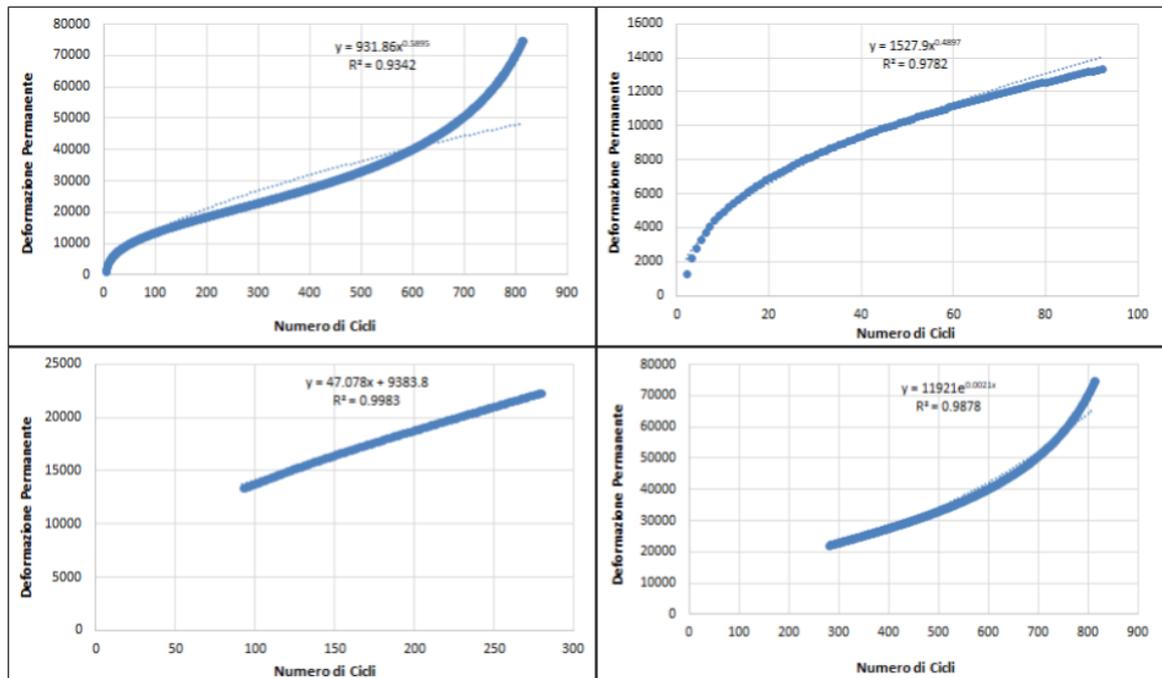


Figura 4-25: Modello reale di Campione A₆ testato a 60°C

Campione A₇

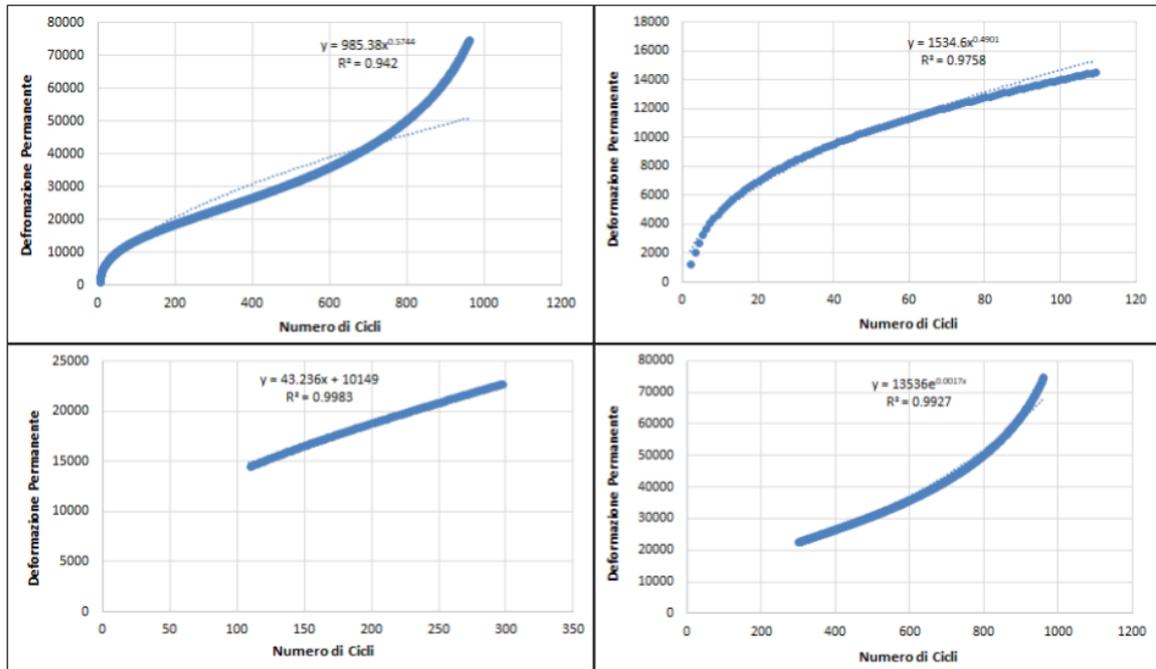


Figura 4-26: Modello reale di Campione A₇ testato a 60°C

Campione A₈

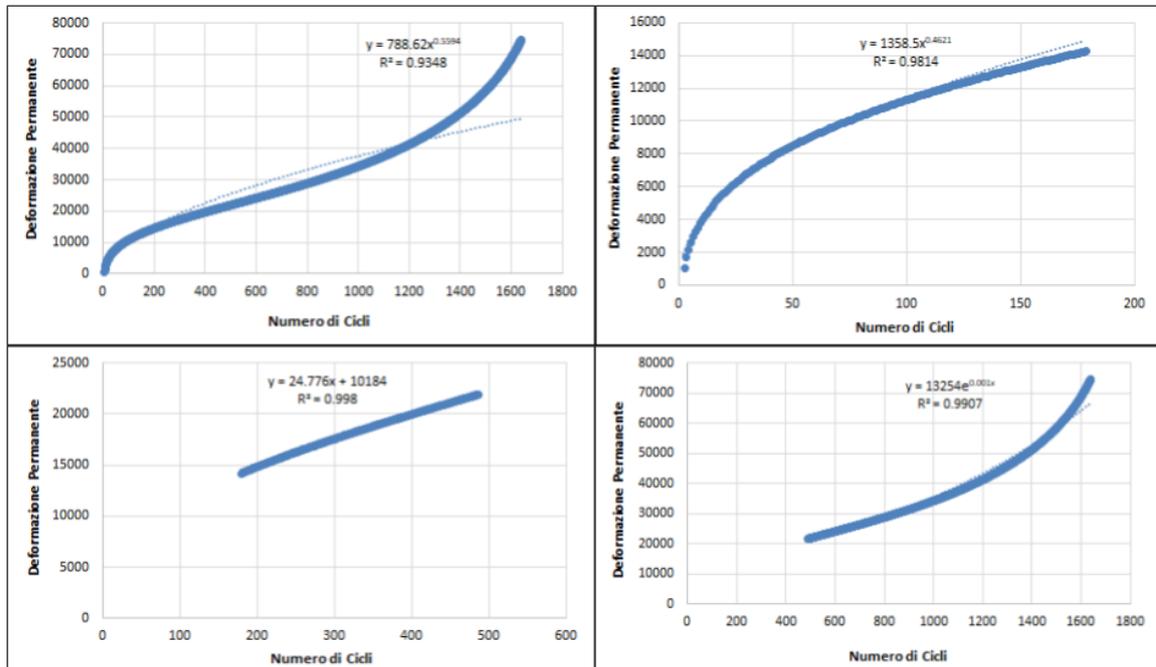


Figura 4-27: Modello reale di Campione A₈ testato a 60°C

Nella seguente tabella sono elencate le espressioni dei modelli ottenuti per ciascuna fase di ciascun campione analizzato.

Temp [°C]	ID [-]	Fase Primaria		Fase Secondaria		Fase Terziaria
		Modello	Punto Finale	Modello	Punto Finale (FN)	Modello
40°C	A ₂	$\epsilon_p=782.34N^{0.3947}$	N _{PS} =983	$\epsilon_p=11872.89+3.1483(N-983)$	N _{ST} =3573	$\epsilon_p=20026.99+9584.4(e^{0.0002(N-3573)}-1)$
	A ₃	$\epsilon_p=967.3N^{0.3975}$	N _{PS} =880	$\epsilon_p=14321.65+4.0637(N-880)$	N _{ST} =2960	$\epsilon_p=22774.15+12542(e^{0.0002(N-2960)}-1)$
	A ₄	$\epsilon_p=755.78N^{0.4162}$	N _{PS} =883	$\epsilon_p=12720.50+3.9684(N-883)$	N _{ST} =2559	$\epsilon_p=19371.54+11322(e^{0.0002(N-2559)}-1)$
60°C	A ₆	$\epsilon_p=1527.9N^{0.4897}$	N _{PS} =92	$\epsilon_p=13988.20+47.078(N-92)$	N _{ST} =279	$\epsilon_p=22791.79+11921(e^{0.0021(N-279)}-1)$
	A ₇	$\epsilon_p=1534.6N^{0.4901}$	N _{PS} =109	$\epsilon_p=15294.59+43.236(N-109)$	N _{ST} =297	$\epsilon_p=23422.96+13536(e^{0.0017(N-297)}-1)$
	A ₈	$\epsilon_p=1358.5N^{0.4621}$	N _{PS} =178	$\epsilon_p=14892.88+24.776(N-178)$	N _{ST} =485	$\epsilon_p=22499.11+13254(e^{0.001(N-485)}-1)$

Figura 4-28: Riassunto dei modelli per ciascuna fase di ciascun campione analizzato

Analisi e commenti dei modelli ottenuti per ciascun campione testato a 40°C e a 60°C:

- Per ogni campione, i parametri sono molto simili. C'è una variazione minima tra i valori, poiché il contenuto di vuoti dei campioni non è uguale.
- Per i tre campioni testati a 40°C, il modello per ciascuno tratto è molto simile. Le variazioni del parametro “a” tra 700 e 900, sono legati ai vuoti reali dei campioni. Il materiale è eterogeneo, dunque non possiamo avere lo stesso valore. Per i campioni testati a 60°C valgono le stesse considerazioni.
- I valori del parametro “c”, nella fase secondaria, sono simili tanto per campioni a 40°C che a 60°C. Tale parametro indica il creep rate (velocità creep) cioè, la velocità di accumulo delle deformazioni, dove nel caso dei campioni a 40°C si garantisce quindi un accumulo di deformazioni più lento. È desiderabile un materiale che permanga nella seconda fase il più a lungo possibile e la cui pendenza della retta di interpolazione sia la più bassa e lunga possibile quindi tendente all'orizzontale così da assicurare uno sviluppo delle deformazioni permanenti lento nel tempo.
- I valori di ϵ_{ST} sono sempre simili raggiungendo cicli diversi e le condizioni di flusso molto simile a un istante di temperatura.
- Il parametro “d” è simile per i tre campioni, ad ogni temperatura di prova, perché dal creep terziario in poi il materiale è in condizione di flusso, cioè, ci aspettiamo lo stesso comportamento una volta che il materiale arriva al flusso.

- Nei campioni testati a 60°C, quello che è diverso è il valore del parametro “f”. Tale parametro del modello è la costante di crescita, cioè è la frequenza (numero di volte per unità di tempo) con cui la curva cresce. Ciò significa che all’aumentare questo parametro, il materiale si deforma di più e le deformazioni sono maggiori.
- La tabella di riassunto serve per fare il ragionamento su ritenere valido modellare il comportamento con ci la media dei parametri.

Una volta determinati i modelli delle fasi della curva di ciascun campione testato, è stato effettuato un confronto tra la curva reale e la curva modellata di ogni campione. Le curve modellate dei campioni con i valori di cicli impiegati per ogni curva, sono dettagliati nella sezione di allegati. I risultati ottenuti dal confronto sono illustrati di seguito nei seguenti grafici:

