



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**VALUTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLE CURVE MAESTRE
DI CONGLOMERATI BITUMINOSI RICICLATI A CALDO AL
VARIARE DELLA TEMPERATURA DI MISCELAZIONE, DEL
TIPO DI BITUME VERGINE E DI ADDITIVO RIGENERANTE**

**EVALUATION OF THE HOT RECYCLED MIX ASPHALT
MASTER CURVES CHANGING THE MIXING TEMPERATURE,
THE TYPE OF NEAT BITUMEN AND REJUVENATOR**

Relatore: Chiar.mo
Prof. Ing. **Maurizio Bocci**

Tesi di Laurea di:
Carlo Alessandrini

Correlatore:
Ing. **Emiliano Prospero**

A.A. 2020/2021

A mia madre e mio padre,
a mia sorella e mio fratello
e in memoria dei miei nonni

INDICE

INDICE DELLE FIGURE.....	ix
INDICE DELLE TABELLE	xv
INTRODUZIONE	xvii
CAPITOLO 1 – Stato dell’arte.....	1
1.1 Pavimentazione stradale.....	1
1.2 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).....	8
1.2.1 Definizione e proprietà	10
1.2.2 Tecniche di riciclaggio	11
1.3 Cenni sulla reologia del conglomerato bituminoso	20
1.4 Legante bituminoso.....	27
1.4.1 Processi di produzione.....	27
1.4.2 Caratteristiche fisiche e chimiche.....	30
1.4.3 Invecchiamento e additivi rigeneranti	31
CAPITOLO 2 – Programma sperimentale	35
2.1 Obiettivi e miscele realizzate	36
2.2 Materiali.....	39
2.2.1 Aggregati vergini.....	39
2.2.2 Fresato	45
2.2.3 Bitumi vergini.....	48
2.2.4 Additivi rigeneranti.....	50
2.3 Apparecchiature e protocolli di prova.....	52
2.3.1 Curve granulometriche di progetto.....	52
2.3.2 Miscelazione (UNI EN 12697-35) e compattazione dei provini (UNI EN 12697-31)	55

2.3.3	Preparazione dei provini per la prova dinamica di modulo complesso	66
2.3.4	Prova dinamica di modulo complesso	71
2.3.5	Cenni teorici sull'elaborazione dei risultati della prova dinamica	83
2.3.6	Determinazione delle proprietà volumetriche	92
2.4	Specifiche di Capitolato	98
2.4.1	Bitumi e additivi	98
2.4.2	Materiali inerti	98
2.4.3	Aggregati grossi.....	99
2.4.4	Aggregati fini.....	99
2.4.5	Additivi (filler)	99
2.4.6	Miscele.....	100
2.4.7	Requisiti di accettazione.....	100
CAPITOLO 3 – Risultati sperimentali		103
3.1	Volume dei vuoti determinato con il procedimento C, con provino sigillato (UNI EN 12697-6 e UNI EN 12697-8).....	105
3.2	Rappresentazione nel piano di Black e nel piano di Cole-Cole a parità di temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine	106
3.3	Rappresentazione nel piano di Black e nel piano di Cole-Cole al variare della temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine	110
3.4	Valutazione dell'andamento delle curve maestre delle miscele a parità di temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine	112
3.5	Valutazione dell'andamento delle curve maestre delle miscele al variare della temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine	117
3.6	Analisi dei parametri del modello analitico	121
CONCLUSIONI		129
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....		132

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Principali tipologie di pavimentazioni stradali e loro stratigrafia tipo. (Fonte: [2], pag. 12).....	3
Figura 1.2 - Tensioni indotte su una pavimentazione flessibile. (Fonte: [2], pag. 117, 125).....	5
Figura 1.3 - Tipologie di pavimentazioni flessibili in alternativa della tradizionale. CB è conglomerato bituminoso a caldo, MC è misto cementato, MG è misto granulare, U è usura, C è binder, B è base, D è usura drenante, CB-BF è base con conglomerato bituminoso a freddo con emulsione bitume modificato, FSF è fondazione stabilizzata con emulsione o bitume schiumato, FSC è fondazione stabilizzata con calce o calce e cemento. (Fonte: [1], vol. 1, pag. 603)	5
Figura 1.4 - Pavimentazione stradale flessibile; funzioni e materiali di ogni strato costitutivo. (Fonte: [2], pag. 18).....	6
Figura 1.5 - Schema di un impianto di tipo continuo <i>drum mixer</i> per la produzione di conglomerati bituminosi. (Fonte: [1], vol. 2, pag. 158).....	15
Figura 1.6 - Schema di un impianto di tipo discontinuo per la produzione di conglomerati bituminosi. (Fonte: [1], vol. 2, pag. 159).....	16
Figura 1.7 - Sezione della torre di miscelazione. (Fonte: [1], vol. 2, pag. 160).....	17
Figura 1.8 - Grafico semplificato dell'andamento della rigidità all'aumentare del numero di cicli di carico. (Fonte: [1], vol. 1, pag. 550).....	21
Figura 1.9 - Rappresentazione nel piano complesso del modulo complesso E^* . (Fonte: creazione personale)	25
Figura 1.10 - Modulo complesso G^* e angolo di fase δ . (Fonte: [1], vol. 1, pag. 506). 26	
Figura 1.11 - Schema semplificato del processo di distillazione frazionata del petrolio greggio. (Fonte: [1], vol.1, pag. 493).....	28
Figura 1.12 - Schema semplificato di una unità visbreaking di tipo <i>coil</i> . (Fonte [14], pag. 230)	29
Figura 1.13 - Schema semplificato di una unità visbreaking di tipo <i>soaker</i> . (Fonte [14], pag. 231).....	30
Figura 1.14 - Schema modello colloidale di Nellensteyn F.J. (1924). (Fonte: [1], vol. 1, pag. 495).....	31

Figura 2.1 - Aggregati vergini impiegati nel lavoro sperimentale. Da sinistra: sabbia calcarea, aggregato grosso di calcare (6/12 e 12/16) e filler di recupero.	41
Figura 2.2 - Frazioni di RAP impiegate nel lavoro sperimentale. Da sinistra: RAP 0/8 e RAP 8/16.	46
Figura 2.3 - Bitume Primario o Straight-run (S) e bitume Visbreaking (V) impiegati nel lavoro sperimentale.....	49
Figura 2.4 - Forno da laboratorio impiegato e relativi comandi con temperatura impostata rispettivamente a 140 °C e a 170 °C.	56
Figura 2.5 - Modalità di applicazione dell' <i>additivo A</i> eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: dosaggio <i>additivo A</i> direttamente nel bitume vergine e successiva miscelazione.	56
Figura 2.6 - Identificazione della tara delle lattine metalliche eseguita nel lavoro sperimentale.....	57
Figura 2.7 - Modalità di applicazione dell' <i>additivo B</i> eseguite nel lavoro sperimentale. Da sinistra: spruzzatura dell' <i>additivo B</i> sul RAP e risultato finale.	58
Figura 2.8 - Bilance da laboratorio impiegate nel lavoro sperimentale.	59
Figura 2.9 - Miscelatore meccanico impiegato nel lavoro sperimentale, pale e console comandi con display riportante la temperatura di miscelazione adottata nel lavoro sperimentale.....	59
Figura 2.10 - A sinistra: pressa a taglio giratoria impiegata nel lavoro sperimentale, con fustella alloggiata nella camera di compattazione. A destra: fase di estrazione del provino compattato con l'ausilio della pompa idraulica.	62
Figura 2.11 - A destra: fustella con coperchio da 100 mm impiegata nel lavoro sperimentale. A sinistra: fustella contenente il materiale miscelato da compattare per ottenere il provino.....	63
Figura 2.12 - Display della console comandi con i parametri di prova relativi al lavoro sperimentale.....	63
Figura 2.13 - Numero di giri relativi ad ogni provino, necessari per ottenere l'altezza imposta di 150 mm.	65
Figura 2.14 - Rappresentazione delle fasi, eseguite nel lavoro sperimentale, per preparare un provino compattato all'esecuzione della prova dinamica di modulo	