Curva modello reale vs curva modellata per campioni testati a 40°C

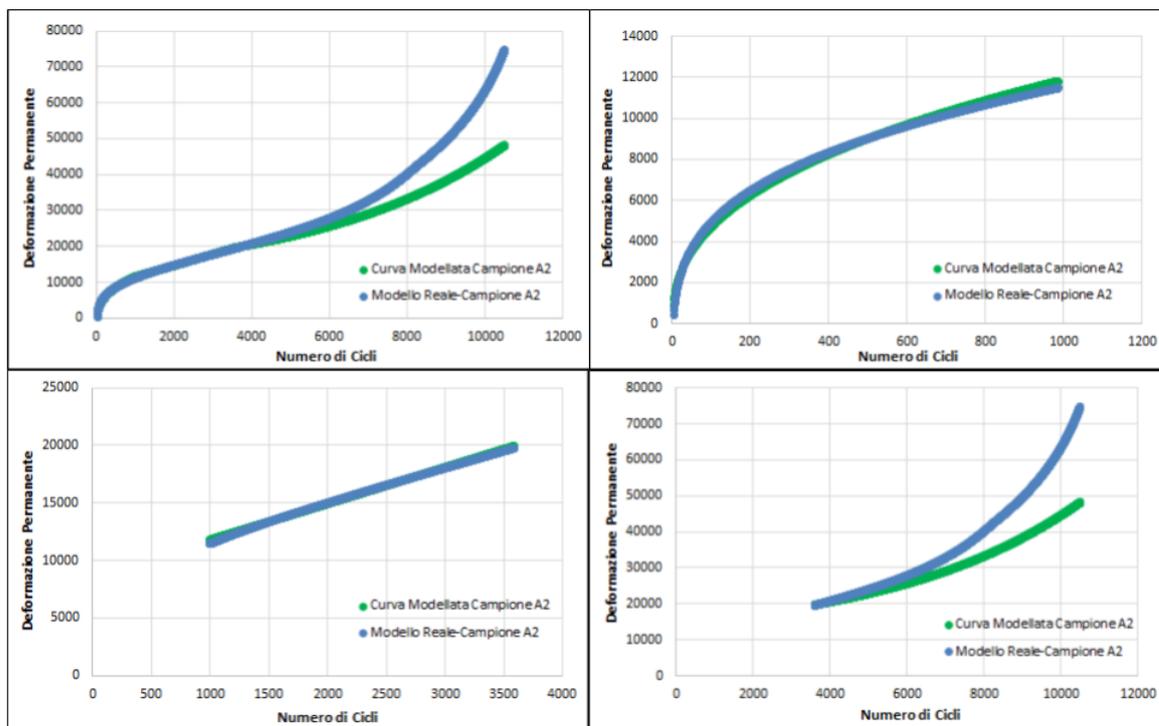


Figura 4-29: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₂

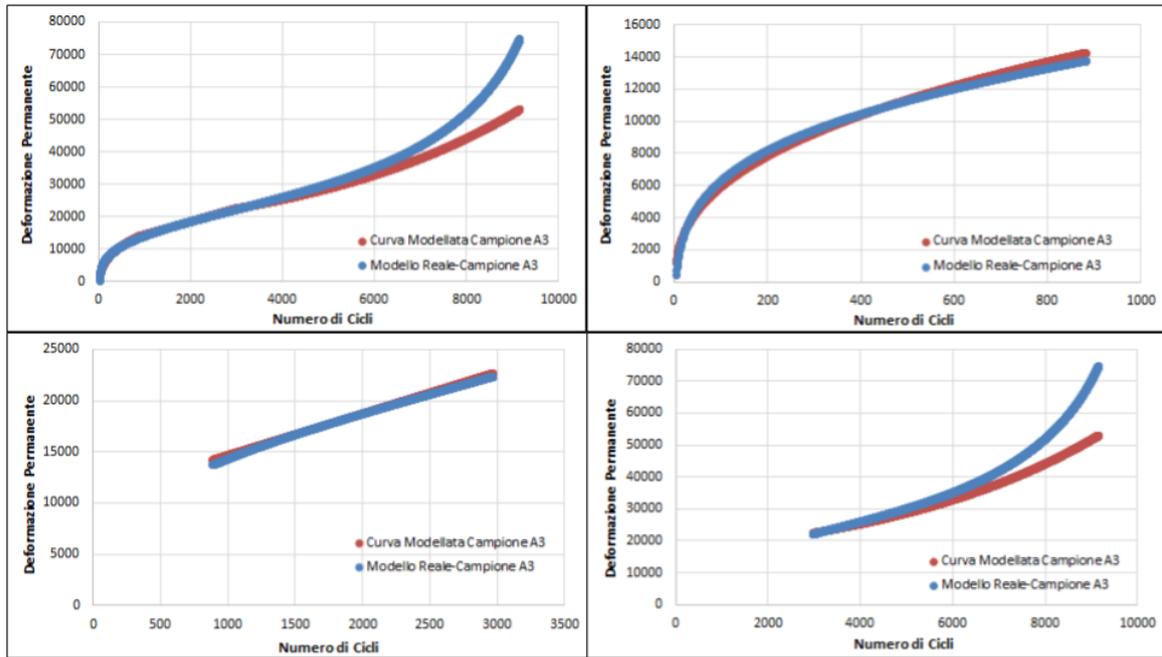


Figura 4-30: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₃

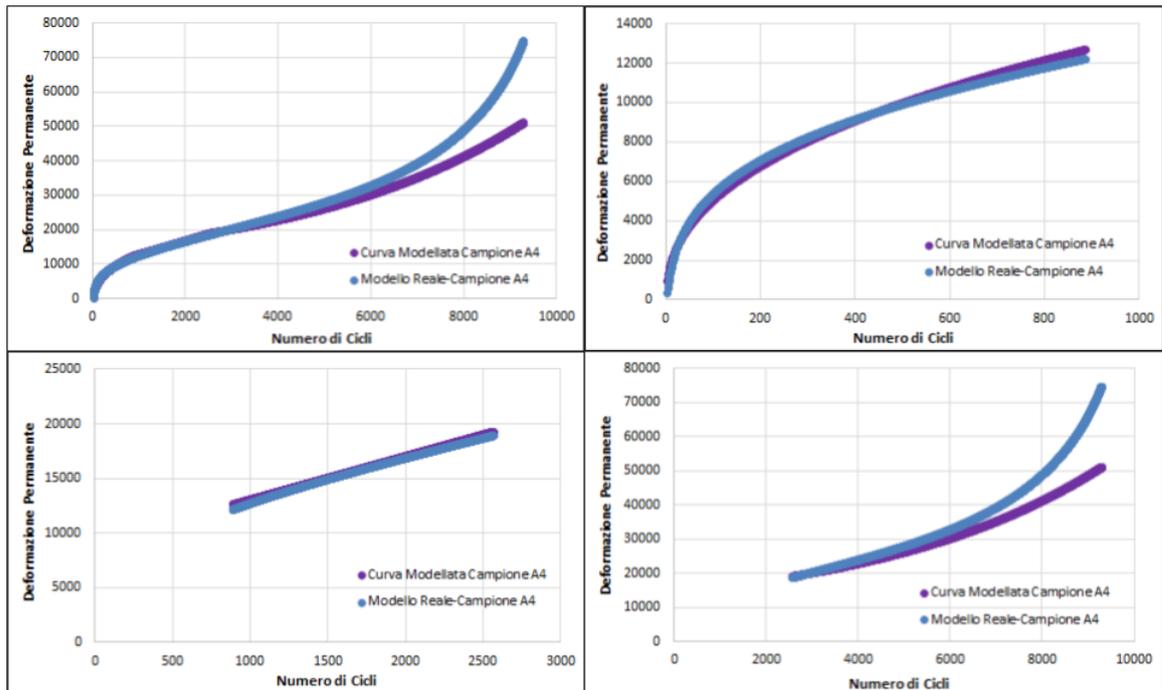


Figura 4-31: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₄

Curva modello reale vs curva modellata per campioni testati a 60°C

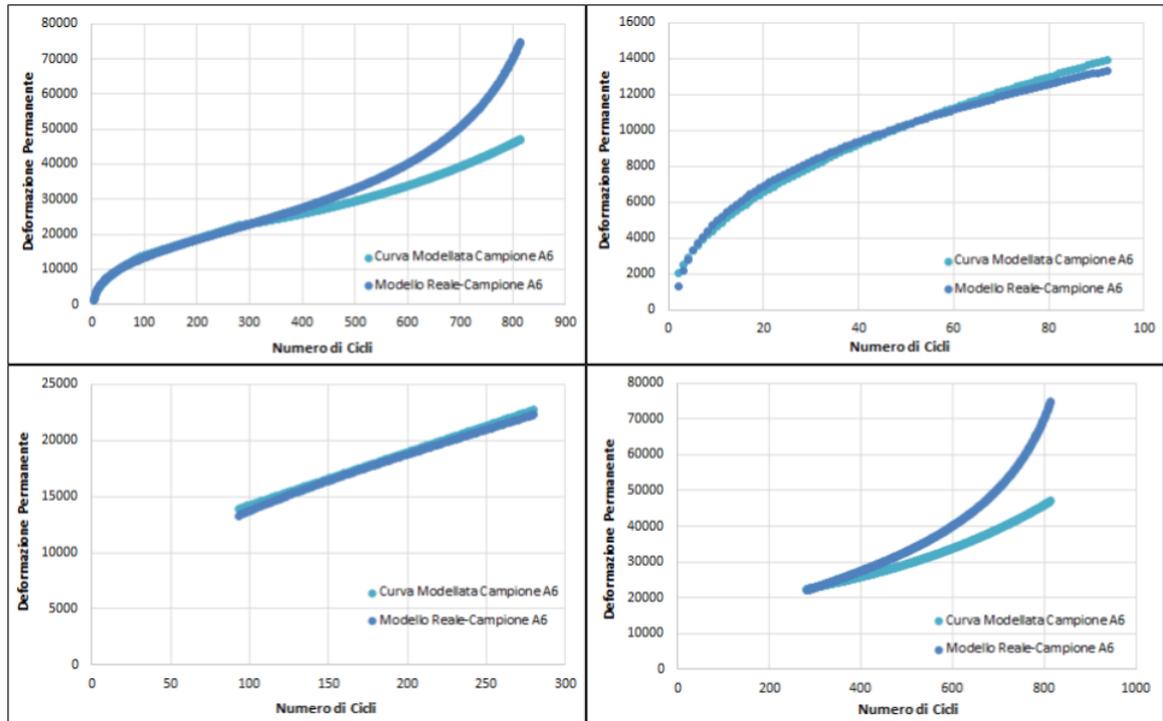


Figura 4-32: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₆

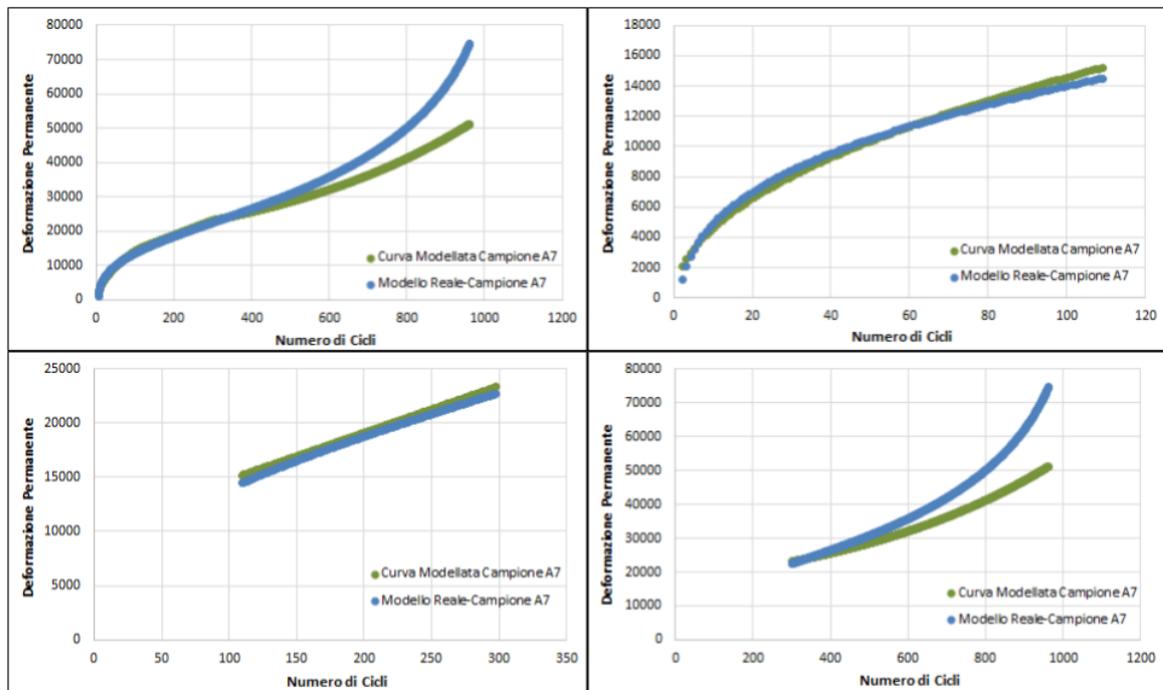


Figura 4-33: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₇

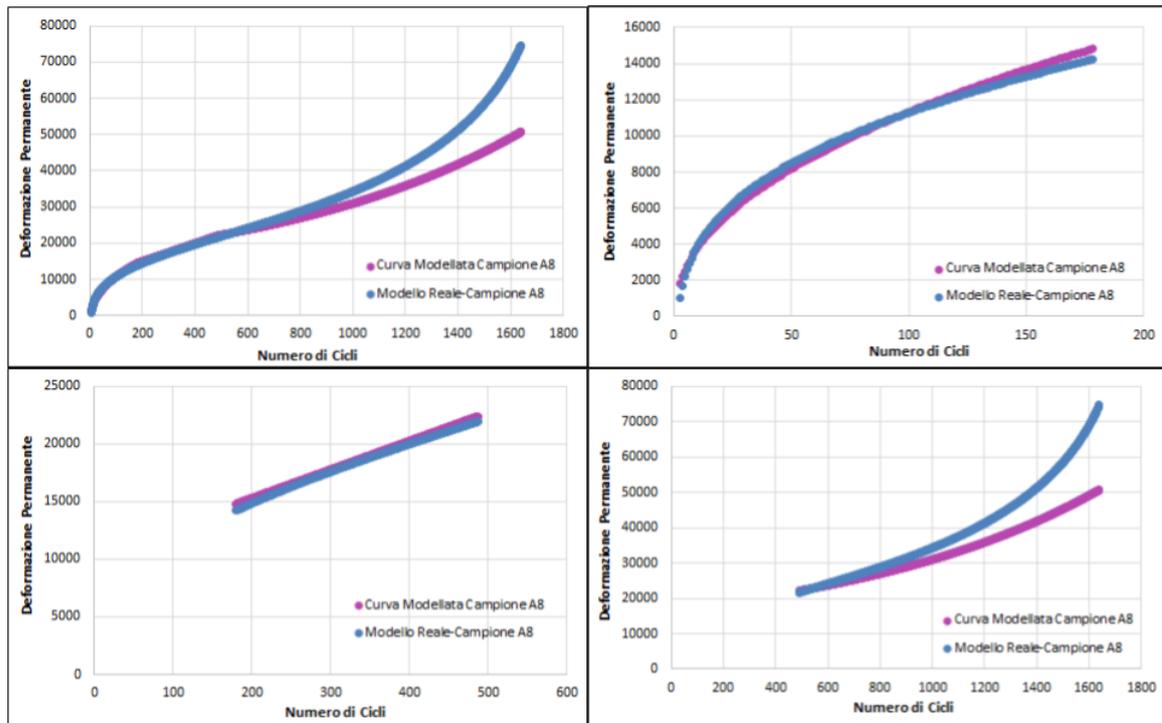


Figura 4-34: Confronto tra curve del modello reale e curve modellate di Campione A₈

Analisi e commenti del confronto ottenuto tra la curva di modello reale e la curva modellata di ogni campione ottenuto a 40°C e a 60°C:

- È possibile osservare che i valori sono simili tra i modelli confrontati, mentre nella fase terziaria è inevitabile che ci sia una notevole variazione con il modello reale. A quel punto, il materiale è collassato, no segue più una legge di variazione.
- Ci sono eventuali variazioni per eterogeneità del materiale, poiché il contenuto dei vuoti nei campioni è sempre diverso.
- Dal Flow Number in poi, in tutte le curve modellate, si osservano alcune variazioni nei campioni perché lì, nel creep terziario, il materiale è più danneggiato nelle condizioni di flusso. Solo interessa modellare bene la fase primaria e secondaria, dal FN in poi il materiale ormai accumula tante deformazioni permanenti, che già giù collassa.
- Questi confronti servono per dimostrare che nei campioni, il modello ci permette di approssimare bene a quello capito nella realtà. Allora è possibile per quella miscela a quella temperatura, utilizzare una curva modellata media unica.

Visto che effettivamente i campioni presentano una modellazione molto simile, è affidabile modellare una curva media di tre tratti con i valori medi dei parametri a , b , ϵ_{PS} , c , ϵ_{ST} , d e f e confrontarla poi, una sopra l'altra, con la altra temperatura di prova. Questa analisi è stata eseguita per entrambi temperature, a 40°C e a 60°C .

Le seguenti immagini illustrano, per ciascuna temperatura, i tratti della curva modellata media e poi le tabelle riassumono le espressioni finali del modello effettuato con i valori medi dei parametri.

Curva modellata media a 40°C

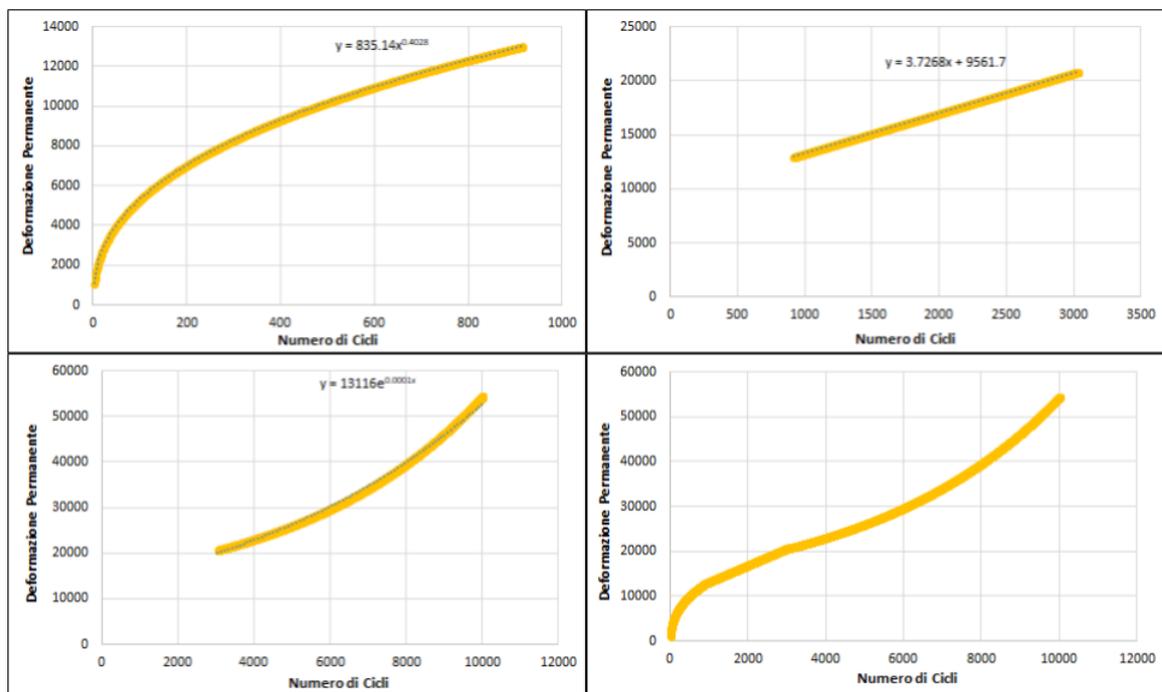


Figura 4-35: Fasi della curva modellata media a 40°C

Curva di andamento modellata				
Parametri	Media	Fase Primaria	Fase Secondaria	Fase Terziaria
a	835.14	$\epsilon_p = 835.14N^{0.4028}$	$\epsilon_p = 12971.68 + 3.7268(N-915)$	$\epsilon_p = 20724.23 + 11149.47(e^{0.0002(N-3031)} - 1)$
b	0.4028			
ϵ_{PS}	12971.68			
c	3.7268			
N_{PS}	915			
N_{ST}	3031			
ϵ_{TS}	20724.23			
d	11149.47			
f	0.0002			
$N_{\text{cicli finali}}$	9619			

Tabella 4-17: Riassunto delle espressioni del modello della curva modellata media a 40°C

Curva modellata media a 60°C

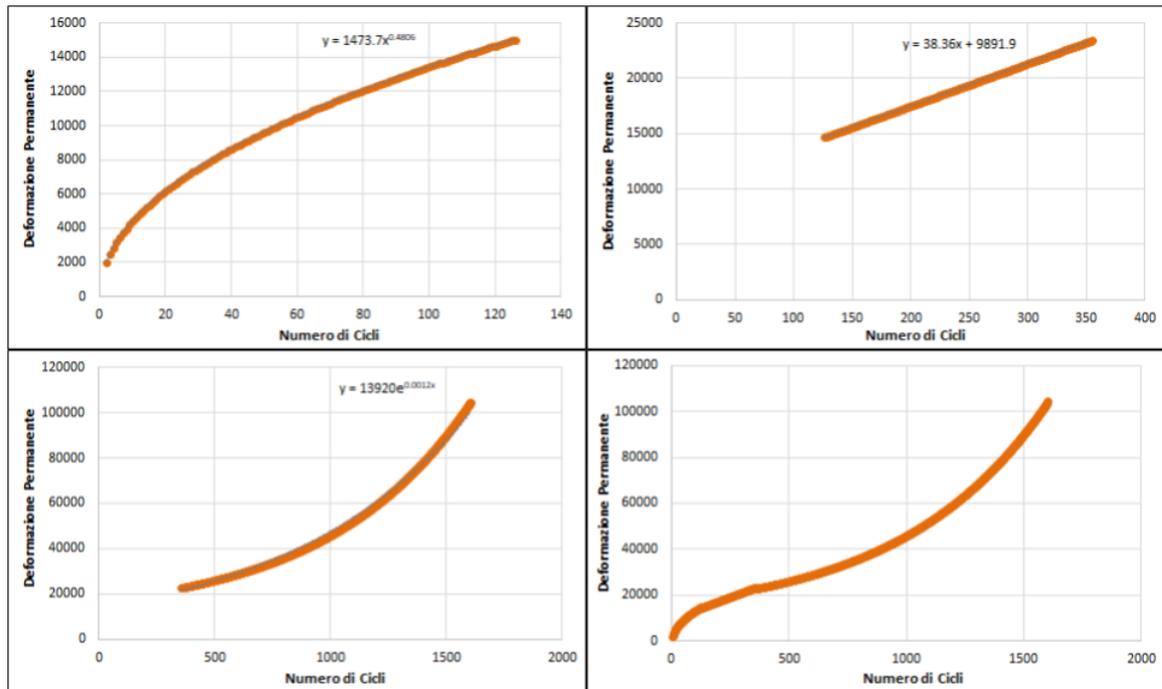


Figura 4-36: Fasi della curva modellata media a 60°C

Curva di andamento modellata				
Parametri	Media	Fase Primaria	Fase Secondaria	Fase Terziaria
a	1473.67	$\epsilon_p = 1473.67N^{0.4806}$	$\epsilon_p = 14725.22 + 38.36(N-126)$	$\epsilon_p = 22904.62 + 12903.67(e^{0.0016(N-354)} - 1)$
b	0.4806			
ϵ_{PS}	14725.22			
c	38.36			
N_{PS}	126			
N_{ST}	354			
ϵ_{TS}	22904.62			
d	12903.67			
f	0.0016			
$N_{cicli\ finali}$	1135			

Tabella 4-18: Riassunto delle espressioni del modello della curva modellata media a 60°C

Nella terza parte di questa analisi, è stato effettuato il confronto tra le curve modellate medi a 40°C e a 60°C per ogni fase del modello, con il fine di vedere cosa succede nel creep primario, secondario e terziario. Nelle immagini seguenti, vengono mostrati i confronti per ciascuna fase del modello.

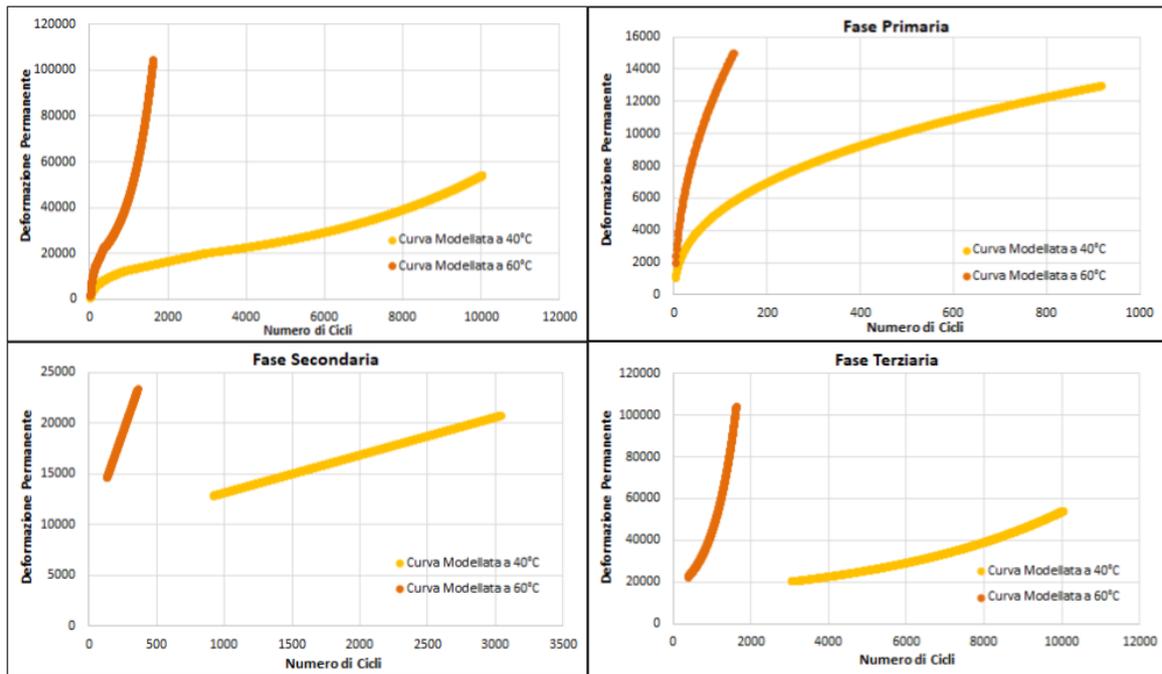


Figura 4-37: Confronto tra curve modellate a 40°C e a 60°C per ogni fase del modello

Analisi e commenti per ogni tratto delle curve analizzate:

- Creep Primario: aumenta la temperatura, diminuisce il numero di cicli che ci porta all'inizio del creep secondario, perché aumenta la pendenza quindi succede che il materiale si deforma più velocemente.
- Creep Secondario: è possibile osservare che aumentando la temperatura, i tratti sono più stretti sempre, nel caso a 60°C la pendenza è maggiore, perché ovviamente si arriva molto prima che la fase terziaria, però possiamo dire che più meno si mantengono le proporzioni. È desiderabile un materiale che permanga nella seconda fase il più a lungo possibile e la cui pendenza della retta di interpolazione sia la più bassa possibile, così da assicurare uno sviluppo delle deformazioni permanenti lento nel tempo.
- Creep Terziario: aumenta la temperatura e quindi l'esponente del modello aumenta più velocemente. In questo caso viene anticipato il creep secondario e quindi la fase terziaria inizia prima, perché il materiale si deforma di più e le deformazioni sono maggiori.

Questa analisi è stata effettuata e le curve modellate sono state confrontate per cercare di capire se relativamente poi, i valori sono mantenuti nella stessa proporzione. In questo lavoro di tesi, solo una semplice proporzione è stata fatta attraverso le espressioni:

$$\begin{array}{l}
 - 40^{\circ}\text{C:} \quad \frac{N_{PS}}{N_{ST}} \times 100 = 30.2 \% \quad \frac{N_{ST}-N_{PS}}{N_{ST}} \times 100 = 69.8 \% \\
 - 60^{\circ}\text{C:} \quad \frac{N_{PS}}{N_{ST}} \times 100 = 35.6 \% \quad \frac{N_{ST}-N_{PS}}{N_{ST}} \times 100 = 64.4 \%
 \end{array}$$

Dove i valori di N_{PS} e N_{ST} sono ottenuti dalla media dei tre campioni per ciascuna temperatura.

Analizzando queste percentuali possiamo dire che il contributo dei tre creep è quasi lo stesso, cioè relativamente la durata percentuale è simile. In questo modo, è possibile sapere rispetto all'inizio della fase terziaria quale è la durata delle altre due fasi relativamente. Quindi aumentando o diminuendo la temperatura, il contributo degli altri due fasi del creep è quasi lo stesso. Se aumenta la temperatura, abbiamo un Flow Number più basso perché la fase terziaria inizia prima però la fase primaria e secondaria si mantengono nella stessa proporzione. Cioè, dato un materiale, la temperatura semplicemente è un fattore di scala.

4.3.4.2 *Analisi del rapporto FN-Ormaiamento*

In quest'ultima parte del lavoro di tesi, abbiamo effettuato un'analisi che è basata nel rapporto tra i valori ottenuti con la modellazione delle curve di deformazioni permanenti (Flow Number e N_{PS}) con rispetto alle percentuali della profondità della ormaia misurati nelle lastre testate con il Wheel Tracking Test.

Nella tabella e figura seguente si illustrano i rapporti tra Flow Number con rispetto a P_i e N_{PS} con P_i :

	Temp	F	Pi	Numero di Cicli
	[°C]	[Cicli]	[%]	
FN	40	3031	1.5	1000
	60	354	3.9	
N _{PS}	40	915	1.5	
	60	126	3.9	
FN	40	3031	1.9	3000
	60	354	4.5	
N _{PS}	40	915	1.9	
	60	126	4.5	
FN	40	3031	2.4	10000
	60	354	5	
N _{PS}	40	915	2.4	
	60	126	5	
FN	40	3031	2.8	30000
	60	354	5.4	
N _{PS}	40	915	2.8	
	60	126	5.4	

Tabella 4-19: Riepilogo dei valori ottenuti nelle prove di Flow Number e di Ormaiamento alle due temperature di analisi

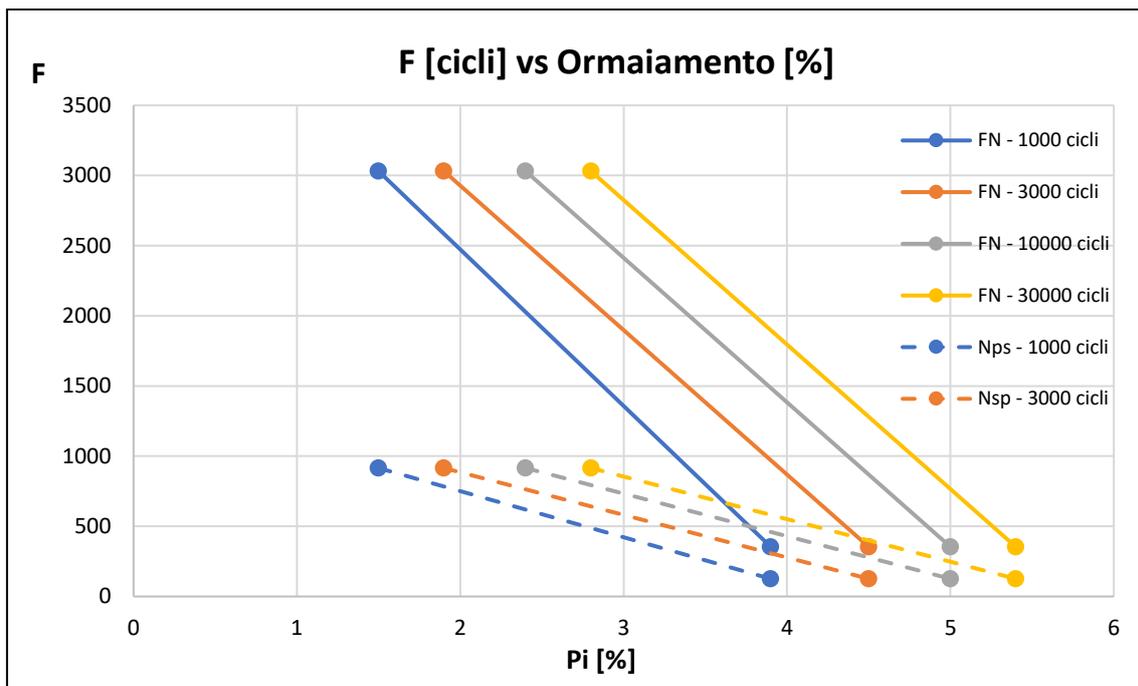


Figura 4-38: Rapporto tra i valori di Flow Number e N_{PS} , alle due temperature di prova, con rispetto ai % Pi per ogni numero di cicli valutati

Abbiamo eseguito l'analisi e si può vedere che il rapporto che c'è all'aumentare del numero di passaggio del rullo, tra F e % Pi, si mantiene più o meno costante. Inoltre, le rette sembrano tutte parallele. Cioè, i rapporti che ci sono fra N_{PS} e Flow Number con rispetto a %Pi si mantengono costanti perché la fase di creep primario e secondario sono solo scalate alle varie temperature.

CAPITOLO 5

5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha cercato di approfondire il comportamento di una miscela di conglomerato bituminoso nei confronti del fenomeno dell'accumulo delle deformazioni permanenti.

L'indagine sperimentale condotta ha avuto come oggetto una miscela bituminosa per strato di usura, da adottare in una pavimentazione interessata da elevato traffico pesante.

Parallelamente ad un'analisi tradizionale condotta mediante prove di ormaiamento (con metodologia wheel-tracker) e Flow Number, si è cercato di comprendere meglio il comportamento del materiale modellando matematicamente i risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

A tal fine, i dati desunti dalle prove di compressione monoassiale a carico ripetuto, eseguite per la determinazione del Flow Number, sono stati analizzati al fine di derivare le leggi di variazione delle deformazioni nelle tre fasi tipiche della prova: creep primario, secondario e terziario.

Inoltre, si è cercato di indagare l'esistenza di una legge di correlazione tra i valori ottenuti dalle prove di ormaiamento con metodologia Wheel Tracker e di Flow Number.

Le prove sono state eseguite su campioni addensati con metodologie differenti (compattatore a lastre e pressa a taglio giratoria) ma aventi le medesime caratteristiche di addensamento.

Le prove sono state eseguite a due temperature differenti: 60°C, la tipica temperatura a cui normalmente tali prove sono eseguite, e 40°C, la temperatura a cui si presume il materiale si troverà nelle condizioni di esercizio.

Dall'analisi dei dati ottenuti è possibile concludere:

- La diminuzione della temperatura gioca un ruolo fondamentale nell'accumulo delle deformazioni permanenti poiché le caratteristiche di viscoelasticità del materiale sono radicalmente differenti: temperature inferiori comportano valori di Flow Number più elevati (e inizio della fase terziaria del creep più dilatata nel tempo) proprio a causa di una maggior rigidità del materiale;

- Analogamente, la profondità media dell'ormai si incrementa all'aumentare della temperatura. Nonostante ciò, i valori ottenuti per entrambe le temperature di prove indicano, comunque, che il materiale presenta una buona resistenza nei confronti dell'ormaiamento, soprattutto a causa dell'utilizzo dell'additivo polimerico utilizzato;
- La modellazione del comportamento sotto carico del materiale ha manifestato una buona attinenza con i dati reali, consentendo di discriminare le leggi di variazione delle tre fasi di creep. Si deve sottolineare come la modellazione del creep terziario presenti maggiori difformità con i dati reali, fatto che era preventivabile a causa delle condizioni di flusso (e danneggiamento incontrollato) in cui si trova il campione in tale fase;
- La modellazione ha permesso di osservare come all'aumentare della temperatura l'inizio della fase secondaria e terziaria del creep diminuiscano sensibilmente. Si è però osservato come le durate relative percentuali rimangano pressoché costanti, indicando come la temperatura incida sulla durata del fenomeno ma non sulle modalità con cui esso si manifesta (probabilmente imputabili, invece, alle caratteristiche compositive e volumetriche).

Sviluppi futuri

Utilizzare materiali differenti e maggiori temperature di prova dovrebbe consentire di valutare con più sicurezza l'incidenza della composizione, della volumetria e delle condizioni di prova sullo sviluppo delle varie fasi deformative a cui il materiale è sottoposto sotto carico.

Inoltre, sarebbe opportuno provare ad utilizzare modellazioni matematiche più affidabili che possano permettere di modellare anche la fase terziaria del creep,

Infine, aumentare la base dati potrebbe consentire di trovare possibili leggi di correlazioni tra i parametri desunti dalle due tipologie di prove (wheel tracking e Flow Number).

6 ALLEGATI

Allegati dal capitolo 4

Massa volumica massima (TMD)

ID	Picnometro	M _P	M _{P+M}	M _{P+M+H₂O}	V _P	T	ρ _w	ρ _{mw}
		[g]	[g]	[g]	[m ³]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	P ₁	919.5	1419.1	2593.8	0.001373	21.4	998.0	2544
	P ₂	902.5	1425.2	2602.6	0.001386	21.4	998.0	2537
2	P ₁	919.5	1452.2	2613.3	0.001373	21.1	998.0	2536
	P ₂	901	1417.6	2605.3	0.001394	21.1	998.0	2535
3	P ₁	919.5	1410.6	2587.9	0.001373	22.2	997.8	2537
	P ₂	902.5	1412.3	2594.5	0.001386	20.3	998.2	2530

Media	2537
--------------	-------------

Tabella 6-1: Determinazione della media delle TMD ottenuti con le prove

Analisi granulometrica

SACCO MISCELA 1

TARA	NETTO _{ante} ignizione	LORDO _{ante} ignizione	LORDO _{post} ignizione	NETTO _{post} ignizione	%B _{conglomerato}	%B _{aggregato}
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
2840.5	991.3	3831.8	3778.9	938.4	5.05	5.32

Tabella 6-2: Determinazione del contenuto di Bitume con la Carbolite – Sacco miscela 1

SETACCIO	TRATTENUTO	TRATTENUTO _{prog}	TRATTENUTO _{prog}	PASSANTE _{prog}
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
16	0.0	0.0	0.0	100.0
14	17.5	17.5	1.9	98.1
12.5	44.6	62.1	6.6	93.4
10	81.0	143.1	15.2	84.8
8	67.7	210.8	22.5	77.5
6.3	76.5	287.3	30.6	69.4
4	200.5	487.8	52.0	48.0
2	186.4	674.2	71.8	28.2
1	86.5	760.7	81.1	18.9
0.5	45.0	805.7	85.9	14.1
0.25	32.0	837.7	89.3	10.7
0.125	28.4	866.1	92.3	7.7
0.063	23.9	890.0	94.8	5.2
Filler	48.4			
0	938.4			

Tabella 6-3: Analisi Granulometrica di sacco miscela 1

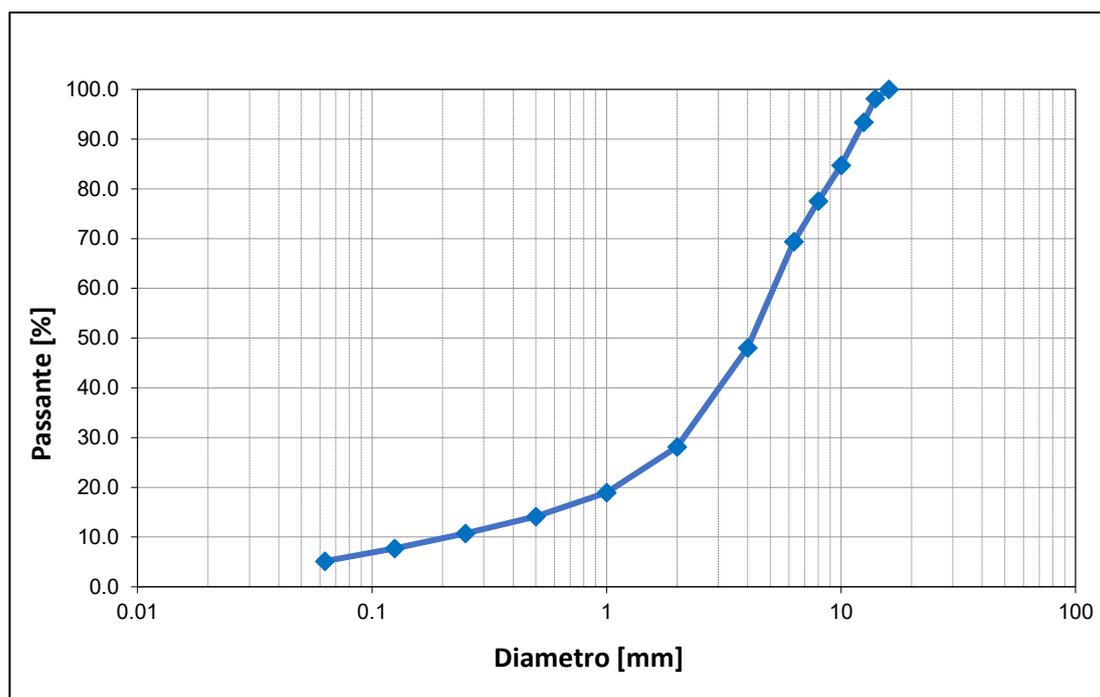


Figura 6-1: Curva granulometrica - Sacco miscela 1

SACCO MISCELA 2

TARA	NETTO _{ante ignizione}	LORDO _{ante ignizione}	LORDO _{post ignizione}	NETTO _{post ignizione}	%B _{conglomerato}	%B _{aggregato}
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
2841.0	1002.5	3843.5	3790.4	949.4	5.01	5.28