complesso. Da sinistra: provino compattato, ridimensionamento (fase I), spianatura delle basi con resina (fase IV) e posizionamento di 6 riscontri sul contorno (fase V)...	66
Figura 2.15 - Misurazioni sul provino ridimensionato. Bilancia da laboratorio e calibro manuale di tipo a corsoio a nonio semplice.....	67
Figura 2.16 - Materiali impiegati nel lavoro sperimentale per la fase IV di spianatura delle basi del provino ridimensionato.....	68
Figura 2.17 - Dettagli della procedura di spianamento di una faccia del provino ridimensionato eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: posizionamento della base metallica con superficie liscia perfettamente a livello, distribuzione della resina su una faccia del provino ridimensionato, rimozione della resina adiacente al perimetro della base del provino con l'ausilio di una spatolina.....	69
Figura 2.18 - Dettagli della procedura di spianamento di una faccia del provino ridimensionato eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: solidificazione della resina con base di carico in testa al provino e controllo livello, provino con base spianata a procedura ultimata.	70
Figura 2.19 - Apparecchiatura e materiali necessari per il posizionamento di 6 riscontri posti a 120° tra di loro nel piano.	70
Figura 2.20 - <i>Universal Testing Machines (UTM-30)</i> , macchinario impiegato nel lavoro sperimentale per eseguire la prova dinamica di modulo complesso. Da sinistra: computer, centralina, camera climatica/di carico e alimentatore idraulico.	72
Figura 2.21 - Dettagli <i>UTM-30</i> . A sinistra: sistema traversa/pistone interno alla camera climatica; a destra: console comandi.	73
Figura 2.22 - Dettagli di un provino di una miscela 50RAP alloggiato sulla traversa con i tre <i>trasduttori LVDT</i> posizionati mediante i relativi supporti <i>Xmen</i> , testa di carico e termometro interno.	75
Figura 2.23 - Sezione <i>Setup and Control</i> del software per l'esecuzione della prova dinamica.....	77
Figura 2.24 - Finestra <i>Virtual Pendant</i> del software per l'esecuzione della prova dinamica. Da sinistra: motori spenti e <i>Canale 1</i> , motori accesi e <i>Canale 1</i> (configurazione adoperata nel lavoro svolto per avviare la prova dinamica e muovere il pistone), motori accesi e <i>Canale 1</i> (comando abbassamento del pistone), motori spenti e <i>Canale C</i> (per muovere la traversa).....	78

Figura 2.25 - Finestra <i>Transducer Levels</i> del software per l'esecuzione della prova dinamica. Barre colorate relative al pistone (rosso), <i>trasduttori LVDT</i> (verde, blu, nero) e finestra di comando per settare i trasduttori.....	79
Figura 2.26 - <i>Tuning</i> del software per l'esecuzione della prova dinamica.....	80
Figura 2.27 - Prova di test alla frequenza di carico di 1 Hz per valutare gli errori.	81
Figura 2.28 - Finestra di <i>Pre-Test Check List</i> del software per confermare l'avvio della prova dinamica.	81
Figura 2.29 - <i>Test Data</i> del software per l'esecuzione della prova dinamica. Riporta i parametri dinamici misurati mediante la prova alle frequenze indagate e la rappresentazione grafica delle curve del carico e dei trasduttori.....	82
Figura 2.30 - Applicazione del <i>principio tempo-temperatura, shift factors</i> e costruzione della <i>curva maestra</i> . (Fonte: [1], vol. 1, pag. 510).....	87
Figura 2.31 - Schema del <i>modello 2S2PID</i> . (Fonte: [21]).....	88
Figura 2.32 - Legame tra i parametri del <i>modello 2S2PID</i> e la curva nel <i>piano di Cole-Cole</i> . (Fonte: creazione personale, rivisitazione da: [21, 22]).....	90
Figura 2.33 - Illustrazione delle fasi eseguite in ordine cronologico, nel lavoro sperimentale trattato, per determinare le caratteristiche volumetriche con il <i>procedimento C</i> detto <i>procedimento con provino sigillato</i>	95
Figura 3.1 - Rappresentazione grafica nel <i>piano di Black</i> ($ E^* -\phi$) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).	108
Figura 3.2 - Rappresentazione grafica nel <i>piano di Cole-Cole</i> (E_2-E_1) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).	109
Figura 3.3 - Rappresentazione grafica nel <i>piano di Black</i> ($ E^* -\phi$) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.	111

Figura 3.4 - Rappresentazione grafica nel <i>piano di Cole-Cole</i> (E_2-E_1) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.....	112
Figura 3.5 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative <i>curve maestre</i> del modulo dinamico al variare della frequenza relativa ($ E^* f_r$) a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).	114
Figura 3.6 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative <i>curve maestre</i> dell'angolo di fase al variare della frequenza relativa ($\phi-f_r$) a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).	116
Figura 3.7 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative <i>curve maestre</i> del modulo dinamico al variare della frequenza relativa ($ E^* f_r$) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.....	118
Figura 3.8 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative <i>curve maestre</i> dell'angolo di fase al variare della frequenza relativa ($\phi-f_r$) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.....	120
Figura 3.9 - Valori del <i>parametro di Glover-Rowe</i> dei provini delle miscele di progetto.	122
Figura 3.10 - Valori del <i>modulo statico</i> E_0 dei provini delle miscele di progetto.....	123
Figura 3.11 - Valori del <i>modulo vetroso</i> E_∞ dei provini delle miscele di progetto.	123
Figura 3.12 - Valori del parametro k delle miscele di progetto.....	124
Figura 3.13 - Valori del parametro h delle miscele di progetto.....	125
Figura 3.14 - Valori del parametro δ delle miscele di progetto.....	126
Figura 3.15 - Valori del parametro $\log(\beta)$ delle miscele di progetto.....	127

Figura 3.16 - Valori del parametro $\log(\tau_0)$ delle miscele di progetto. 128

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 - Identificazione delle 16 miscele totali di progetto di conglomerato bituminoso confezionato a caldo in laboratorio per il lavoro sperimentale trattato. Il RAP è riciclato a caldo.	37
Tabella 2.2 - Caratteristiche delle miscele di progetto di conglomerato bituminoso confezionato a caldo; da confezionare due volte variando solo il tipo di bitume vergine (Primario o Straight-run e Visbreaking). Il RAP è riciclato a caldo.	38
Tabella 2.3 - Curva granulometrica del calcare 12/16. (P è il passante e d è il diametro).	42
Tabella 2.4 - Curva granulometrica del calcare 6/12. (P è il passante e d è il diametro).	43
Tabella 2.5 - Curva granulometrica del calcare 4/8. (P è il passante e d è il diametro).	43
Tabella 2.6 - Curva granulometrica della sabbia calcarea 0/6. (P è il passante e d è il diametro).....	44
Tabella 2.7 - Curva granulometrica del filler di recupero. (P è il passante e d è il diametro).....	45
Tabella 2.8 - % di fresato impiegabile in una miscela di conglomerato bituminoso riciclato e confezionato a caldo indirizzata allo strato di binder secondo le specifiche tecniche di Capitolato Anas [2, 5] e della provincia di Bolzano [6].	46
Tabella 2.9 - Curva granulometrica del RAP 8/16. (P è il passante e d è il diametro)..	47
Tabella 2.10 - Curva granulometrica del RAP 0/8. (P è il passante e d è il diametro)..	47
Tabella 2.11 - % di bitume in peso nel RAP.	48
Tabella 2.12 - Proprietà del bitume interno al RAP.	48
Tabella 2.13 - Proprietà dei due tipi di bitume impiegati: Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V).	49
Tabella 2.14 - Proprietà dell'additivo A.	50
Tabella 2.15 - Dettagli di impiego dell'additivo A per il lavoro sperimentale.....	51
Tabella 2.16 - Proprietà dell'additivo B.	51
Tabella 2.17 - Dettagli di impiego dell'additivo B per il lavoro sperimentale.....	52
Tabella 2.18 - Fuso granulometrico e intervallo della % di bitume in miscela di Capitolato Anas [5] per lo strato di binder. (P è il passante e d è il diametro).....	53

Tabella 2.19 - Curve granulometriche di progetto delle miscele 00RAP e 50RAP e fuso granulometrico di Capitolato Anas [5]. (P è il passante e d è il diametro).....	54
Tabella 2.20 - Ricetta di progetto della miscela 00RAP.	54
Tabella 2.21 - Ricetta di progetto della miscela 50RAP.	55
Tabella 3.1 - Volume dei vuoti $V_{m,sea}$ [%] (determinato con il <i>procedimento C</i> , con <i>provino sigillato</i>) relativo ad ogni provino compattato e ridimensionato delle miscele di progetto confezionate con bitume vergine di tipo Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V).	105

INTRODUZIONE

La presente tesi dal titolo “*Valutazione dell'andamento delle curve maestre di conglomerati bituminosi riciclati a caldo al variare della temperatura di miscelazione, del tipo di bitume vergine e di additivo rigenerante*” affronta una tematica di attuale rilevanza: il riciclaggio a caldo del conglomerato bituminoso. Questo concetto rientra nelle attuali esigenze mondiali di procedere verso uno *sviluppo economico di tipo sostenibile*, ritenuto necessario per abbattere il danno ambientale antropico e salvaguardare e preservare per il futuro l’ambiente e le risorse naturali non rinnovabili disponibili. Perciò, è fondamentale ormai riciclare e riutilizzare un materiale, usandolo come risorsa e non come rifiuto da destinare allo smaltimento in discarica, favorendo così un risparmio di tipo economico, di risorse e di energie derivante dalla riduzione sia del quantitativo di rifiuti, che di materie vergini estratte e dal loro rispettivo trasporto. Inoltre, tutto il processo produttivo di un materiale dovrebbe vergere verso una visione ecosostenibile, prestando particolare attenzione all’impatto ambientale e alle emissioni nocive prodotte, ridurre il fabbisogno energetico produttivo e attingere a risorse energetiche rinnovabili, preferendo possibilmente l’uso di materiali di recupero rispetto a quelli di primo impiego. [1]