Tabella 6-4: Determinazione del contenuto di Bitume con la Carbolite – Sacco miscela 2

SETACCIO	TRATTENUTO	TRATTENUTO _{prog}	TRATTENUTO _{prog}	PASSANTE _{prog}
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
16	0.0	0.0	0.0	100.0
14	0.0	0.0	0.0	100.0
12.5	39.9	39.9	4.2	95.8
10	81.2	121.1	12.8	87.2
8	72.5	193.6	20.4	79.6
6.3	75.4	269.0	28.3	71.7
4	215.5	484.5	51.0	49.0
2	198.2	682.7	71.9	28.1
1	86.5	769.2	81.0	19.0
0.5	44.8	814.0	85.7	14.3
0.25	31.6	845.6	89.1	10.9
0.125	28.8	874.4	92.1	7.9
0.063	22.8	897.2	94.5	5.5
Filler	52.2			
0	949.4			

Tabella 6-5: Analisi Granulometrica di sacco miscela 2

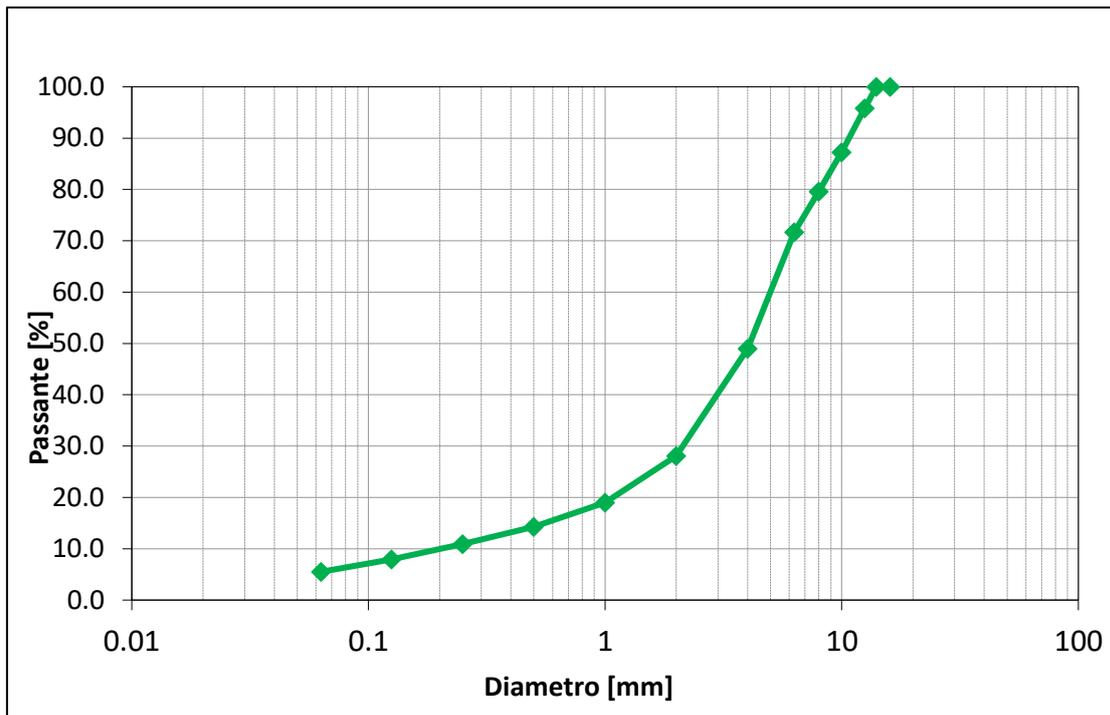


Figura 6-2: Curva granulometrica - Sacco miscela 2

Caratteristiche volumetriche dei campioni confezionati con pressa giratoria

Vengono riportate le curve di compattazione di ogni campione compattato alla temperatura di 150°C con fustella di 100 mm di diametro e numero di giri prestabiliti pari a 180 giri.

Campione G₁

k	C ₁	V ₁₀	V ₁₀₀	V ₁₈₀
8.85	77.4	14.1	4.7	2.8

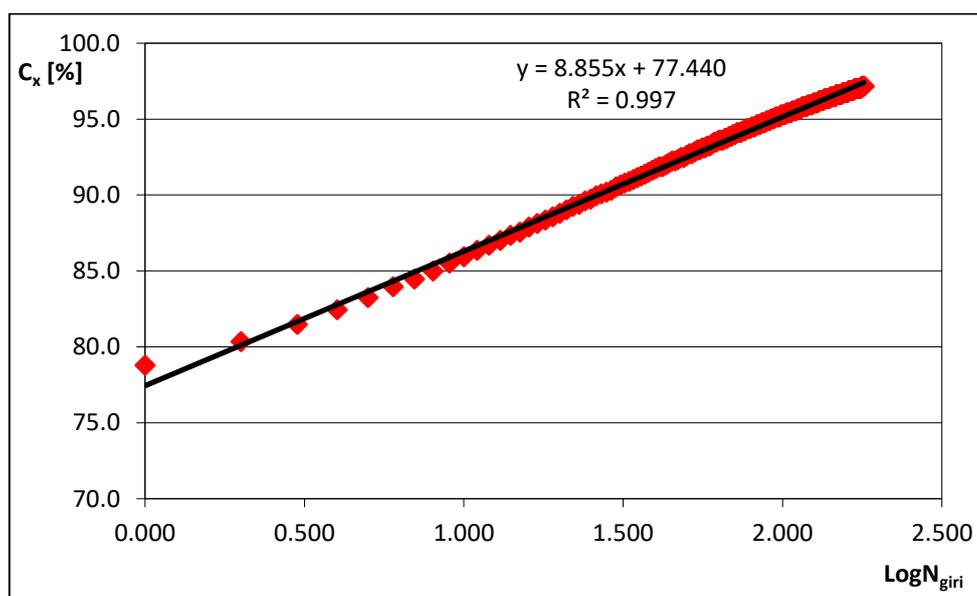
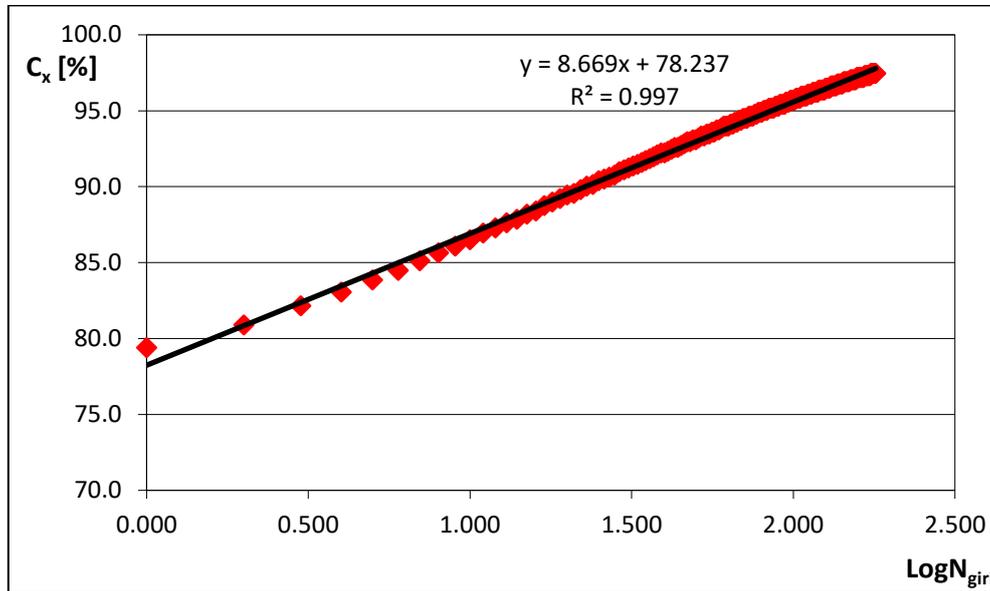


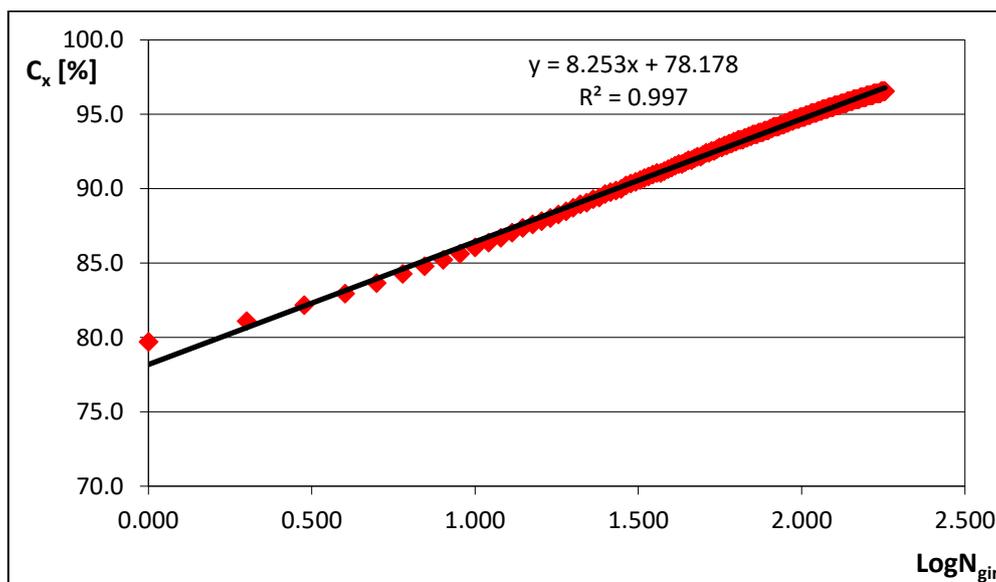
Figura 6-3: Curva di compattazione di miscela bituminosa - Campione G₁

Campione G₂

k	C ₁	V ₁₀	V ₁₀₀	V ₁₈₀
8.67	78.2	13.5	4.3	2.5

Figura 6-4: Curva di compattazione di miscela bituminosa - Campione G₂**Campione G₃**

k	C ₁	V ₁₀	V ₁₀₀	V ₁₈₀
8.25	78.2	13.9	5.2	3.5

Figura 6-5: Curva di compattazione di miscela bituminosa - Campione G₃

Caratteristiche volumetriche dei travetti tagliati

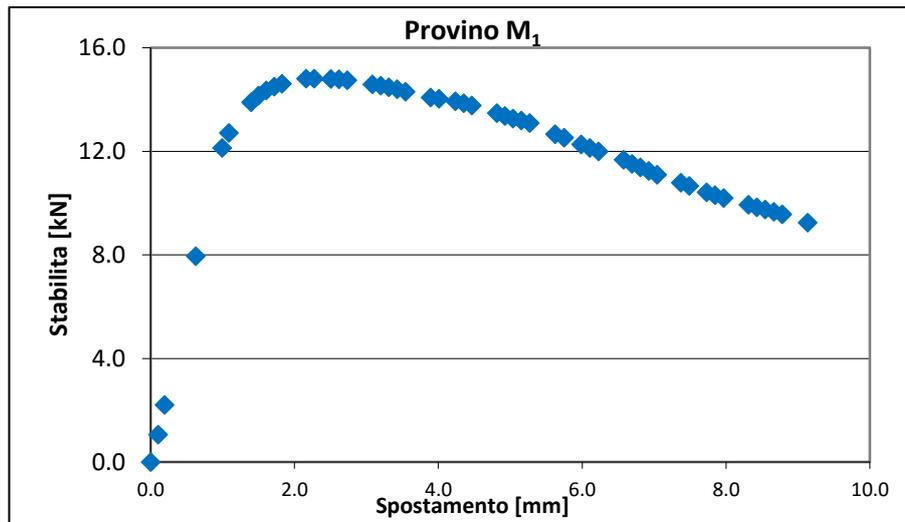
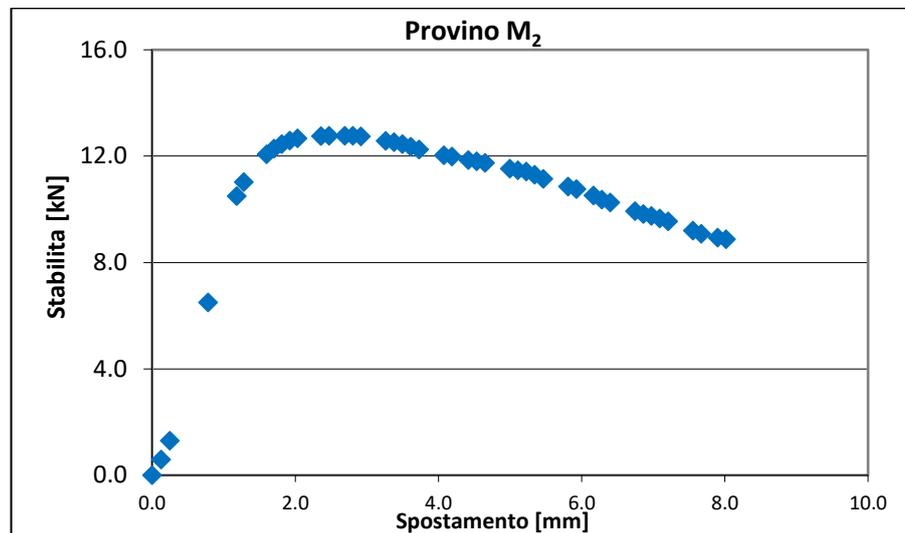
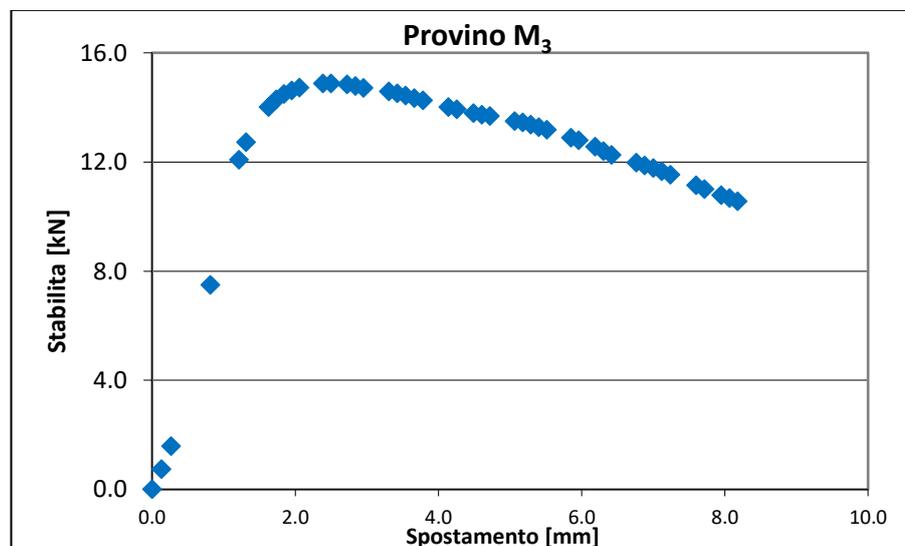
Travetti	m_{aria}	m_{acqua}	m_{SSD}	T	ρ_w	ρ_{SSD}	ρ_{mw}	v
[-]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[%]
T ₁	674.1	394.6	682.2	18.8	998.5	2340	2541	7.9
T ₂	642.6	375.4	649.4	18.8	998.5	2342	2541	7.8
T ₃	674.6	395.9	680.5	18.8	998.5	2367	2541	6.8
T ₄	696.3	407.4	703.0	18.8	998.5	2352	2541	7.4
T ₅	1099.7	641.8	1111.5	18.8	998.5	2338	2541	8.0
T ₆	1085.1	634.5	1093.2	18.8	998.5	2362	2541	7.0
T ₇	1126.5	661.4	1134.7	18.8	998.5	2377	2541	6.5
T ₈	1177.8	692.7	1186.5	18.8	998.5	2382	2541	6.3
T ₉	658.6	387.3	666.9	18.8	998.5	2352	2541	7.4
T ₁₀	660.4	389.8	666.7	18.8	998.5	2381	2541	6.3
T ₁₁	682.2	401.9	688.5	18.8	998.5	2377	2541	6.4
T ₁₂	704.8	414.5	711.7	18.8	998.5	2368	2541	6.8

Tabella 6-6: Massa volumica apparente e % vuoti di travetti tagliati

Caratteristiche volumetriche delle cuore dei campioni carotati

ID	m_{aria}	m_{acqua}	m_{SSD}	T	ρ_w	ρ_{SSD}	ρ_{mw}	v	VMA	VFB
[-]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[%]	[%]	[%]
A ₁	2641.0	1530.8	2645.8	19.9	998.3	2365	2537	6.8	18.1	62.6
A ₂	2661.3	1556.4	2667.0	20.9	998.1	2392	2537	5.7	17.2	66.7
A ₃	2666.3	1550.6	2672.3	20.3	998.2	2373	2537	6.5	17.8	63.8
A ₄	2660.9	1550.7	2666.9	20.3	998.2	2380	2537	6.2	17.6	64.8
A ₅	2635.6	1542.9	2643.8	20.3	998.2	2390	2537	5.8	17.2	66.4
A ₆	2662.5	1554.4	2669.0	20.3	998.2	2384	2537	6.0	17.4	65.6
A ₇	2661.0	1550.3	2668.2	20.3	998.2	2376	2537	6.3	17.7	64.3
A ₈	2662.7	1553.2	2670.7	20.3	998.2	2378	2537	6.2	17.6	64.6

Tabella 6-7: Caratteristiche volumetriche delle cuore dei campioni carotati

Stabilità e Rigidezza MarshallFigura 6-6: Stabilità Marshall - Provino M₁Figura 6-7: Stabilità Marshall - Provino M₂Figura 6-8: Stabilità Marshall - Provino M₃

Modulo Dinamico

Nelle seguenti tabelle sono illustrati tutti i risultati ottenuti dalla prova di modulo dinamico tramite AMPT. Sono presentati i valori di ciascun campione testato a temperature di 4°C, 20°C e 40°C.

4°C

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Modulo Dinamico [MPa]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	21495	20878	19271	17687	15692	14251	12926	11303	10216	-
A ₇	6.3	7.0	21087	20650	19414	18238	16698	15525	14368	12851	11736	-
A ₈	6.2	7.1	21264	20701	19401	18145	16582	15391	14254	12852	11854	-

Media	6.4	7.3	21282	20743	19362	18023	16324	15056	13849	12335	11269	-
Dev. St	0.3	0.4	204.6	119.7	79.1	295.0	550.4	700.1	801.7	894.0	913.5	-
C.V.	5.0	5.2	1.0	0.6	0.4	1.6	3.4	4.6	5.8	7.2	8.1	-

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Angolo di fase [°]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	7.95	8.29	9.13	9.94	11.15	12.26	13.36	14.86	16.01	-
A ₇	6.3	7.0	7.56	7.63	8.06	8.64	9.49	10.24	11.13	12.48	13.60	-
A ₈	6.2	7.1	7.08	7.24	7.63	8.12	8.87	9.54	10.34	11.51	12.42	-

Media	6.4	7.3	7.53	7.72	8.27	8.90	9.84	10.68	11.61	12.95	14.01	-
Dev. St	0.3	0.4	0.44	0.53	0.77	0.94	1.18	1.41	1.57	1.72	1.83	-
C.V.	5.0	5.2	5.8	6.9	9.3	10.5	12.0	13.2	13.5	13.3	13.1	-

Tabella 6-8: Risultati del test MD di campioni testati a 4°C

20°C

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Modulo Dinamico [MPa]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	11472	11000	9693	8487	7017	6026	5112	4044	3360	-
A ₇	6.3	7.0	12188	11740	10473	9262	7819	6776	5858	4748	4012	-
A ₈	6.2	7.1	12177	11805	10693	9615	8260	7282	6364	5248	4507	-

Media	6.4	7.3	11946	11515	10286	9121	7699	6695	5778	4680	3960	-
St. Dev.	0.3	0.4	410.2	447.2	525.5	577.0	630.2	631.9	629.8	604.9	575.3	-
C.V.	5.0	5.2	3.4	3.9	5.1	6.3	8.2	9.4	10.9	12.9	14.5	-

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Angolo di fase [°]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	15.98	16.30	17.70	19.12	21.11	22.61	24.10	26.04	27.20	-
A ₇	6.3	7.0	14.64	14.96	16.14	17.40	19.22	20.70	22.13	24.19	25.54	-
A ₈	6.2	7.1	13.20	13.39	14.43	15.58	17.25	18.62	20.00	21.92	23.25	-

Media	6.4	7.3	14.61	14.88	16.09	17.37	19.19	20.64	22.08	24.05	25.33	-
Dev.St	0.3	0.4	1.39	1.46	1.64	1.77	1.93	2.00	2.05	2.06	1.98	-
C.V.	5.0	5.2	9.5	9.8	10.2	10.2	10.1	9.7	9.3	8.6	7.8	-

Tabella 6-9: Risultati del test MD di campioni testati a 20°C

40°C

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Modulo Dinamico [MPa]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	3948	3712	2978	2366	1691	1301	996.1	701.4	536.2	-
A ₇	6.3	7.0	4001	3789	3109	2530	1871	1485	1173	843.2	650.2	293.5
A ₈	6.2	7.1	4489	4291	3574	2960	2253	1830	1479	1089	858.2	384.6

Media	6.4	7.3	4146	3931	3220	2619	1938	1539	1216	878	682	339
St. Dev.	0.3	0.4	298.2	314.4	313.2	306.8	287.0	268.6	244.3	196.1	163.3	64.4
C.V.	5.0	5.2	7.2	8.0	9.7	11.7	14.8	17.5	20.1	22.3	24.0	19.0

ID	V _{real} [%]	V _{geo} [%]	Angolo di fase [°]									
			Frequenza [Hz]									
			25	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1	0.01
A ₁	6.8	7.7	29.59	29.21	30.40	31.17	32.06	32.06	31.82	31.05	30.24	-
A ₇	6.3	7.0	28.47	28.26	29.37	30.35	31.47	31.54	31.36	30.82	30.05	27.00
A ₈	6.2	7.1	26.04	25.88	27.09	28.13	29.38	29.81	29.93	29.99	29.59	27.97

Media	6.4	7.3	28.03	27.78	28.95	29.88	30.97	31.14	31.04	30.62	29.96	27.49
Dev.St	0.3	0.4	1.81	1.72	1.69	1.57	1.41	1.18	0.99	0.56	0.33	0.69
C.V.	5.0	5.2	6.5	6.2	5.9	5.3	4.5	3.8	3.2	1.8	1.1	2.5