Pertanto, si può sostenere che utilizzare un materiale come il *conglomerato bituminoso di recupero*, spesso chiamato anche con l’acronimo *RAP* del termine inglese *Reclaimed Asphalt Pavement*, rientra nel concetto appena esposto. Ovviamente bisogna garantire che il suo impiego non comprometta le caratteristiche meccaniche ricercate nella pavimentazione stradale per assicurarne le prestazioni strutturali e funzionali e che non sia svantaggioso in termini economici in un bilancio costi/benefici. Infine, è sempre richiesto tutelare la salute umana e l’ambiente, garantendo anche un possibile futuro riciclaggio e rimpiego del materiale a fine vita utile della pavimentazione. [1]

Per un corretto impiego del RAP, soprattutto nel riciclaggio a caldo, è fondamentale determinare le sue proprietà e caratteristiche, ricordando che essendo ricavato da una vecchia pavimentazione, in esso, oltre ad aggregati di diversa natura, è sicuramente presente un quantitativo di bitume deteriorato dal fenomeno inevitabile dell’invecchiamento. È noto che questo fenomeno provoca sempre un aumento della rigidità e della fragilità del materiale, con la perdita delle caratteristiche iniziali. [1, 2]

Un recente studio in letteratura [3] evidenzia un aumento in termini di rigidità del 25% ÷ 60% riciclando e confezionando a caldo delle miscele con un quantitativo di RAP del 50% rispetto a miscele confezionate a caldo senza fresato, provocando una diminuzione della resistenza alle fessurazioni. Per ovviare a tale problema, nel riciclaggio a caldo, è necessaria l'aggiunta di particolari additivi chiamati rigeneranti. Essi sono presenti in commercio in svariate tipologie, aventi caratteristiche, costituzione e modalità di applicazione differenti, ma generalmente tutti permettono la parziale riacquisizione di alcune principali proprietà perse dal legante invecchiato, garantendone una riattivazione e un impiego di RAP in percentuali più elevate.

Attualmente, ricercando un riscontro a livello mondiale, si nota sempre più una propensione al riciclo, cercando di utilizzare elevate percentuali di RAP prossime anche al 100%, soprattutto negli Stati Uniti di America, Giappone, Germania e Paesi Bassi [4]. Le direttive tecniche italiane, come le specifiche di Capitolato Speciale di Appalto Anas [2, 5] e quelle della provincia di Bolzano [6], dettano dei limiti di percentuale massima impiegabile di RAP in peso sulla miscela degli aggregati, differenti sia per ogni strato della pavimentazione stradale flessibile che per la tecnica di riciclo adottata.

Una domanda, quindi, sorge spontanea: quali materiali vergini (bitume vergine e additivi rigeneranti) e quali modalità di preparazione della miscela (temperatura di preriscaldamento e di miscelazione) sono idonei per un impiego ottimale di un quantitativo di RAP in percentuali elevate senza compromettere le caratteristiche meccaniche e reologiche del conglomerato bituminoso confezionato a caldo?

Il lavoro sperimentale trattato in questa tesi, svolto prevalentemente presso le strutture del *Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)* della *Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche*, intende ricercare una risposta all'interrogativo precedente.

Nel dettaglio, la sperimentazione riguarda la caratterizzazione reologica di 16 miscele di conglomerato bituminoso, indirizzato allo strato di binder, appositamente confezionato a caldo in laboratorio variando i materiali costitutivi e le condizioni di produzione. Si identificano due ricette, una con 0% di RAP e una con 50% di RAP, le miscele vengono così confezionate differenziando oltre la presenza di RAP (0% e 50%), anche due temperature di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C), due tipi di bitume vergine tradizionale ottenuti con due differenti processi di distillazione del petrolio

greggio (Primario o Straight-run e Visbreaking) e l'eventuale aggiunta di due differenti tipologie di additivi rigeneranti di bitume con diverse caratteristiche e modalità di applicazione (A e B). Successivamente, si determinano e si valutano le caratteristiche reologiche di ogni miscela di progetto, sottoponendo due provini di ogni miscela a prove dinamiche di modulo complesso (in regime oscillatorio con forzante sinusoidale) indagando diverse frequenze di carico (20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 Hz) a temperature di prova differenti (5, 20, 35 e 50 °C). Mediante lo studio dei risultati di questa prova si valutano gli effetti sul comportamento reologico di ogni miscela confezionata variando appunto le componenti e le modalità di produzione sopraccitate. In definitiva, si intende ricercare e soffermare l'attenzione sull'interazione di tutti questi fattori. Nel dettaglio:

- si vuole marcare l'importanza della corretta scelta della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione da adottare;
- si ritiene rilevante valutare se, oltre a distinguere un bitume vergine tradizionale dalla classe di penetrazione o dal *Performance Grade*, è necessario conoscere e riportare anche il processo di distillazione del petrolio greggio da cui si ricava.

La presente tesi si articola in tre capitoli principali:

- *Capitolo 1*: si definisce lo stato dell'arte inerente al lavoro sperimentale svolto, riportando il lavoro di ricerca preliminare effettuato sul tema del conglomerato bituminoso di recupero e i parametri che ne influenzano le proprietà;
- *Capitolo 2*: si illustra sia la parte prevalentemente operativa, eseguita in laboratorio, che la parte teorica della prova di modulo dinamico necessaria per una corretta interpretazione e rappresentazione dei risultati sperimentali;
- *Capitolo 3*: si espongono i risultati sperimentali ottenuti valutando l'influenza del fresato, degli eventuali additivi rigeneranti di bitume, della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione e del tipo di bitume vergine sull'andamento del comportamento reologico del conglomerato bituminoso di recupero, rappresentato graficamente mediante le *curve maestre*.

CAPITOLO 1

Stato dell'arte

Il conglomerato bituminoso è un materiale costituito dalla miscelazione di aggregati lapidei, bitume, filler ed eventuali additivi. Viene impiegato prevalentemente nel campo dell'ingegneria civile, soprattutto per la realizzazione degli strati superficiali della pavimentazione stradale di tipo flessibile. Come già detto, il tema del riciclaggio del conglomerato bituminoso, affrontato in questo capitolo, rientra nelle attuali esigenze mondiali di procedere verso uno *sviluppo economico di tipo sostenibile*. [1]

Di seguito, si definisce lo stato dell'arte inerente al lavoro sperimentale svolto. Si espone inizialmente la pavimentazione stradale nel suo complesso, le funzioni che deve assolvere e le varie tipologie; successivamente ci si sofferma sul tema principale del conglomerato bituminoso di recupero, in particolare si illustrano le proprietà, le tecniche operative di demolizione e di riciclaggio. Siccome lo studio sperimentale affronta il tema della caratterizzazione meccanica del conglomerato bituminoso, è basilare avvalersi dei concetti sulla reologia del materiale e del fenomeno dell'invecchiamento del legante bituminoso rettificabile con il relativo impiego di additivi rigeneranti di bitume.

1.1 Pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale è parte integrante dell'opera di ingegneria civile chiamata *strada*. Con il termine *pavimentazione stradale*, detta anche *sovrastuttura stradale*, si identifica la porzione più superficiale del corpo stradale a contatto con l'atmosfera e con il flusso veicolare. A livello ingegneristico, per qualunque opera civile, si differenziano le seguenti fasi: progettazione, esecuzione, esercizio, manutenzione ordinaria e straordinaria, eventuali adeguamenti funzionali, analisi di sicurezza e demolizione a fine vita utile; tutelando la salvaguardia della salute umana e dell'ambiente durante tutte le fasi elencate. Il degrado di un'opera negli anni è inevitabile, ma attuando un rigoroso piano di manutenzione è possibile mitigare e ridurre gli effetti, mantenendo così per tutta la fase di esercizio la sicurezza, la qualità, la funzionalità, il valore economico, le proprietà e le caratteristiche ricercate. [1]

Nello specifico, la mansione della pavimentazione stradale è di garantire, per tutta la sua vita utile di progetto, i requisiti strutturali e funzionali necessari per un corretto utilizzo dell'infrastruttura da parte degli utenti stradali. Nel dettaglio, sono richiesti requisiti strutturali di portanza e di durabilità nei confronti delle azioni dei carichi del flusso di traffico veicolare e degli eventi atmosferici locali agenti. Invece, i requisiti funzionali riguardano: il comfort di guida percepito dagli utenti stradali durante la marcia manifestandosi in vibrazioni trasmesse dall'irregolarità della superficie della pavimentazione, la sicurezza di utilizzo da assicurare mediante l'aderenza e un'equilibrata ripartizione delle forze in gioco nel contatto diretto tra pneumatico e pavimentazione e l'inquinamento acustico prodotto dal rotolamento dello pneumatico in funzione della macro e mega tessitura della pavimentazione. Quindi, la pavimentazione stradale presenta nel complesso una superficie prevalentemente piana, regolare e inclinata sia longitudinalmente che trasversalmente; mentre, la sua struttura è costituita dalla sovrapposizione di diversi strati aventi funzioni, spessori, caratteristiche, proprietà e materiali differenti tra loro. Le inclinazioni sono necessarie per esigenze progettuali, topografiche, costruttive e per assicurare l'allontanamento dell'acqua piovana. Infatti, è appurato che per una pavimentazione stradale la presenza di acqua, sia nel suo stato liquido che solido sotto forma di ghiaccio, influisce negativamente sulla sicurezza di marcia se non viene adeguatamente smaltita, sulla durabilità e sulle caratteristiche sia della pavimentazione che del sottofondo se penetra attraverso lo strato superficiale a causa della permeabilità e delle probabili fessure e discontinuità. Oltre all'acqua meteorica, richiedono particolari attenzioni le possibili presenze in sito di falde acquifere, di fenomeni di risalita capillare e dell'azione combinata dei cicli di gelo e disgelo con la temperatura ambientale. [1, 2]

Abbinando tra loro materiali e strati differenti, cambiano le caratteristiche della pavimentazione e il modo in cui vengono trasmessi i carichi al sottofondo; si distinguono tre principali tipologie di pavimentazioni stradali moderne (Figura 1.1):

- *flessibili*;
- *semi-rigide*;
- *rigide*.

Una pavimentazione flessibile, formata prevalentemente da strati in conglomerato bituminoso e studiata modellandola come un multistrato elastico, garantisce una

distribuzione uniforme e progressiva delle azioni sollecitanti fino al sottofondo, ma manifesta una distribuzione non uniforme delle deformazioni. [1, 2]

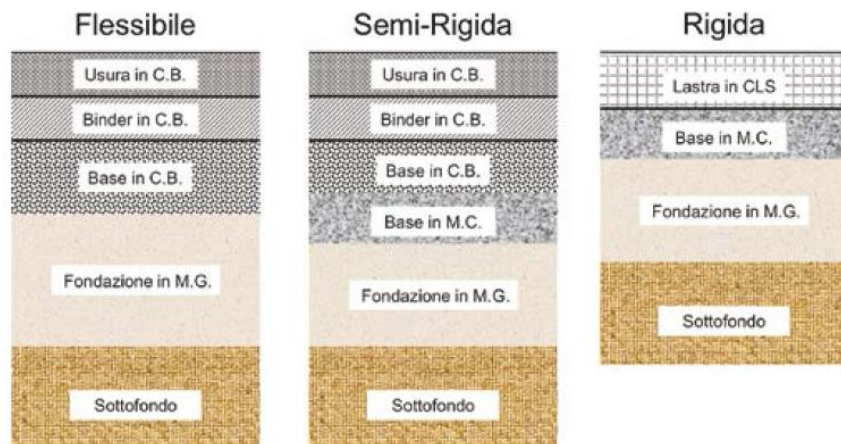


Figura 1.1 - Principali tipologie di pavimentazioni stradali e loro stratigrafia tipo. (Fonte: [2], pag. 12)

Di seguito, si approfondiscono separatamente le tre tipologie di pavimentazioni stradali, trascurando le pavimentazioni storiche.

Pavimentazione stradale rigida

La stratigrafia tipica di una pavimentazione rigida è identificata da uno strato superficiale in conglomerato cementizio alloggiato su uno strato di base in misto cementizio che a sua volta poggia su uno strato di fondazione in misto granulare, al di sotto del quale è situato il sottofondo. In Italia, questa tipologia di pavimentazione, soprattutto per le condizioni climatiche non estreme che non ne obbligano la realizzazione, trova spazio di utilizzo prevalentemente nei piazzali degli aeroporti e interporti, necessarie, poiché, vi si riscontrano elevati carichi di esercizio; inoltre, è impiegabile anche in presenza di sottofondi aventi scarse caratteristiche. Ultimamente, l'Anas [2] considera il suo impiego, in alternativa al conglomerato bituminoso, nei tratti di pavimentazione all'interno delle gallerie, con la prospettiva di aumentare la sicurezza sia in caso di incendi che di luminosità avendo una superficie più chiara e riflettente. La pavimentazione rigida possiede ordinariamente una vita di esercizio maggiore rispetto alle altre tipologie, ovviamente considerando le medesime condizioni di carico, ma ha un costo di realizzazione e manutenzione superiore, è vulnerabile agli eventuali

cedimenti differenziali, è soggetta a fessurazioni e richiede la presenza di giunti. Sussistono diverse tipologie di giunti, aventi funzioni differenti, detti: di contrazione, di dilatazione, di costruzione e longitudinali con barre di collegamento; i primi due elencati non sono sempre presenti. Infine, si contraddistinguono diverse tipologie di pavimentazioni rigide in funzione della necessità o meno di predisporre armature metalliche di rinforzo diffuse nelle due direzioni principali del piano e della presenza o meno di giunti di contrazione disposti trasversalmente; queste vengono così distinte in: pavimentazioni con giunti non armate, pavimentazioni con giunti armate e pavimentazioni con armatura metallica continua senza giunti trasversali. [1, 2]

Pavimentazione stradale flessibile e semi-rigida

Le pavimentazioni flessibili e semi-rigide sono prevalentemente formate da strati in conglomerato bituminoso, perciò, assumono per il lavoro sperimentale svolto un ruolo principale. Sono adottate in Italia come pavimentazione nella quasi globalità della rete stradale urbana ed extraurbana, essendo operativamente meno problematiche da realizzare e anche economicamente più vantaggiose da riparare, nonostante a parità di condizioni al contorno si riscontra una durata di vita utile inferiore a quelle rigide. In questa tipologia di pavimentazione si identificano, procedendo dal più superficiale al più profondo, i seguenti strati: lo *strato o manto di usura*, lo *strato di binder o di collegamento*, lo *strato di base* e lo *strato di fondazione*, che poggiano sul *sottofondo*. Questi strati, aventi caratteristiche e funzioni differenti, se ben progettati e realizzati, assicurando una perfetta adesione di interfaccia anche mediante la tecnica delle mani d'attacco, permettono un comportamento globale dell'intera pavimentazione di tipo flessibile sotto l'azione dei carichi agenti (Figura 1.2), senza subire deformazioni e danni permanenti. [1, 2]

La scelta di procedere con la realizzazione di diversi strati sovrapposti, anziché, uno unico, è dettata da problemi sia operativi di errata compattazione per uno strato altrimenti troppo spesso che funzionali. Infatti, diversificando le miscele, variando il quantitativo e la qualità dei materiali costitutivi, si hanno caratteristiche differenti per ogni strato e si riscontra un ingente risparmio di tipo economico e di risorse. Generalmente, procedendo verso gli strati inferiori della pavimentazione, si impiegano

conglomerati bituminosi aventi dosaggio minore di bitume e materiali costitutivi di qualità e costi minori. [1, 2]

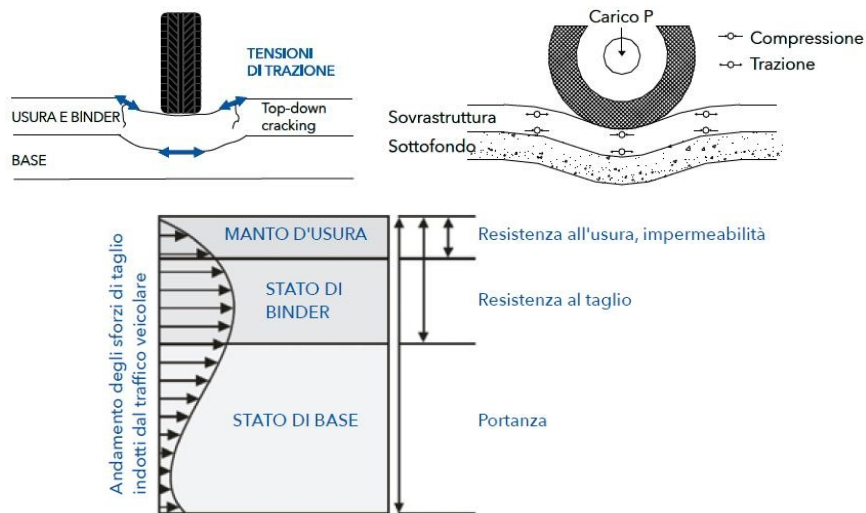


Figura 1.2 - Tensioni indotte su una pavimentazione flessibile. (Fonte: [2], pag. 117, 125)

Una pavimentazione flessibile tradizionale ha gli strati di usura, binder e base in conglomerato bituminoso stesi su uno strato di fondazione in misto granulare non legato che a sua volta grava sul sottofondo (Figura 1.1). Nella pratica progettuale si riscontrano svariate tipologie di pavimentazioni flessibili (Figura 1.3) oltre la tradizionale sopraccitata. [1, 2]