Tabella 6-10: Risultati del test MD di campioni testati a 40°C

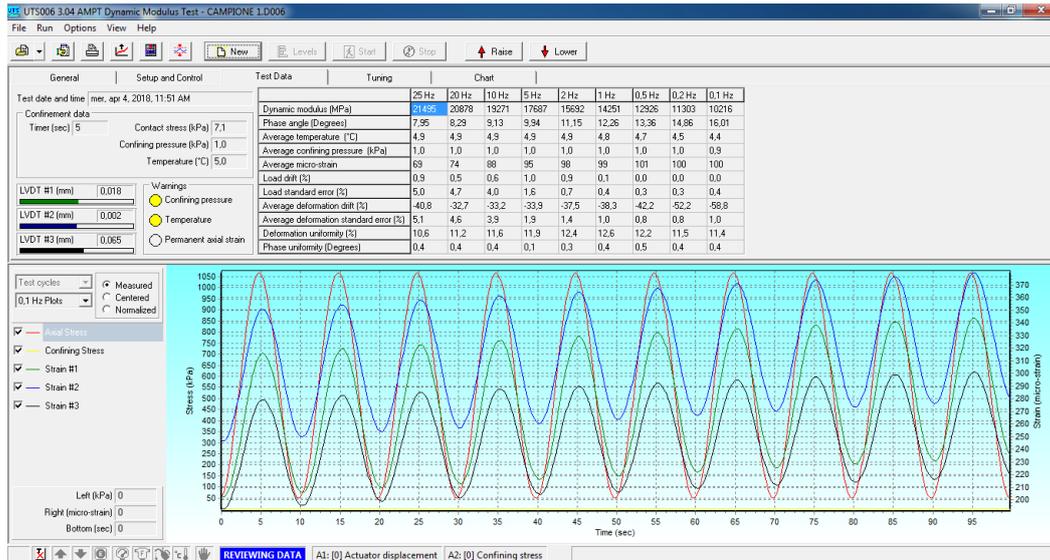


Figura 6-9: Risultati del test Modulo Dinamico a 4°C - Campione A₁

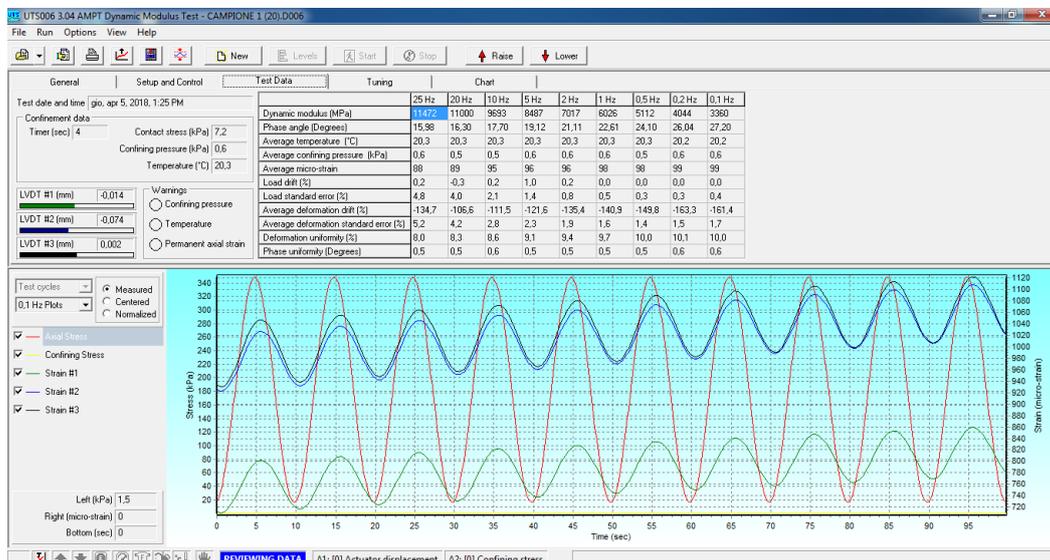


Figura 6-10: Risultati del test Modulo Dinamico a 20°C - Campione A₁

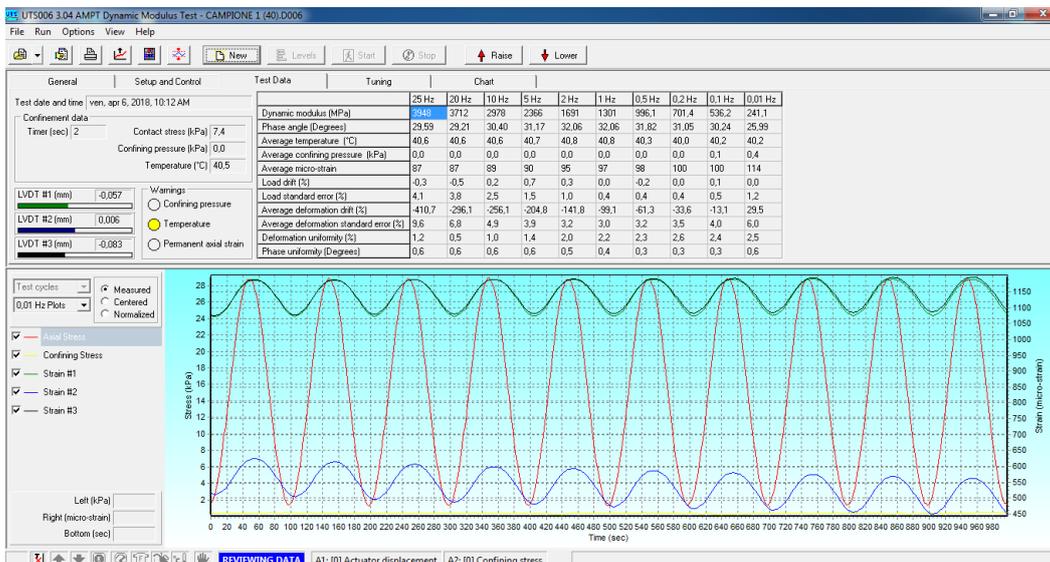


Figura 6-11: Risultati del test Modulo Dinamico a 40°C - Campione A₁

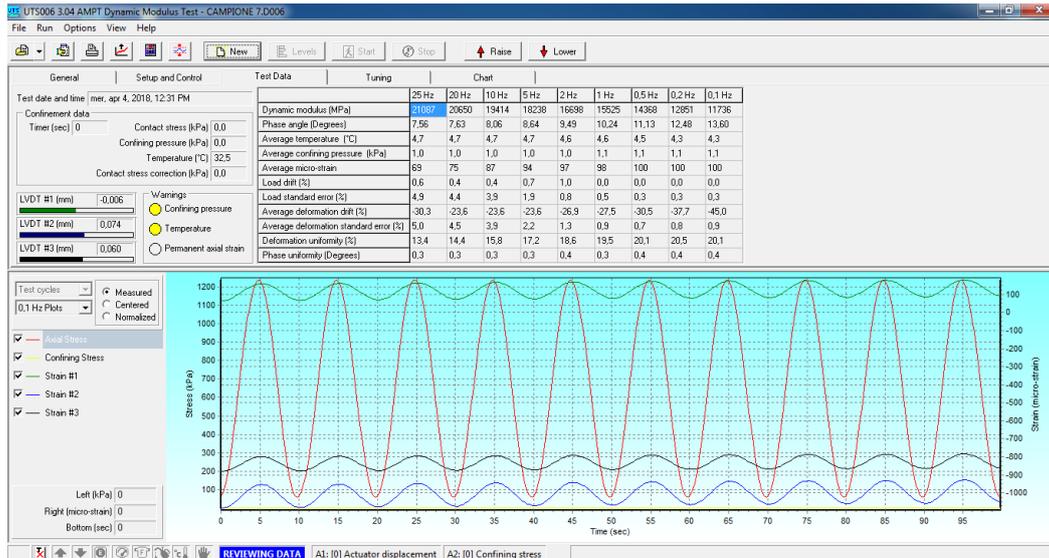


Figura 6-12: Risultati del test Modulo Dinamico a 4°C - Campione A7

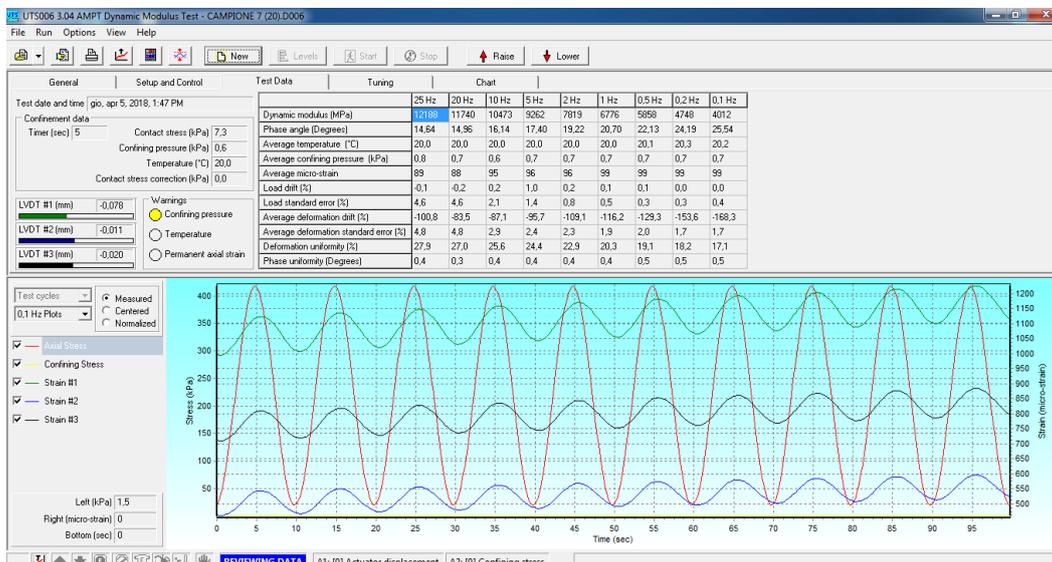


Figura 6-13: Risultati del test Modulo Dinamico a 20°C - Campione A7

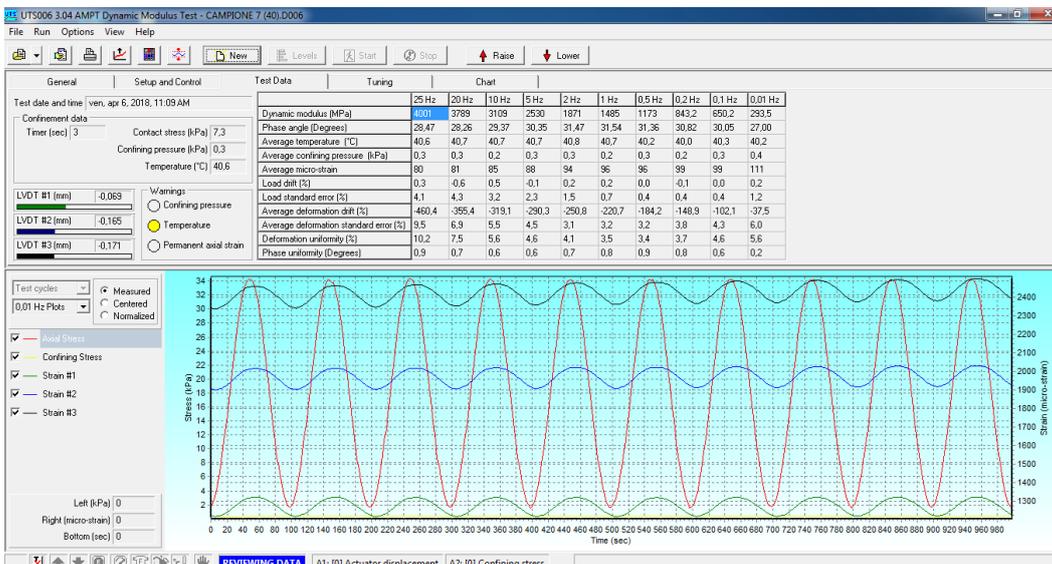


Figura 6-14: Risultati del test Modulo Dinamico a 40°C - Campione A7

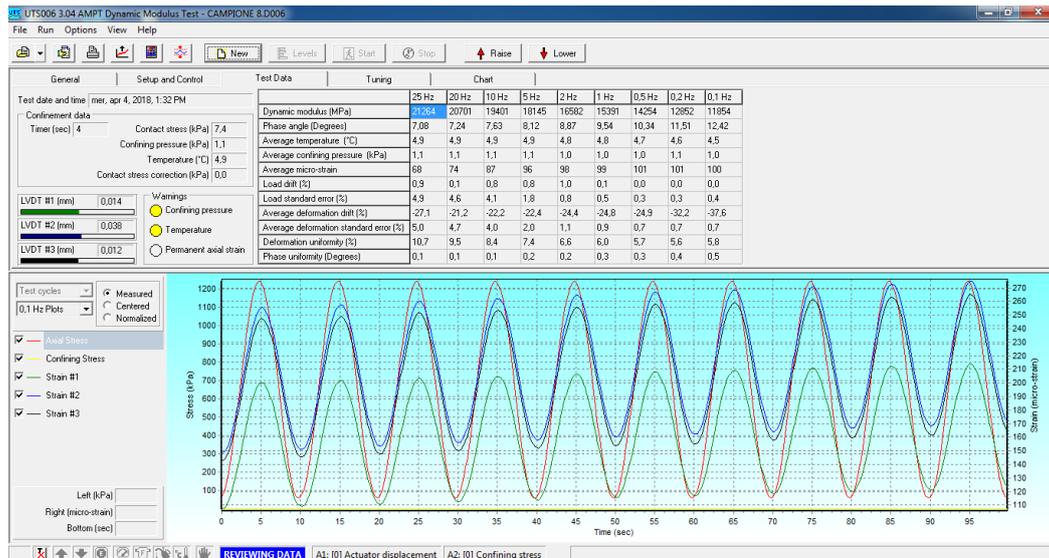


Figura 6-15: Risultati del test Modulo Dinamico a 4°C - Campione A₈

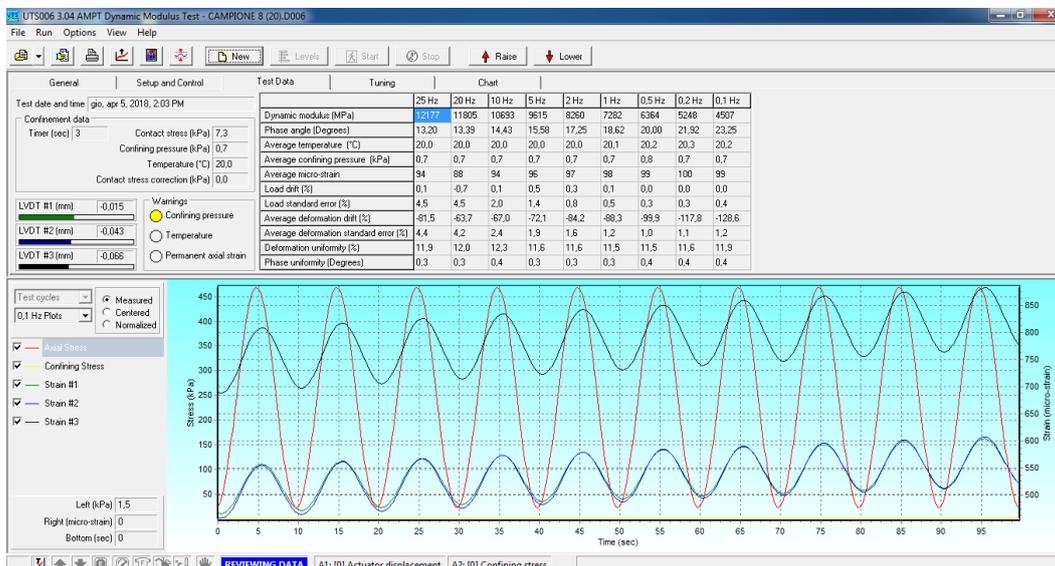


Figura 6-16: Risultati del test Modulo Dinamico a 20°C - Campione A₈

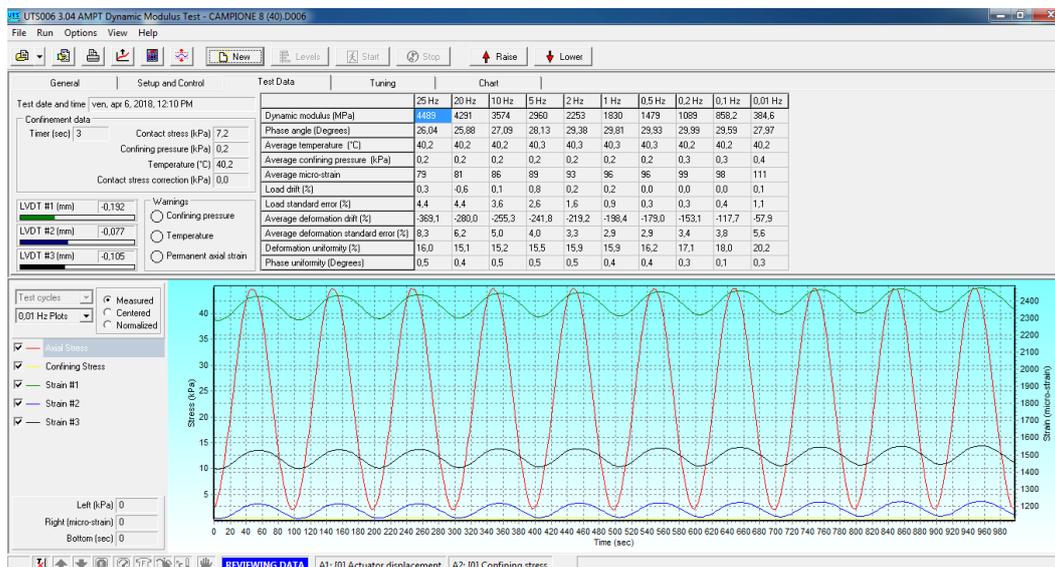


Figura 6-17: Risultati del test Modulo Dinamico a 40°C - Campione A₈

Curve Maestre

Temp	Frequenza	Modulo	Modulo	Angolo Fase	Log Modulo	log[a(T)]	log f	log f _r	f _r	Log E* predicted
[°C]	[Hz]	[MPa]	[ksi]	[°]	[ksi]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[ksi]
4	0.1	10216.0	1481.7	16.01	3.17	1.968	-1.000	0.968	9.286	3.15
4	0.2	11303.0	1639.4	14.86	3.21	1.968	-0.699	1.269	18.572	3.21
4	0.5	12926.0	1874.8	13.36	3.27	1.968	-0.301	1.667	46.430	3.27
4	1	14251.0	2066.9	12.26	3.32	1.968	0.000	1.968	92.860	3.32
4	2	15692.0	2275.9	11.15	3.36	1.968	0.301	2.269	185.719	3.36
4	5	17687.0	2565.3	9.94	3.41	1.968	0.699	2.667	464.298	3.41
4	10	19271.0	2795.0	9.13	3.45	1.968	1.000	2.968	928.597	3.44
4	20	20878.0	3028.1	8.29	3.48	1.968	1.301	3.269	1857.194	3.48
4	25	21495.0	3117.6	7.95	3.49	1.968	1.398	3.366	2321.492	3.49
20	0.1	3360.0	487.3	27.20	2.69	0.000	-1.000	-1.000	0.100	2.68
20	0.2	4044.0	586.5	26.04	2.77	0.000	-0.699	-0.699	0.200	2.77
20	0.5	5112.0	741.4	24.10	2.87	0.000	-0.301	-0.301	0.500	2.87
20	1	6026.0	874.0	22.61	2.94	0.000	0.000	0.000	1.000	2.95
20	2	7017.0	1017.7	21.11	3.01	0.000	0.301	0.301	2.000	3.02
20	5	8487.0	1230.9	19.12	3.09	0.000	0.699	0.699	5.000	3.10
20	10	9693.0	1405.9	17.70	3.15	0.000	1.000	1.000	10.000	3.16
20	20	11000.0	1595.4	16.30	3.20	0.000	1.301	1.301	20.000	3.21
20	25	11472.0	1663.9	15.98	3.22	0.000	1.398	1.398	25.000	3.23
40	0.1	536.2	77.8	30.24	1.89	-2.177	-1.000	-3.177	0.001	1.88
40	0.2	701.4	101.7	31.05	2.01	-2.177	-0.699	-2.876	0.001	2.01
40	0.5	996.1	144.5	31.82	2.16	-2.177	-0.301	-2.478	0.003	2.17
40	1	1301.0	188.7	32.06	2.28	-2.177	0.000	-2.177	0.007	2.29
40	2	1691.0	245.3	32.06	2.39	-2.177	0.301	-1.876	0.013	2.39
40	5	2366.0	343.2	31.17	2.54	-2.177	0.699	-1.478	0.033	2.53
40	10	2978.0	431.9	30.40	2.64	-2.177	1.000	-1.177	0.067	2.63
40	20	3712.0	538.4	29.21	2.73	-2.177	1.301	-0.876	0.133	2.72
40	25	3948.0	572.6	29.59	2.76	-2.177	1.398	-0.779	0.166	2.74

Tabella 6-11: Riepilogo dei calcoli effettuati con il modello MEPDG di Campione A₁

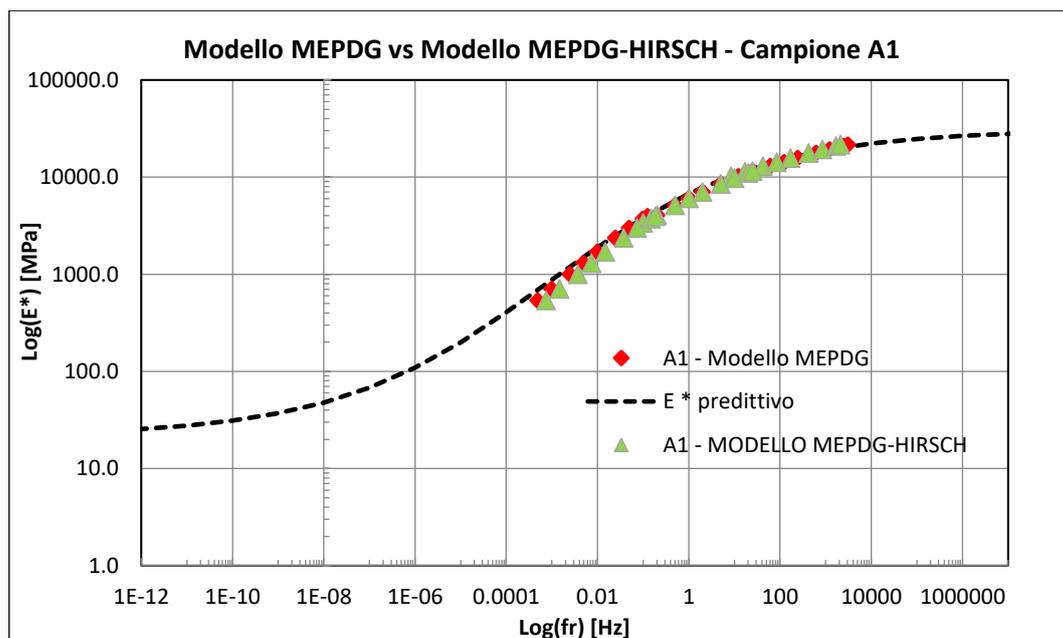


Figura 6-18: Confronto di curve maestre di Campione A₁

Temp	Frequenza	Modulo	Modulo	Angolo Fase	Log Modulo	log[a(T)]	log f	log f _r	f _r	Log E* predicted
[°C]	[Hz]	[MPa]	[ksi]	[°]	[ksi]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[ksi]
4	0.1	11736.0	1702.2	13.60	3.23	2.175	-1.000	1.175	14.976	3.22
4	0.2	12851.0	1863.9	12.48	3.27	2.175	-0.699	1.476	29.951	3.26
4	0.5	14368.0	2083.9	11.13	3.32	2.175	-0.301	1.874	74.878	3.32
4	1	15525.0	2251.7	10.24	3.35	2.175	0.000	2.175	149.757	3.35
4	2	16698.0	2421.8	9.49	3.38	2.175	0.301	2.476	299.514	3.39
4	5	18238.0	2645.2	8.64	3.42	2.175	0.699	2.874	748.784	3.42
4	10	19414.0	2815.8	8.06	3.45	2.175	1.000	3.175	1497.568	3.45
4	20	20650.0	2995.0	7.63	3.48	2.175	1.301	3.476	2995.135	3.47
4	25	21087.0	3058.4	7.56	3.49	2.175	1.398	3.573	3743.919	3.48
20	0.1	4012.0	581.9	25.54	2.76	0.000	-1.000	-1.000	0.100	2.76
20	0.2	4748.0	688.6	24.19	2.84	0.000	-0.699	-0.699	0.200	2.84
20	0.5	5858.0	849.6	22.13	2.93	0.000	-0.301	-0.301	0.500	2.93
20	1	6776.0	982.8	20.70	2.99	0.000	0.000	0.000	1.000	3.00
20	2	7819.0	1134.0	19.22	3.05	0.000	0.301	0.301	2.000	3.06
20	5	9262.0	1343.3	17.40	3.13	0.000	0.699	0.699	5.000	3.14
20	10	10473.0	1519.0	16.14	3.18	0.000	1.000	1.000	10.000	3.19
20	20	11740.0	1702.7	14.96	3.23	0.000	1.301	1.301	20.000	3.24
20	25	12188.0	1767.7	14.64	3.25	0.000	1.398	1.398	25.000	3.25
40	0.01	293.5	42.6	27.00	1.63	-2.407	-2.000	-4.407	0.000	1.62
40	0.1	650.2	94.3	30.05	1.97	-2.407	-1.000	-3.407	0.000	1.99
40	0.2	843.2	122.3	30.82	2.09	-2.407	-0.699	-3.106	0.001	2.09
40	0.5	1173.0	170.1	31.36	2.23	-2.407	-0.301	-2.708	0.002	2.23
40	1	1485.0	215.4	31.54	2.33	-2.407	0.000	-2.407	0.004	2.33
40	2	1871.0	271.4	31.47	2.43	-2.407	0.301	-2.106	0.008	2.43
40	5	2530.0	366.9	30.35	2.56	-2.407	0.699	-1.708	0.020	2.56
40	10	3109.0	450.9	29.37	2.65	-2.407	1.000	-1.407	0.039	2.65
40	20	3789.0	549.5	28.26	2.74	-2.407	1.301	-1.106	0.078	2.73
40	25	4001	580.3	28.47	2.76	-2.407	1.398	-1.009	0.098	2.76

Tabella 6-12: Riepilogo dei calcoli effettuati con il modello MEPDG di Campione A₇

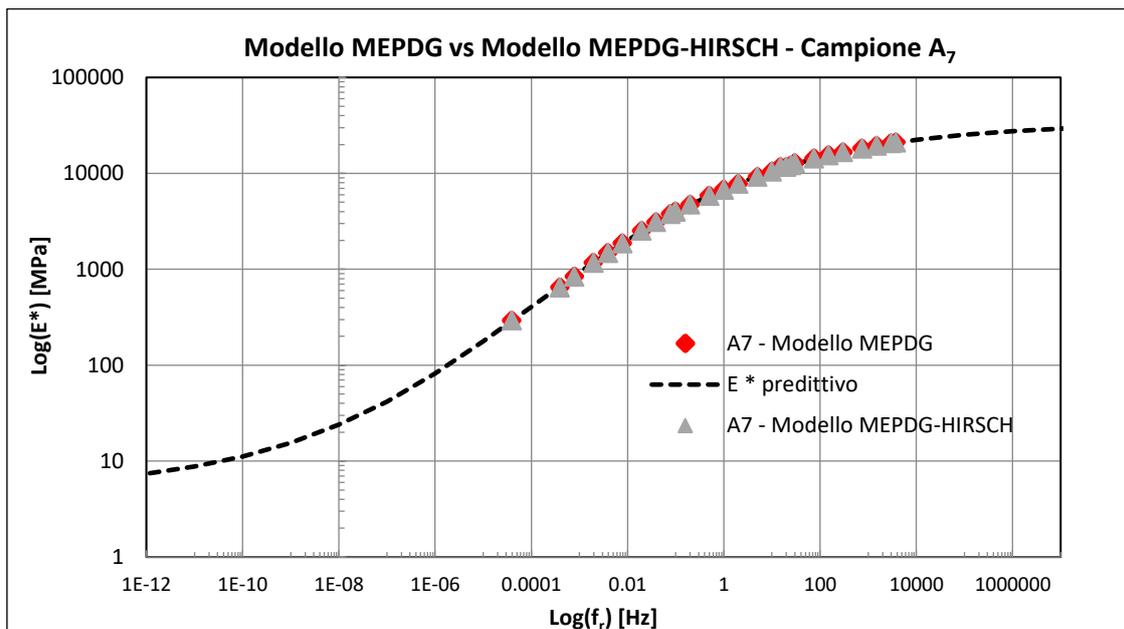


Figura 6-19: Confronto di curve maestre di Campione A₇

Temp	Frequenza	Modulo	Modulo	Angolo Fase	Log Modulo	log[a(T)]	log f	log f _r	f _r	Log E* predicted
[°C]	[Hz]	[MPa]	[ksi]	[°]	[ksi]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[ksi]
4	0.1	11854	1719.3	12.42	3.24	2.206	-1.000	1.206	16.086	3.22
4	0.2	12852	1864.0	11.51	3.27	2.206	-0.699	1.507	32.171	3.26
4	0.5	14254	2067.4	10.34	3.32	2.206	-0.301	1.905	80.428	3.32
4	1	15391	2232.3	9.54	3.35	2.206	0.000	2.206	160.857	3.35
4	2	16582	2405.0	8.87	3.38	2.206	0.301	2.507	321.714	3.39
4	5	18145	2631.7	8.12	3.42	2.206	0.699	2.905	804.284	3.43
4	10	19401	2813.9	7.63	3.45	2.206	1.000	3.206	1608.569	3.46
4	20	20701	3002.4	7.24	3.48	2.206	1.301	3.507	3217.137	3.49
4	25	21264	3084.1	7.08	3.49	2.206	1.398	3.604	4021.422	3.50
20	0.1	4507	653.7	23.25	2.82	0.000	-1.000	-1.000	0.100	2.81
20	0.2	5248	761.2	21.92	2.88	0.000	-0.699	-0.699	0.200	2.88
20	0.5	6364	923.0	20.00	2.97	0.000	-0.301	-0.301	0.500	2.96
20	1	7282	1056.2	18.62	3.02	0.000	0.000	0.000	1.000	3.02
20	2	8260	1198.0	17.25	3.08	0.000	0.301	0.301	2.000	3.07
20	5	9615	1394.5	15.58	3.14	0.000	0.699	0.699	5.000	3.14
20	10	10693	1550.9	14.43	3.19	0.000	1.000	1.000	10.000	3.19
20	20	11805	1712.2	13.39	3.23	0.000	1.301	1.301	20.000	3.24
20	25	12177	1766.1	13.20	3.25	0.000	1.398	1.398	25.000	3.25
40	0.01	384.6	55.8	27.97	1.75	-2.441	-2.000	-4.441	0.000	1.74
40	0.1	858.2	124.5	29.59	2.10	-2.441	-1.000	-3.441	0.000	2.11
40	0.2	1089	157.9	29.99	2.20	-2.441	-0.699	-3.140	0.001	2.21
40	0.5	1479	214.5	29.93	2.33	-2.441	-0.301	-2.742	0.002	2.34
40	1	1830	265.4	29.81	2.42	-2.441	0.000	-2.441	0.004	2.43
40	2	2253	326.8	29.38	2.51	-2.441	0.301	-2.140	0.007	2.52
40	5	2960	429.3	28.13	2.63	-2.441	0.699	-1.742	0.018	2.63
40	10	3574	518.4	27.09	2.71	-2.441	1.000	-1.441	0.036	2.70
40	20	4291	622.4	25.88	2.79	-2.441	1.301	-1.140	0.072	2.78
40	25	4489	651.1	26.04	2.81	-2.441	1.398	-1.043	0.091	2.80

Tabella 6-13: Riepilogo dei calcoli effettuati con il modello MEPDG di Campione A₈

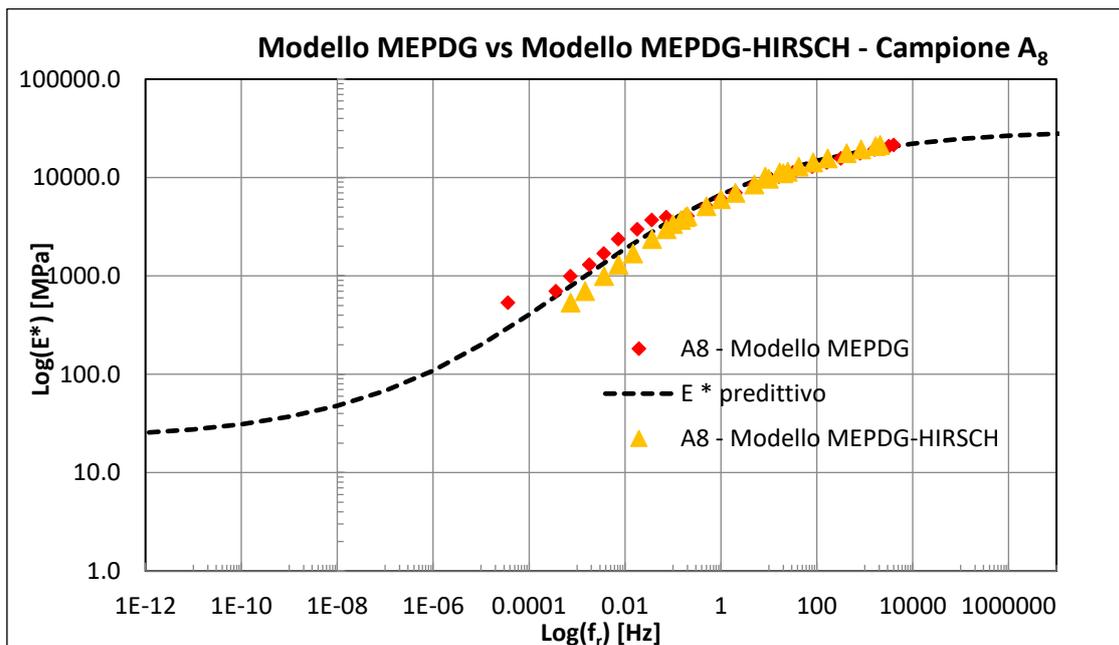


Figura 6-20: Confronto di curve maestre di Campione A₈

Flow Number

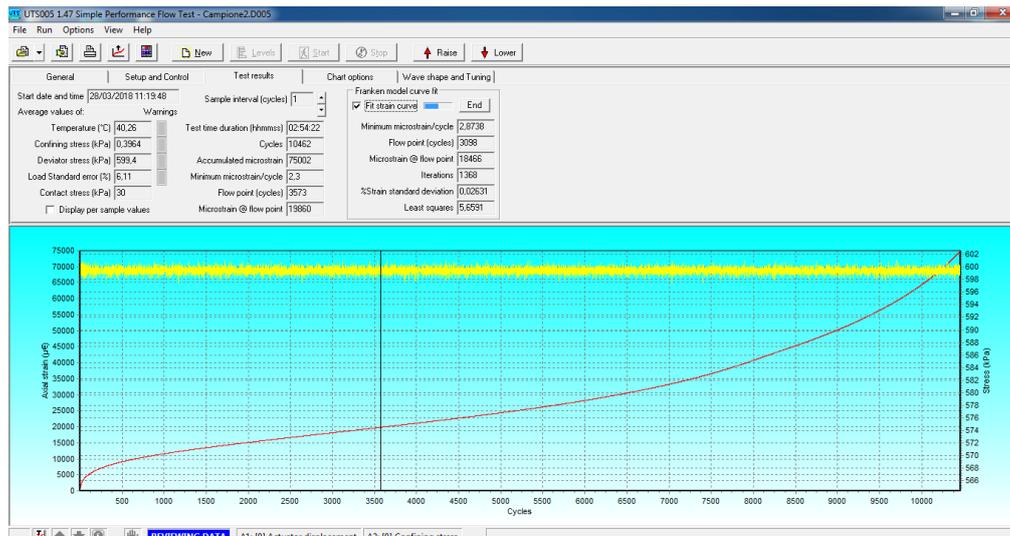


Figura 6-21: Curva di Flow Number a 40°C - Campione A₂

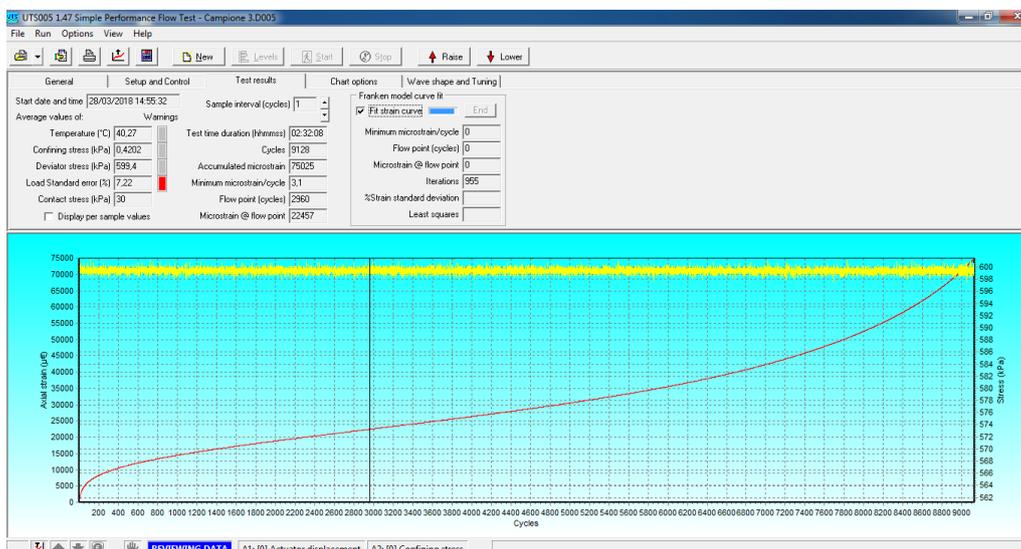


Figura 6-22: Curva di Flow Number a 40°C - Campione A₃

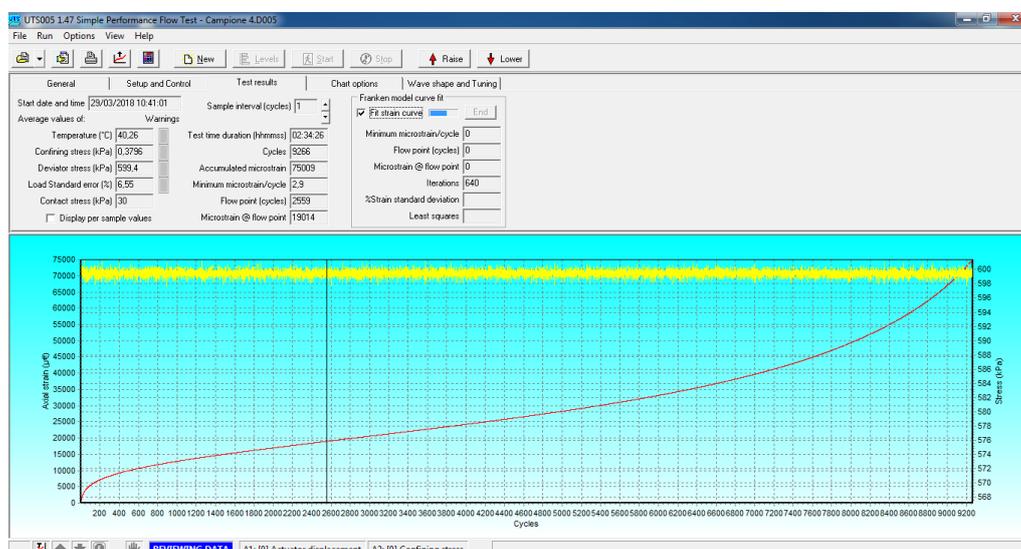


Figura 6-23: Curva di Flow Number a 40°C - Campione A₄

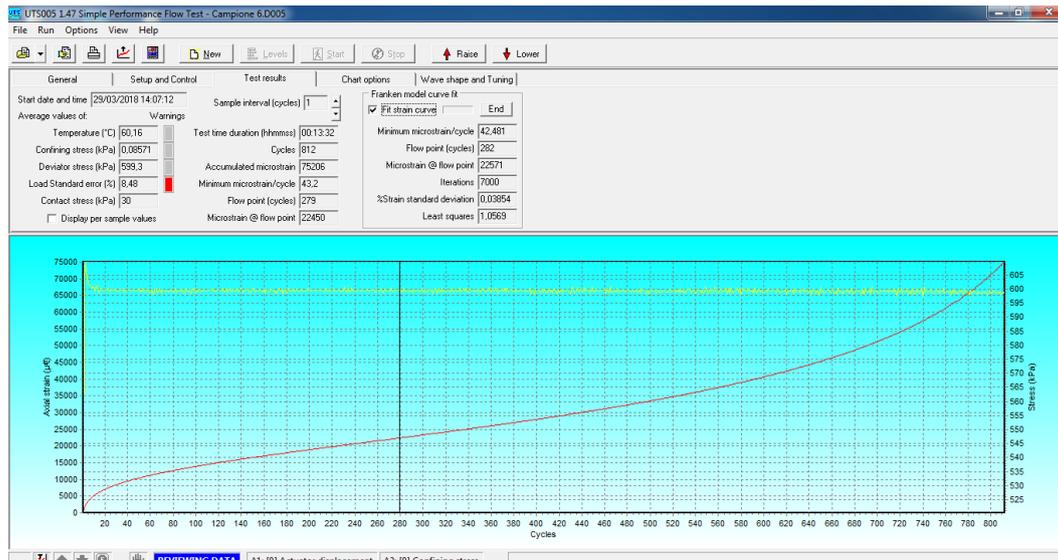


Figura 6-24: Curva di Flow Number a 60°C - Campione A₆

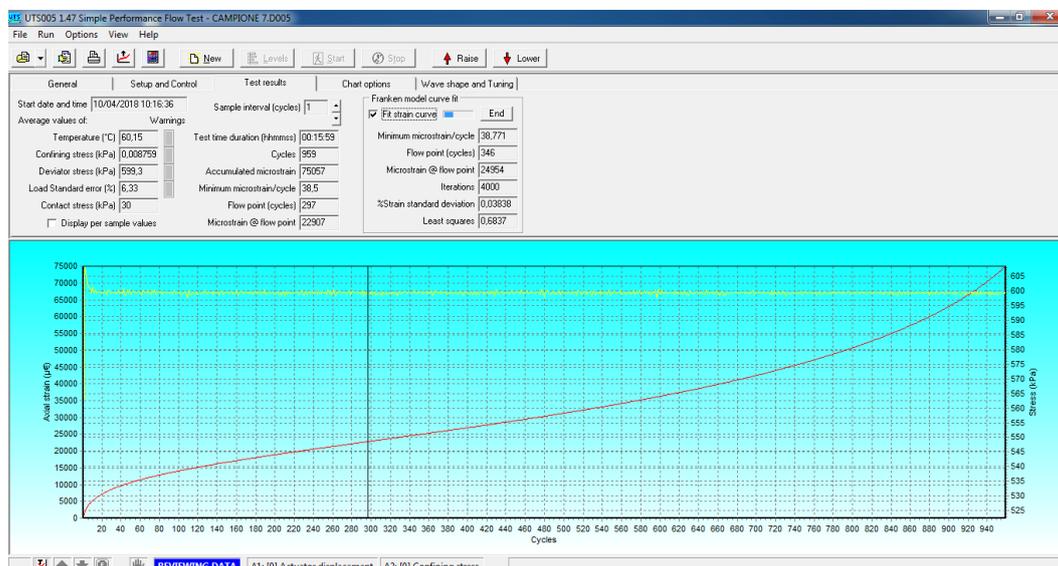


Figura 6-25: Curva di Flow Number a 60°C - Campione A₇

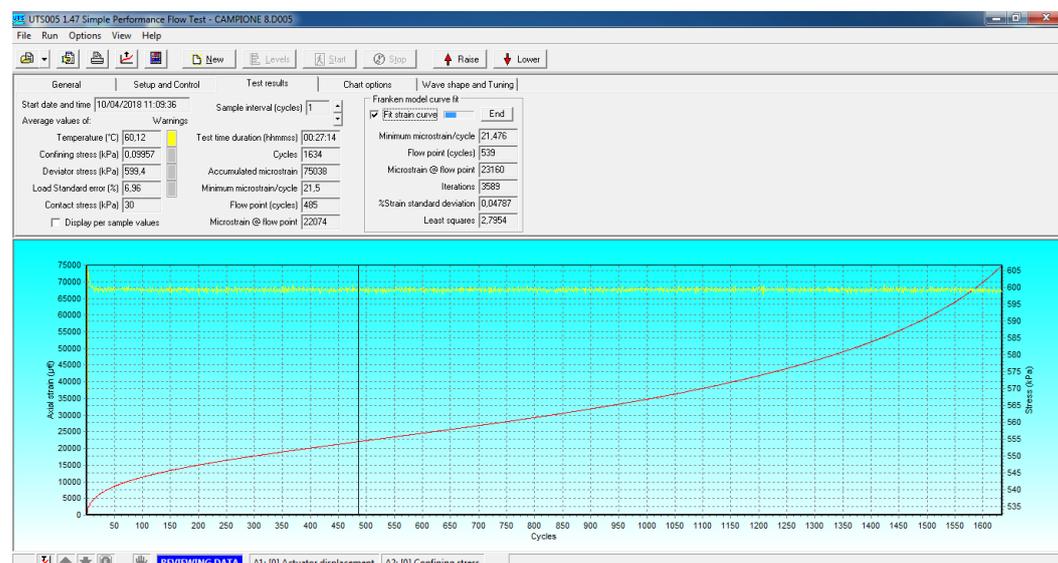


Figura 6-26: Curva di Flow Number a 60°C - Campione A₈

Modellazione del comportamento di deformazione permanente trifase delle
miscele di conglomerato bituminoso