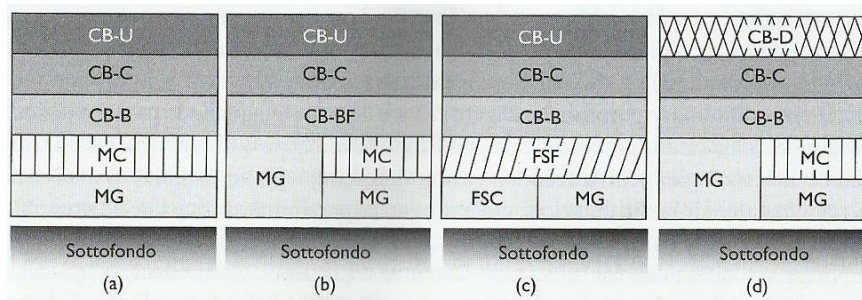


Figura 1.3 - Tipologie di pavimentazioni flessibili in alternativa della tradizionale. CB è conglomerato bituminoso a caldo, MC è misto cementato, MG è misto granulare, U è usura, C è binder, B è base, D è usura drenante, CB-BF è base con conglomerato bituminoso a freddo con emulsione bitume modificato, FSF è fondazione stabilizzata con emulsione o bitume schiumato, FSC è fondazione stabilizzata con calce o calce e cemento. (Fonte: [1], vol. 1, pag. 603)

La pavimentazione semi-rigida (Figura 1.1) può essere vista come una variante della pavimentazione flessibile tradizionale, infatti, le stratigrafie sono molto simili con la sola differenza che nella semi-rigida, tra lo strato di base in conglomerato bituminoso e quello di fondazione in misto granulare, è presente uno strato aggiuntivo in misto cementato, questa tipologia trova largo impiego nelle situazioni di ingente flusso di traffico veicolare. [1, 2]

STRATO	FUNZIONE	MATERIALI
USURA	REGOLARITÀ E ADERENZA	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BINDER	COLLEGAMENTO	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BASE	STRUTTURALE RIPARTIZIONE DEI CARICHI	CONGL. BITUMINOSO MISTI CEMENTATI
FONDAZIONE	TRASMISSIONE DEI CARICHI AL SOTTOFONDO	MISTI GRANULARI TERRE STABILIZZATE
SOTTOFONDO	ASSORBIMENTO E DISSIPAZIONE DEI CARICHI	TERRE STABILIZZATE

Figura 1.4 - Pavimentazione stradale flessibile; funzioni e materiali di ogni strato costitutivo. (Fonte: [2], pag. 18)

Successivamente, si espone ogni singolo strato presente in una pavimentazione flessibile tradizionale, evidenziandone le funzioni e i materiali costitutivi (Figura 1.4):

- il manto di usura è lo strato a contatto con lo pneumatico, perciò, deve assorbirne le azioni tangenziali indotte dal moto e garantire le condizioni di comfort, rumorosità e sicurezza della guida tramite una superficie regolare e sufficientemente ruvida per assicurare l'instaurarsi dell'aderenza in qualunque condizione meteorologica. Il tappeto di usura è realizzato in conglomerato bituminoso, quest'ultimo, in una pavimentazione non drenante è detto *chiuso* e deve soddisfare anche il requisito di impermeabilità con la funzione di protezione per gli strati sottostanti dal degrado indotto dall'infiltrazione dell'acqua meteorica; viceversa, in una pavimentazione drenante si ha un conglomerato bituminoso detto *aperto*. Lo strato di usura è formato da materiali più costosi aventi caratteristiche migliori; infatti, è richiesto l'uso di aggregati non carbonatici come ad esempio il basalto. Il Capitolato Anas [5] permette l'utilizzo del conglomerato bituminoso di recupero nella percentuale massima del 15% in peso degli aggregati vergini;
- lo strato di binder, detto anche strato di collegamento, è in conglomerato bituminoso, ha funzione strutturale e costruttiva, fornendo per la stesa dello

strato di usura sovrastante una superficie regolare con le inclinazioni longitudinali e trasversali di progetto. Il Capitolato Anas [5] permette l'utilizzo del conglomerato bituminoso di recupero nella percentuale massima del 25% in peso degli aggregati vergini;

- lo strato di base è in conglomerato bituminoso, ha il compito di ridistribuire i carichi sovrastanti al sottofondo, garantendone la portanza. Il Capitolato Anas [5] permette l'utilizzo del conglomerato bituminoso di recupero nella percentuale massima di circa il 30% in peso degli aggregati vergini se riciclato a caldo e fino al 100% se è riciclato a freddo;
- lo strato di fondazione è generalmente in misto granulare compattato, se necessario può essere a sua volta stabilizzato a calce o a cemento. Svolge una funzione strutturale, rappresenta una sorta di filtro per arrestare una probabile risalita capillare dal sottofondo e ovviamente funge da piano per una posa regolare degli strati superiori. Il Capitolato Anas [5] permette l'impiego di materiali di recupero certificati come il RAP oppure inerte proveniente da costruzioni e demolizioni o da scavi;
- il sottofondo è uno strato di terreno che ha la mansione di assorbire e dissipare i carichi agenti trasmessi dagli strati sovrastanti. Per un corretto funzionamento della pavimentazione, per non insorgere in cedimenti differenziali che causano un degrado prematuro dell'opera con gravi danni e fessurazioni, il sottofondo deve possedere caratteristiche meccaniche resistenti coerenti con i carichi agenti e con gli strati della pavimentazione sovrastante; inoltre, deve risultare privo di contenuti organici, di terreni gelivi e della componente limosa e argillosa sensibile alla presenza di acqua. L'Anas non consente l'impiego di materiale di recupero proveniente da qualunque demolizione compreso il RAP. Infine, a parità di carichi agenti, si ha che all'aumentare delle caratteristiche meccaniche resistenti del sottofondo è possibile utilizzare strati con spessori inferiori. Quindi, se necessario, risulta economicamente più vantaggioso eseguire interventi migliorativi per il sottofondo, come la sostituzione del materiale con aggregati selezionati, l'impiego di geotessuti oppure effettuare una stabilizzazione mediante calce o cemento. [1, 2, 5]

Si ricorda che le miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi sono destinate allo strato di binder.

Le principali possibili forme di degrado di una pavimentazione flessibile sono: la fessurazione dovuta a rottura conseguente al fenomeno della fatica, il fenomeno dell'ormaiamento, la fessurazione prodotta dall'insorgere di violenti gradienti termici e la perdita di micro e macro tessitura superficiale conseguente all'azione levigante dello pneumatico durante il moto (esclusivamente negli strati di usura) [1].

La scelta della tipologia di pavimentazione stradale e della sua stratigrafia è vincolata dalle condizioni di carico agenti, dalle condizioni ambientali locali e dalla qualità del sottofondo. Esistono diversi metodi di dimensionamento e verifica delle pavimentazioni, si dividono in metodi empirici e metodi razionali, garantendo una vita utile di esercizio senza l'insorgere di forme di degrado. [1, 2]

1.2 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Il *conglomerato bituminoso di recupero* o *RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)* è ottenuto dal materiale in conglomerato bituminoso rimosso dagli strati di una pavimentazione stradale esistente da sostituire, poiché, prematuramente degradata o giunta a fine vita. La demolizione e asportazione di questi strati si può eseguire utilizzando differenti macchine da cantiere, tramite le tecniche di *fresatura* o di *scarifica*, a seconda delle esigenze economiche, logistiche e operative; infatti, il RAP può essere riciclato e reimpiegato nel medesimo sito oppure indirizzato ad un centro di stoccaggio autorizzato per un futuro recupero o più raramente in discarica per lo smaltimento. [1]

Di seguito, si riportano separatamente le tecniche di fresatura e di scarifica.

Fresatura

Il conglomerato bituminoso rimosso con la tecnica della fresatura, eseguita con l'ausilio di macchine da cantiere chiamate fresatrici, assume il nome di *fresato*. Generalmente si impiegano le fresatrici a freddo che permettono una demolizione selettiva dei diversi strati della pavimentazione stradale, ottimizzando così il riciclaggio, avendo, infatti, per ogni strato della pavimentazione un differente conglomerato bituminoso con diversi materiali costituenti e caratteristiche. Questo è possibile grazie al fatto che il

macchinario permette una demolizione in profondità precisa e selezionabile fino a circa 50 cm. Inoltre, la larghezza da demolire può variare fino ad un paio di metri, così da rimuovere il materiale di una corsia di marcia con un'unica passata della fresa. Perciò, il loro impiego consente di ottenere una superficie regolare a lavoro ultimato, utile per le operazioni di stesa della nuova pavimentazione o del nuovo singolo strato. La fresatrice è dotata di un tamburo rotante dentato per la frantumazione del conglomerato bituminoso e permette di convogliare il materiale fresato nel cassone degli autocarri per il successivo trasporto. Il materiale così fresato ha un diverso contenuto di grumi o di placche di conglomerato bituminoso che varia in funzione alla velocità di avanzamento della fresatrice e allo stato della pavimentazione stradale su cui si lavora, infatti, si nota che hanno una notevole influenza la temperatura, il livello fessurativo, la porosità e l'invecchiamento del bitume. [1]

Durante la fresatura a freddo gli aggregati di diametro maggiore si possono frantumare, provocando una diversa distribuzione granulometrica del materiale fresato rispetto al conglomerato bituminoso iniziale e, inoltre, la frazione fina, passante allo 0,5 mm, rimane inglobata nel bitume. Impiegando, invece, la fresatura a caldo, tecnica che prevede il riscaldamento dello strato superficiale con conseguente rammollimento del bitume, è possibile ridurre la frantumazione degli aggregati. Quest'ultima tecnica è impiegata nel riciclaggio a caldo in situ, approfondita nel paragrafo 1.2.2, valida per strati aventi spessori non elevati, ma ormai sempre più in disuso. [1]

Scarifica

Il conglomerato bituminoso degli strati di una pavimentazione stradale esistente può essere rimosso utilizzando la tecnica di scarifica e frantumazione mediante l'impiego di macchinari da cantiere tradizionali, quali escavatori e ripper, come alternativa alla tecnica di fresatura e all'utilizzo di fresatrici. In questo caso non si assicura una superficie regolare a lavoro di demolizione ultimato e generalmente il materiale rimosso è destinato ai centri di stoccaggio. Bisogna sottolineare, infatti, che il conglomerato bituminoso demolito con questa tecnica necessita di un'ulteriore fase di frantumazione eseguita in impianto mediante mulini, a martelli o a ganasce, per garantire delle dimensioni minori di materiale idonee al riciclo. [1]

1.2.1 Definizione e proprietà

Per identificare una congrua definizione del termine *conglomerato bituminoso di recupero* si esaminano le normative vigenti in materia. Infatti, il *D.M. 28 marzo 2018, n.69 - Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184 -ter, comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152* [7] definisce:

- 1) «conglomerato bituminoso»: il rifiuto costituito dalla miscela di inerti e leganti bituminosi identificata con il codice EER 17.03.02 proveniente:
 - a) da operazioni di fresatura a freddo degli strati di pavimentazione realizzate in conglomerato bituminoso;
 - b) dalla demolizione di pavimentazioni realizzate in conglomerato bituminoso;

- 2) «granulato di conglomerato bituminoso»: il conglomerato bituminoso che ha cessato di essere rifiuto a seguito di una o più operazioni di recupero [...].

[...] il conglomerato bituminoso cessa di essere qualificato come rifiuto ed è qualificato granulato di conglomerato bituminoso se soddisfa tutti i seguenti criteri:

[...] risponde agli standard previsti dalle norme UNI EN 13108-8 (serie da 1-7) o UNI EN 13242 in funzione dello scopo specifico previsto; [...].

[...] è comunemente utilizzato il granulato di conglomerato bituminoso:

per le miscele bituminose prodotte con un sistema di miscelazione a caldo nel rispetto della norma UNI EN 13108 (serie da 1-7);

per le miscele bituminose prodotte con un sistema di miscelazione a freddo;

per la produzione di aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici

per l'impiego nella costruzione di strade, in conformità alla norma armonizzata UNI EN 13242, ad esclusione dei recuperi ambientali. [...]. [7]

Si nota chiaramente che il *D.M. 28 marzo 2018, n.69* [7] non adopera mai il termine *conglomerato bituminoso di recupero*, ma lo tratta come rifiuto chiamandolo semplicemente *conglomerato bituminoso* con codice identificativo *EER 17.03.02*, nome che varia in *granulato di conglomerato bituminoso* se cessa di essere considerato un rifiuto. Inoltre, stabilisce anche le verifiche da soddisfare sul materiale e stabilisce il limite massimo di concentrazione ammissibile dei parametri ritenuti altamente dannosi per la salute umana e per l'ambiente al suo interno, questi sono: amianto, IPA, arsenico, metalli pesanti e molti altri elementi raccolti in una tabella nella norma. [7]

Mentre, la serie *UNI EN 13108:2016* identifica i requisiti per soddisfare la marcatura CE dei conglomerati bituminosi, nello specifico, la *UNI EN 13108-8:2016* si riferisce al *Conglomerato bituminoso di recupero*.

Il conglomerato bituminoso di recupero tende ad assumere le stesse proprietà dei materiali al suo interno, quindi, le proprietà del RAP dipendono dalla tipologia del conglomerato bituminoso dello strato da cui si ottiene e dalla storia della pavimentazione stradale demolita. Perciò, nella caratterizzazione delle proprietà hanno rilevanza il numero di rappezzi, di rifacimenti, di sigillature delle fessure e di applicazioni di mani d'attacco eseguite nella vita utile della pavimentazione. [1]

Il conglomerato bituminoso di recupero generalmente è formato da aggregati lapidei aventi ottime caratteristiche meccaniche e da bitume ormai invecchiato. Il suo reimpiego senza l'aggiunta di leganti bituminosi o cementizi è sconsigliato, poiché, presenta scarse capacità portanti dovute all'assenza della frazione fine e alla ridotta mobilitazione dell'attrito interno tra i granuli rivestiti di bitume. Perciò, non si utilizza il RAP per la realizzazione di sottofondi e di strati di fondazione non legati, sia per motivi tecnici, sia economici che ambientali. Trova generalmente impiego nella realizzazione degli strati della pavimentazione stradale con l'aggiunta di leganti bituminosi e/o cementizi e nella stabilizzazione dello strato di fondazione. Infatti, generalmente, per utilizzare il RAP, lo si introduce in una miscela di conglomerato bituminoso, mediante lo studio del mix design, in percentuali rispetto al peso totale degli aggregati variabili in funzione delle proprietà finali del prodotto ricercate e della tecnica di riciclaggio adottata. [1]

1.2.2 Tecniche di riciclaggio

Le tecniche e le modalità di riciclaggio del RAP variano in funzione di diversi fattori, questi sono: il luogo in cui si realizza la miscela di conglomerato bituminoso, che può essere in situ o in impianto, le caratteristiche di omogeneità del materiale da riciclare, la temperatura del processo produttivo e di riciclaggio, che può essere a caldo o a freddo e il tipo di legante impiegato. Quindi, le tecniche di riciclaggio del conglomerato bituminoso si dividono principalmente in due categorie: *riciclaggio a caldo* o *riciclaggio a freddo*, entrambe possono essere eseguite o *in situ* o *in impianto*. Inoltre, gli impianti possono essere *fissi* o *mobili*, i primi sono sempre nella stessa ubicazione,

gli ultimi sono temporanei e vengono posizionati nelle vicinanze del cantiere per sopperire alle esigenze delle tempistiche del trasporto. [1]

Il vantaggio principale di confezionare una miscela di conglomerato bituminoso in impianto è di avere un miglior controllo della produzione, dei materiali, dell'omogeneità e della qualità della miscela finale e delle eventuali emissioni nocive prodotte. Invece, realizzarla in situ ha il vantaggio che tutte le fasi operative sono eseguite in cantiere, quindi, in corso d'opera con tempistiche ridotte, inoltre, oltre a eliminare il problema economico, logistico e operativo del trasporto del conglomerato bituminoso prodotto in impianto, si riduce o si elimina del tutto la quantità di materiale rimosso da trasportare nei centri di stoccaggio, soprattutto se la si ricicla e riutilizza al 100%. [1]

La tecnica del riciclaggio a caldo utilizza il RAP per il confezionamento a caldo di miscele di conglomerato bituminoso. Bisogna considerare che in seguito all'esposizione ad elevate temperature, maggiori di 110 °C, si creano gas nocivi per la salute e per l'ambiente e si ha un invecchiamento addizionale del bitume presente nel RAP già ossidato dagli anni. Un lato positivo del confezionamento a caldo è che si manifesta una sorta di riattivazione del legante del RAP ossidato, che può essere ulteriormente aiutata dall'aggiunta in miscela di additivi rigeneranti di bitume, si crea così una fase legante combinata tra bitume riattivato e bitume vergine, che permette di ridurre l'impiego di bitume vergine e ovviamente di aggregati naturali. [1]

La tecnica del riciclaggio a freddo prevede il confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso a temperatura ambientale. Si considera il RAP solo come semplice aggregato di recupero, trascurando del tutto la presenza al suo interno del legante ossidato. In questa tecnica, non essendoci bisogno di raggiungere elevate temperature come nella tecnica a caldo, si ha, garantendo la stessa vita utile della pavimentazione, un dispendio inferiore di energia produttiva e un abbattimento dello sprigionamento di emissioni nocive. Inoltre, è possibile utilizzare una percentuale di RAP prossima al 100% del peso degli aggregati lapidei e introdurre nella miscela anche gli aggregati granulari di recupero da demolizioni di fondazioni stradali e anche dell'edilizia; permettendo così di ridurre notevolmente l'impiego di aggregati vergini che vengono introdotti in limitate percentuali solo per correggere la curva granulometrica. [1]

Di seguito, si illustrano separatamente le diverse tecniche di riciclaggio del RAP.