Curve modellate dei campioni testati a 40°C

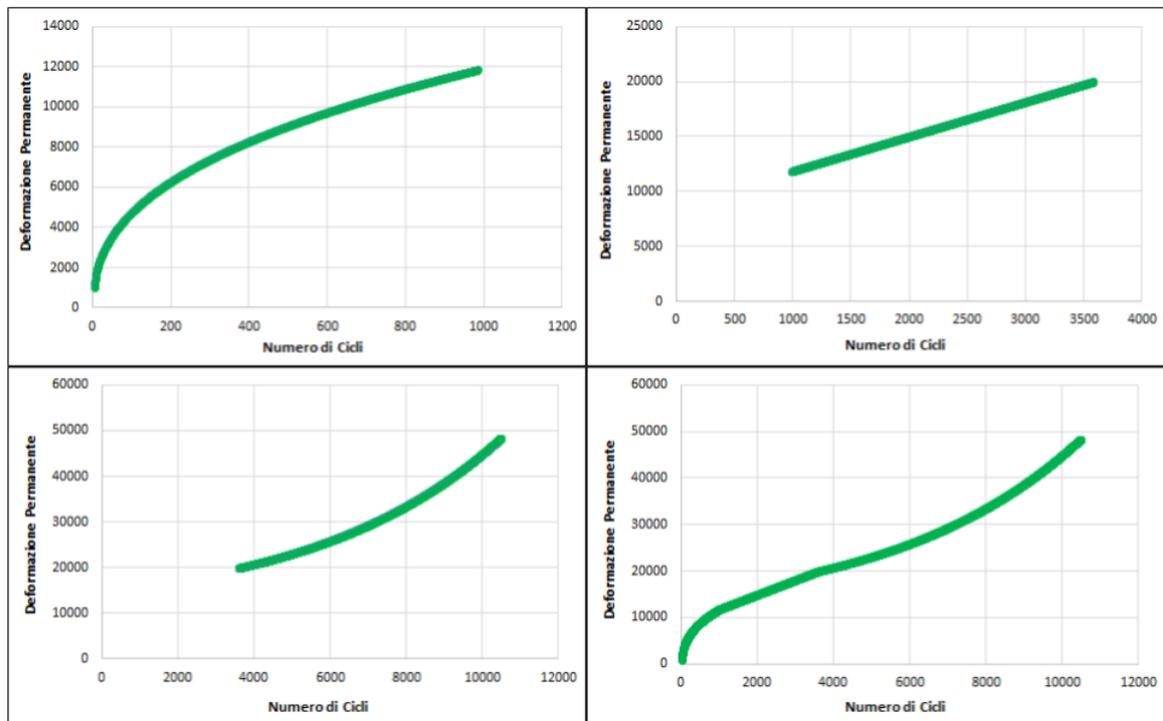


Figura 6-27: Curve modellate di Campione A_2

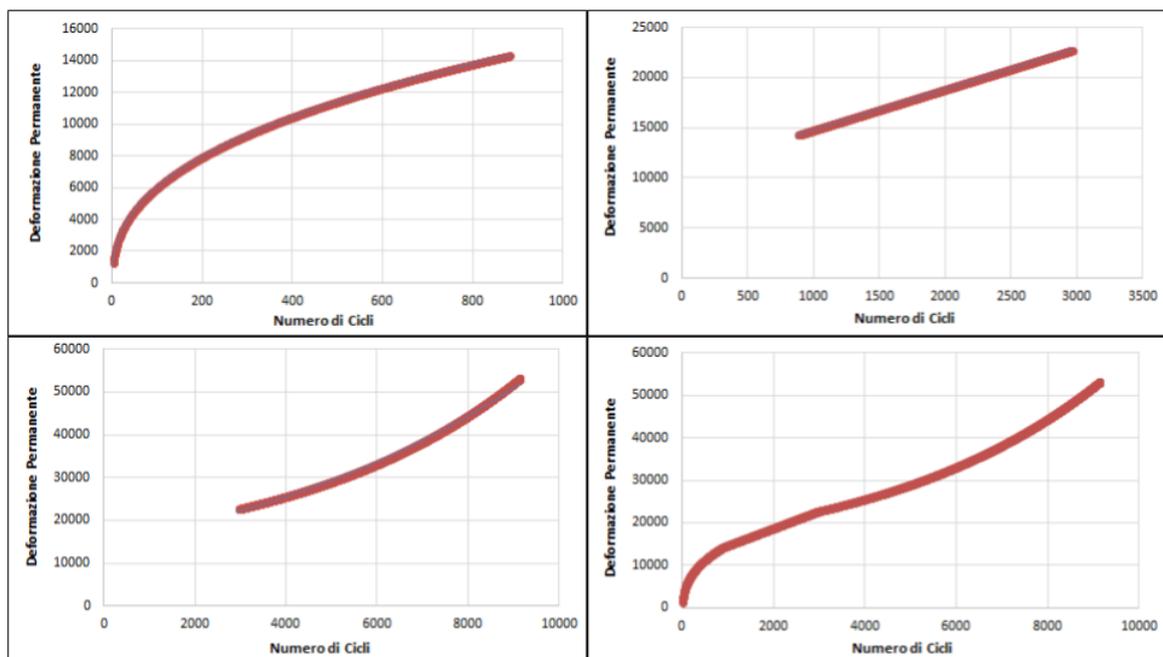


Figura 6-28: Curve modellate di Campione A_3

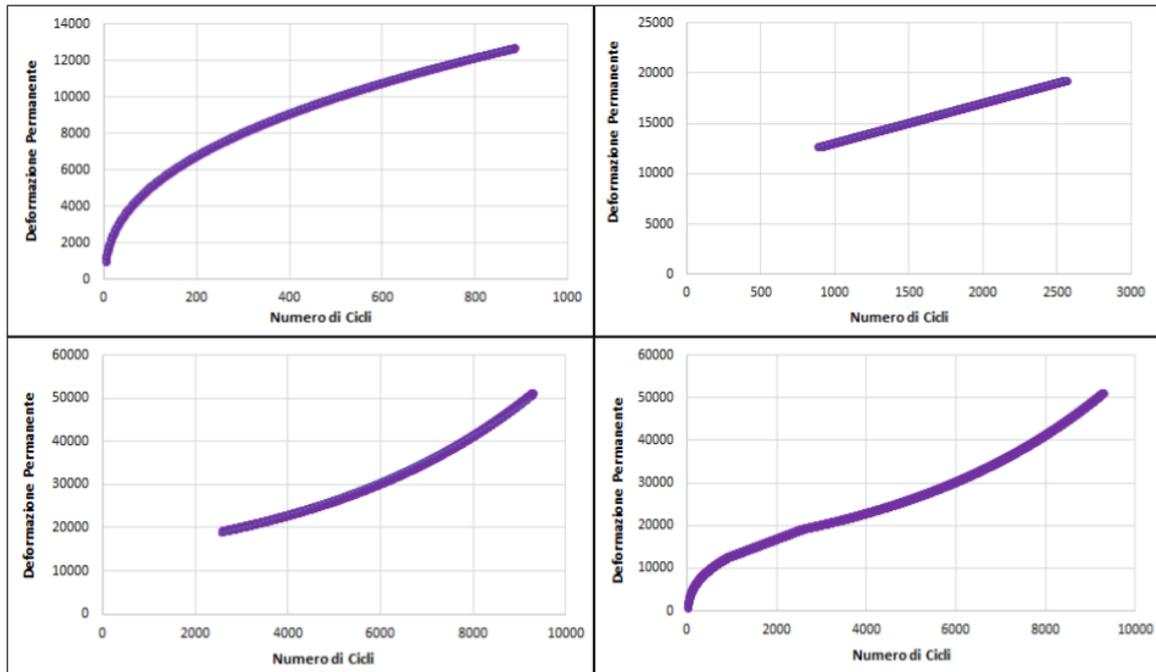


Figura 6-29: Curve modellate di Campione A₄

Curve modellate dei campioni testati a 60°C

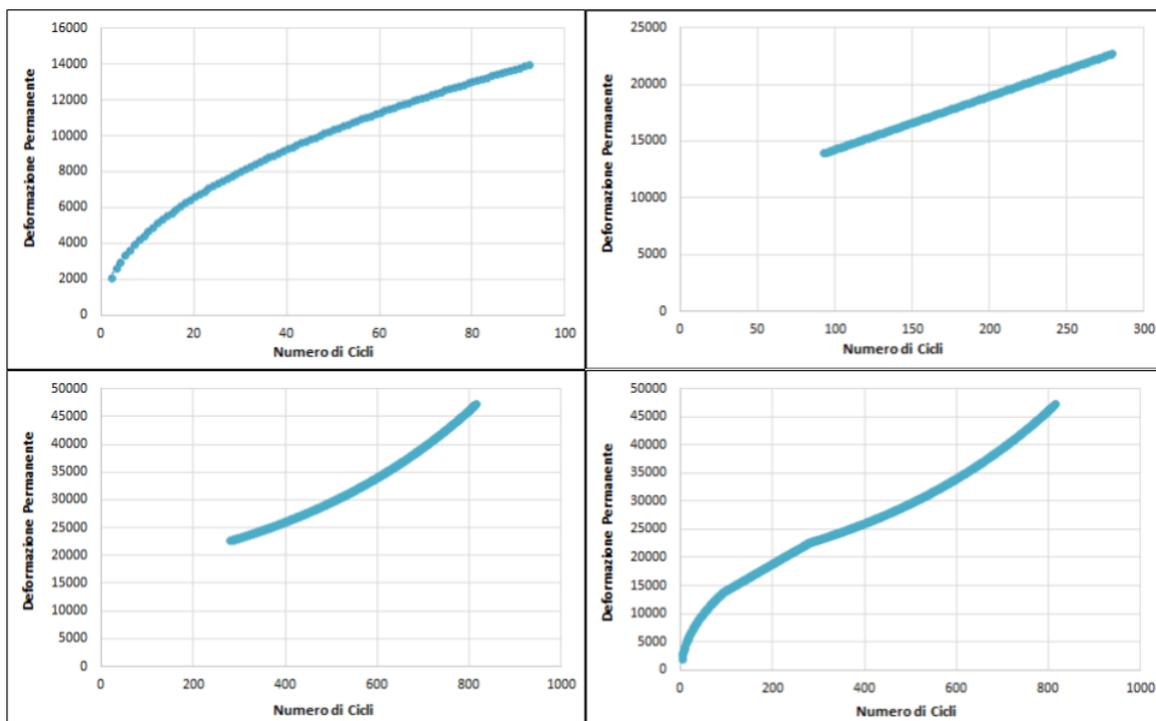


Figura 6-30: Curve modellate di Campione A₆

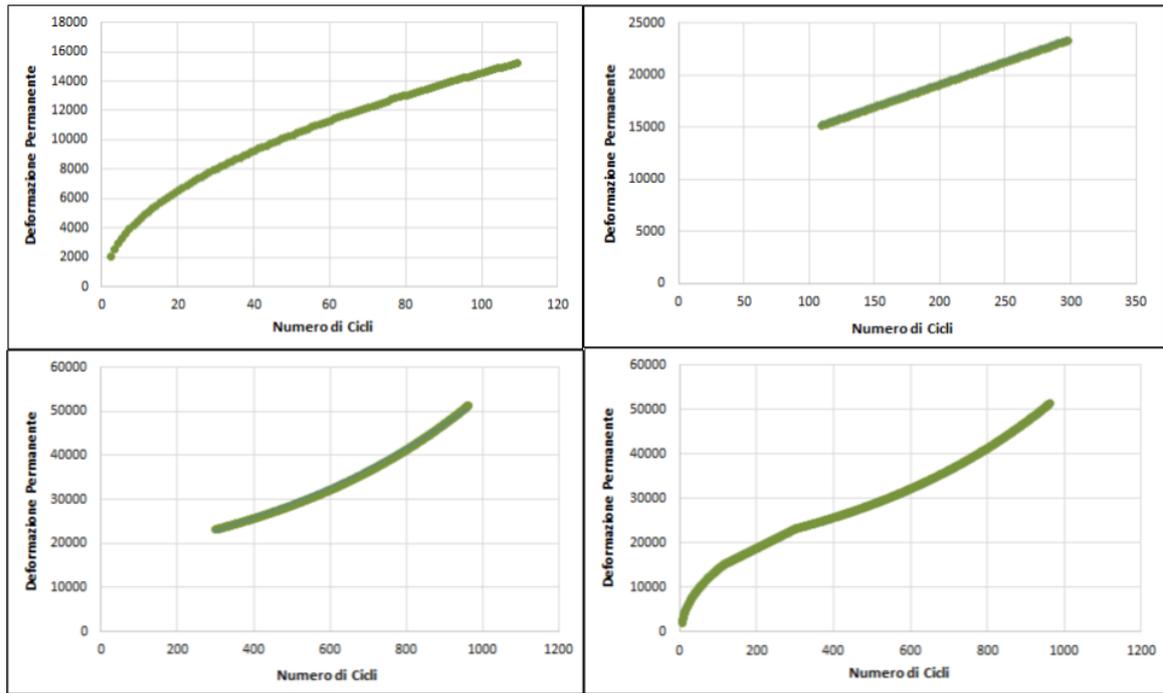


Figura 6-31: Curve modellate di Campione A₇

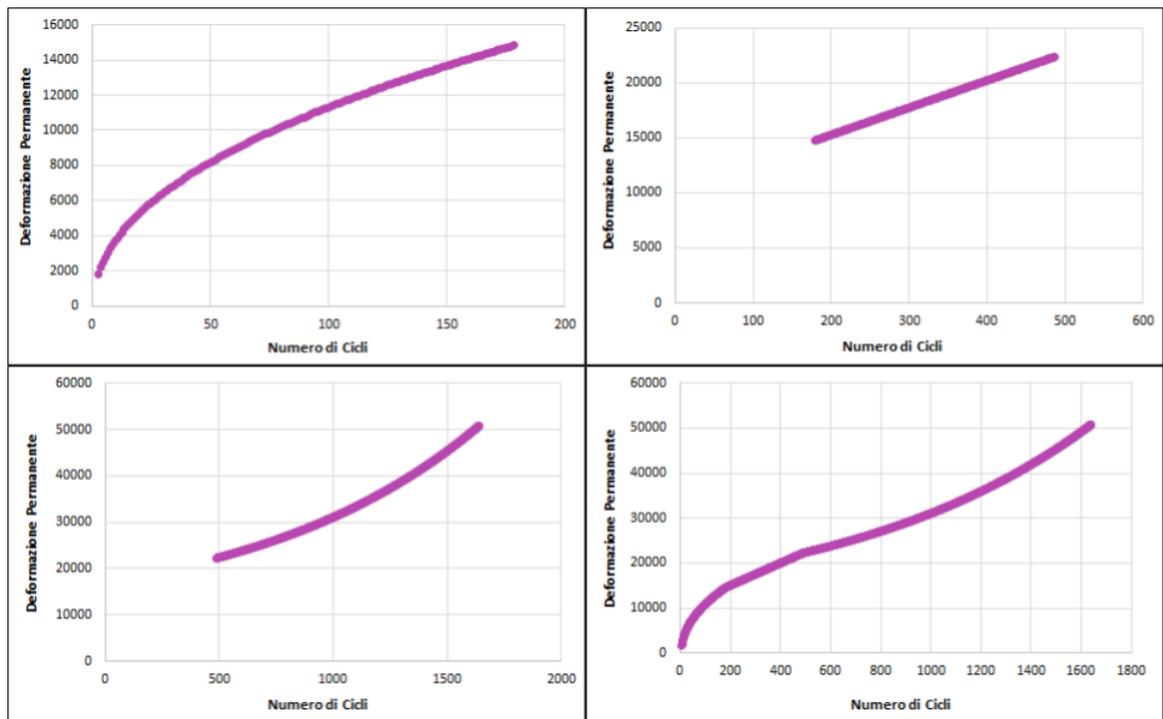


Figura 6-32: Curve modellate di Campione A₈

Nelle seguenti tabelle sono riportati i numeri di cicli impiegati per fare la curva modellata di ciascun campione e per effettuare le curve modellate medi (40°C e 60°C).

Temp [°C]	ID [-]	Fase Primaria		Fase Secondaria	Fase Terziaria
		Punto Iniziale	Punto Finale	Punto Finale (FN)	Punto Finale
40°C	A ₂	2	N _{PS} =983	N _{ST} =3573	10462
	A ₃	2	N _{PS} =880	N _{ST} =2960	9128
	A ₄	2	N _{PS} =883	N _{ST} =2559	9266
60°C	A ₆	2	N _{PS} =92	N _{ST} =279	812
	A ₇	2	N _{PS} =109	N _{ST} =297	959
	A ₈	2	N _{PS} =178	N _{ST} =485	1634

Tabella 6-14: Riassunto dei valori di cicli utilizzati per modellare ogni campione

Curva Modellata Media				
Temp	Fase Primaria		Fase Secondaria	Fase Terziaria
[°C]	Punto Iniziale	Punto Finale	Punto Finale (FN)	Punto Finale
40°C	2	N _{PS} =915	N _{ST} =3031	10000
60°C	2	N _{PS} =126	N _{ST} =354	1600

Tabella 6-15: Riassunto dei valori di cicli utilizzati per modellare le curve modellate medi

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- i. S.I.T.A.F. S.p.A. Società Italiana Traforo Autostradale Fréjus – “Progetto definitivo 2006; Descrizione dell’opera”.
- ii. S.I.T.A.F S.p.A. Seconda galleria Traforo del Fréjus – “<http://www.sitaftunnelfrejus.it/sitaf/opere/t4/>”
- iii. S.F.T.R.F. S.A. Société Française du Tunnel du Fréjus.
- iv. Airey G. D., “Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials”, International Journal on Pavement Engineering, vol. 5, pp 137-151, 2004.
- v. ITERCHIMICA “<http://www.iterchimica.it/applicazioni/pavimentazioni-stradali-in-genere/>”.
- vi. ARPA Piemonte - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale “<https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/grandi-opere/frejus/scheda-frejus>”.
- vii. STRADEAUTOSTRADE “<https://www.stradeautostrade.it/gallerie-e-tunnelling/la-costruzione-della-galleria-di-sicurezza-nel-traforo-autostradale-del-frejus/>”.
- viii. C. Strade, “Corpo stradale,” 2016.
 - i. Andrés Albreu, “Master of Science of Civil Engineering ‘ Thermal conductivity of backfilling materials for road pavements in tunnels” Politecnico di Torino, 2017.
 - ii. Dr. Ing. Gilda Ferrotti - SSD Strade, Ferrovie e Aeroporti Università “Progetto di Ricerca: Caratterizzazione sperimentale dei leganti trasparenti CORES EVIZERO per applicazioni in ambito stradale” Politecnica delle Marche.
 - iii. “Macchine e strumenti di prova per l’ingegneria civile” - CONTROLS. pp. 392-395.
 - iv. Ing. Loretta VENTURINI Direttore Tecnico Iterchimica srl. Tecnologie innovative per la manutenzione stradale. Cap 13. Luglio, Milano.
 - v. MATEST-MaterialTestingEquipment “<http://www.matest.com/it/Products/bitumi-asfalti>”.

- vi. T. Della Norma, “UNI EN 1097-10:2004 - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati” 2004.
- vii. Cominsky, R., Leahy, R.B., Harrigan, E.T. Level one mix design: materials selection, compaction, and conditioning, SHRP-A-408 Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- viii. Bassani, M., Santagata E. Indagini sperimentali riguardanti l’introduzione della pressa a taglio giratoria nelle norme tecniche di capitolato, XI Convegno Nazionale SIIV – Progettazione e Adeguamento Funzionale delle Infrastrutture Viarie, Verona, 28-30 novembre 2001.
- ix. Bituminous Mixtures – Test methods for hot mix asphalt –Wheel tracking. UNI EN 12697-22:2003.
- x. T. Della Norma, AASHTO TP 79-13 – “Determining the Dynamic Modulu and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the ASphalt Mixture Performance Tester (AMPT)”.
- xi. T. Della Norma, AASHTO PP 61-13 – “ Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester(AMPT)”.
- xii. “Bituminous Mixtures & Pavements IV”- Editore: A.F Nikolaides.
- xiii. “Verification and Modeling if Three-Stage Permanent deformation Behavior of Asphalt Mixes” – Journal of Transportation Engineering ASCE, July/August 2004.
- xiv. ECOPNEUS - Manuale tecnico N°17: “Strati di usura con polverino da Pneumatici Fuori Uso per pavimentazioni stradali della viabilità urbana”.