Riciclaggio a caldo in situ

Il riciclaggio a caldo in situ rispetto a quello in impianto necessita dell'ausilio di macchinari più onerosi, ma ha i vantaggi sovraesposti dell'eliminazione del trasporto del materiale rimosso nei centri di stoccaggio e del fatto che tutte le fasi operative sono eseguite in cantiere. Il suo campo di impiego è nella manutenzione degli strati superficiali e si distinguono due fasi: rimozione del materiale dalla vecchia pavimentazione da riutilizzare e studio della miscela finale di conglomerato bituminoso. La fase di demolizione del conglomerato bituminoso della pavimentazione stradale esistente, come già detto, può effettuarsi con la tecnica della fresatura a caldo o a freddo. Nello specifico, con la tecnica della fresatura a caldo si procede a preriscaldare la pavimentazione fino ad una temperatura di $130 \div 150$ °C mediante l'impiego di pannelli radianti o a infrarossi o altri sistemi con il fine ultimo di rammollire il bitume dello strato superficiale, bisogna considerare che questa procedura incrementa l'invecchiamento del bitume nella pavimentazione esistente e crea emissioni di vapori e polveri pericolose per la salute e per l'ambiente. Utilizzando, invece, la tecnica della fresatura a freddo, si ha la necessità di introdurre, prima dell'impasto, una fase di riscaldamento del fresato e del materiale aggiuntivo in aree attrezzate, simulando ciò che avviene in un impianto. [1]

Attualmente, la tecnica di riciclaggio a caldo in situ risulta svantaggiosa rispetto alle altre, a causa di problemi di tipo economico, di tipo logistico per il cantiere e di impatto ambientale sopraccitati. [1]

Riciclaggio a caldo in impianto

Tutte le fasi del confezionamento del conglomerato bituminoso avvengono all'interno di impianti fissi, con sistemi più efficaci rispetto al cantiere per il controllo della produzione, dei materiali e della qualità della miscela finale e delle emissioni nocive create dal riscaldamento del materiale, riscaldamento ottenibile mediante differenti procedure operative. Il conglomerato bituminoso prodotto è una miscela di quantità variabile di fresato, aggregati vergini, bitume vergine ed eventuali additivi. La percentuale del RAP impiegato varia in base al metodo operativo di funzionamento

dell'impianto per il riscaldamento del fresato e dalle caratteristiche della miscela, diverse per ogni singolo strato della pavimentazione stradale. Infatti, la presenza del RAP nella miscela diminuisce in percentuale andando verso lo strato superficiale della pavimentazione e aumenta rispettivamente la qualità dei materiali vergini impiegati. [1] Per un impiego ottimale del RAP, questo dovrebbe essere il più omogeneo possibile e derivare da un solo singolo strato della medesima pavimentazione stradale, separando, perciò, usura, binder e base. Questa situazione è alquanto improbabile da ottenere nella prassi reale per ovvi motivi economici, operativi e logistici. Per questo motivo è fondamentale per un suo corretto utilizzo disporre di un'accurata caratterizzazione del materiale RAP e procedere ad una selezione di frazione granulometrica tramite vagliatura o setacciatura per renderlo il più omogeneo possibile, permettendo di aumentarne la percentuale impiegabile nella miscela di conglomerato bituminoso da confezionare. [1]

La fase di studio della miscela, effettuata tramite il mix design, necessita di una preventiva conoscenza della granulometria e natura degli aggregati vergini e del RAP e la scelta del tipo e dosaggio di bitume vergine da impiegare considerando la presenza e riattivazione del bitume ossidato interno al RAP ed eventualmente l'uso di additivi aggiuntivi. Risulta, perciò, fondamentale individuare il reale grado di miscelazione tra i due leganti bituminosi presenti, vergine e ossidato, ma lo studio è ostico e funzione di numerose variabili in gioco, tra cui: la tipologia dell'impianto, il processo produttivo, la temperatura degli aggregati durante la miscelazione, le proprietà del bitume vergine, il quantitativo di RAP impiegato, l'aggiunta di eventuali additivi, il *Performance Grade (PG)* e le proprietà del bitume ossidato presente nel RAP. Inoltre, la miscelazione tra i due bitumi non è immediata e richiede del tempo, studi in letteratura [8, 9] che ne riscontrano una miscelazione parziale, mentre, altri studi [10] affermano che per percentuali di RAP inferiori al 15% il bitume ossidato del RAP non influenza di molto la fase legante della miscela. [1]

Esistono diverse tipologie di impianti di produzione, inizialmente molto simili ai tradizionali impianti di conglomerato bituminoso, poi perfezionati negli anni per aumentare il quantitativo di RAP impiegabile, migliorare le prestazioni della miscela finale e ridurre il costo energetico e l'impatto ambientale. I gas di scarico prodotti durante la produzione sono controllati e filtrati, da essi si ottiene il filler che viene

stoccato e utilizzato nella miscela. Gli impianti sono divisi in: *a ciclo continuo* e *a ciclo discontinuo*. [1]

Gli impianti a ciclo continuo sono più economici, semplici e richiedono meno manutenzione, ma sono meno diffusi in Italia perché eseguono una produzione continua del materiale senza la possibilità di interruzioni e variazioni di miscela da confezionare. Si differenziano in *impianti continui drum mixer* e in *impianti continui con mescolatore esterno*. Un impianto continuo *drum mixer* (Figura 1.5) ha un cilindro essiccatore che funge anche da miscelatore, avendo così una fase contemporanea di essiccazione e miscelazione, funziona a *flussi concorrenti*, gli aggregati si introducono dal lato bruciatore e scorrono verso il lato di uscita in modo concorde con i gas di scarico. Infatti, i materiali si inseriscono a lunghezze diverse del tamburo, gli aggregati vergini a inizio cilindro, il bitume a circa un terzo dalla fine, il filler o a inizio o a fine tamburo, mentre, il fresato a circa metà della lunghezza. [1]

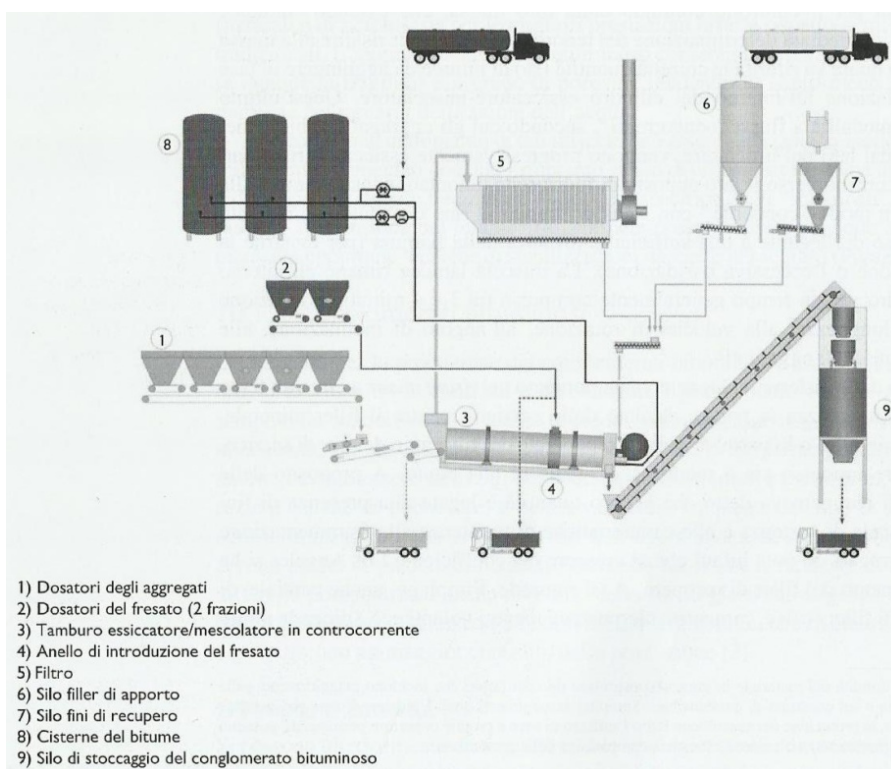


Figura 1.5 - Schema di un impianto di tipo continuo *drum mixer* per la produzione di conglomerati bituminosi. (Fonte: [1], vol. 2, pag. 158)

Un impianto continuo con mescolatore esterno divide le fasi di essiccazione e miscelazione avendo fisicamente un cilindro essiccatore per riscaldare gli aggregati e a

valle un miscelatore per introdurre all'impasto il bitume, il filler e gli eventuali additivi. In questo impianto, il cilindro essiccatore funziona a *flussi controcorrente*, gli aggregati non si introducono dal lato del bruciatore e scorrono verso di esso in senso, quindi, opposto al flusso dei gas di scarico. [1]

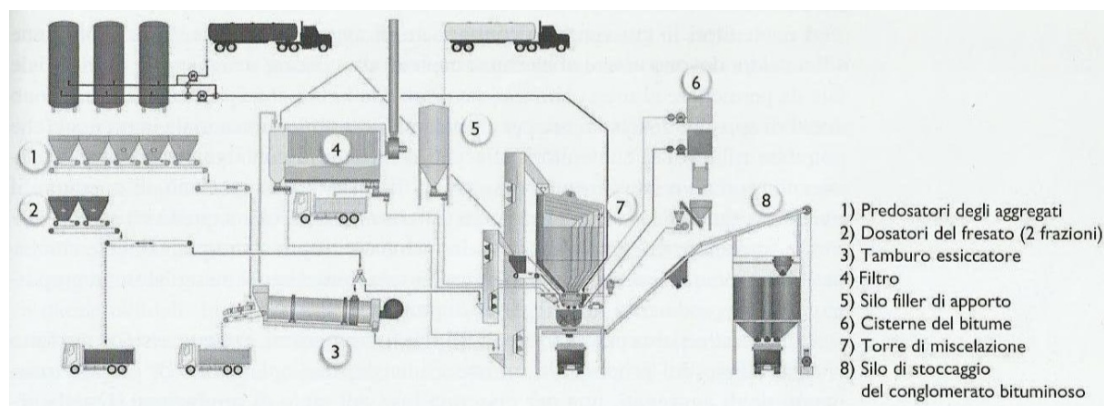


Figura 1.6 - Schema di un impianto di tipo discontinuo per la produzione di conglomerati bituminosi. (Fonte: [1], vol. 2, pag. 159)

Gli impianti a ciclo discontinuo (Figura 1.6) sono più versatili prevedendo un controllo più dettagliato della miscela e confezionandola ciclicamente e non continuamente, potendo così variarne la produzione. Si ha un tamburo essiccatore con la relativa fase di essiccamento degli aggregati provenienti dalle tramogge di alimentazione diversificate per granulometria e una fase seguente dove vengono condotti e immessi nella parte superiore della torre di miscelazione per il confezionamento della miscela. Nella torre di miscelazione (Figura 1.7) si effettua la vagliatura degli aggregati asciutti e il rispettivo stoccaggio nei *sili a caldo* e successivo dosaggio mediante pesatura per la miscela eseguita nella camera di miscelazione situata nel fondo della torre. In seguito, si aggiungono agli aggregati gli eventuali additivi, il bitume e il filler. Il conglomerato bituminoso a fine miscelazione viene alloggiato in un silo di stoccaggio o immesso per gravità negli autocarri per il trasporto, mediante l'apertura dello scarico situato alla base della camera di miscelazione. Il RAP può essere immesso in diverse modalità che influiscono la percentuale massima utilizzabile e la qualità finale della miscela. Un primo modo, il più semplice, è di introdurre il fresato freddo e umido nel mescolatore e riscaldarlo per contatto diretto con gli aggregati vergini precedentemente preriscaldati ad una temperatura superiore dell'usuale per evitare problemi di abbassamenti della

temperatura di miscelazione, questo però rischia di compromettere il bitume vergine della miscela, si consiglia pertanto di non eccedere con il preriscaldamento ed incrementarlo di 50 °C al massimo, permettendo così di impiegare solo al massimo un 15% di RAP. Altrimenti è possibile introdurre il RAP prima di immetterli nella torre di miscelazione o direttamente a metà del cilindro essiccatore, evitando così i problemi esposti prima a riguardo della temperatura di miscelazione, permettendo di incrementare la percentuale di RAP al 40% massimo, questa procedura diviene un impianto continuo con miscelatore esterno, poiché, si deve eliminare tutta la seconda fase di vagliatura interna alla torre di miscelazione per problemi tecnici siccome il RAP riscaldato rilascia bitume rammollito che rovinerebbe il meccanismo. Combinando tra loro i diversi sistemi di introduzione del RAP si riesce a raggiungere la percentuale del 60%, per aumentarla ulteriormente si utilizza attualmente l'impianto discontinuo a doppio tamburo dove si hanno due linee separate con due tamburi essiccatori che convergono nel miscelatore, una linea per il fessato che viene riscaldato tra i 100 ÷ 130 °C e una per riscaldare gli aggregati vergini, con l'accortezza di evitare il contatto diretto tra la fiamma del bruciatore e il RAP, essendoci all'interno anche il bitume ossidato che tenderebbe ad invecchiare ulteriormente. [1]

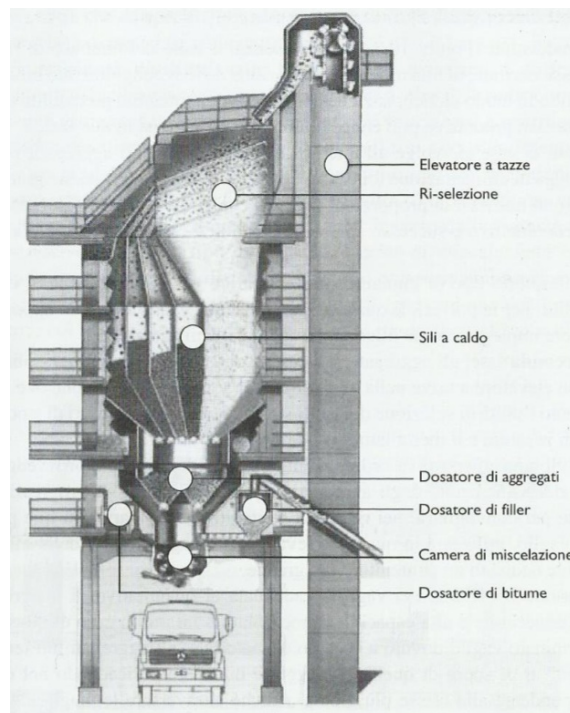


Figura 1.7 - Sezione della torre di miscelazione.
(Fonte: [1], vol. 2, pag. 160)

Infine, si evidenziano due possibili problematiche del conglomerato bituminoso riciclato a caldo in impianto legate alla fase di carico nel cassone degli autocarri e del successivo trasporto: la segregazione degli aggregati di maggior diametro e il raffreddamento della miscela. Per evitare tali inconvenienti si consiglia di eseguire un'operazione rapida di carico del materiale, spianandolo poi una volta nel cassone, mentre, durante il trasporto è preferibile chiudere con il telo di copertura il cassone. [1]

Riciclaggio a freddo in situ

Il riciclaggio a freddo in situ rispetto a quello in impianto necessita dell'ausilio di numerosi macchinari, come la stabilizzatrice, ha il vantaggio che tutte le fasi operative sono eseguite in cantiere, quindi, in corso d'opera, eliminando anche l'esigenza di trasportare il materiale rimosso nei centri di stoccaggio se si ricicla e riutilizza al 100%. Inoltre, si riducono le tempistiche esecutive delle lavorazioni, aumentando la produttività del cantiere, riducendo i costi, gli incidenti di lavoro e i disagi di interruzione del traffico veicolare per gli utenti della strada. In questa tecnica è possibile riutilizzare il materiale rimosso dalla pavimentazione esistente sia dagli strati formati da conglomerato bituminoso, sia dagli strati sottostanti legati e non legati. [1]

Inizialmente, nei primi anni del 1990, venivano impiegati treni di riciclaggio a freddo costituiti da diversi macchinari aventi funzioni diverse e sistemi complessi e onerosi; attualmente è possibile utilizzare un macchinario unico, chiamato *riciclatrice*, che fonde insieme la tecnologia delle fresatrici a freddo con quella delle macchine stabilizzatrici, permettendo di demolire lo strato e miscelare il materiale con l'aggiunta del legante in una sola passata di marcia del macchinario. Esistono diverse scelte operative e gestionali del cantiere per ottimizzare il cronoprogramma e la qualità del materiale steso. [1]

La fase di studio della miscela in situ prevede il prelievo in loco degli aggregati utilizzando il materiale rimosso dagli strati della vecchia pavimentazione da sostituire ed eventualmente anche dallo strato di fondazione, questo prelievo è effettuato successivamente ad un passaggio della macchina stabilizzatrice senza la stesa dei leganti, procedura necessaria per considerare lo sgranamento dei grani di diametro più grande di RAP in seguito al passaggio del rotore di miscelazione. [1]

Lo studio della granulometria per questa tecnica non ha molta rilevanza, infatti, si effettua per via umida ritenendo che i grumi non modifichino molto la lavorabilità e le prestazioni finali della miscela, viceversa se manca la frazione fina. Se necessario si corregge la curva granulometrica, aggiungendo aggregati vergini per compensare la perdita della frazione grossa andata disgregata o se il RAP proviene dagli strati superficiali che non ne contengono a sufficienza, oppure aggiungendo materiali per la frazione fine che anche se presente abbondantemente nel RAP resta inglobata nel bitume. [1]

Riciclaggio a freddo in impianto

Tutte le fasi del confezionamento del conglomerato bituminoso avvengono all'interno di un impianto fisso o mobile, con sistemi più efficaci rispetto al cantiere per il controllo della produzione, dei materiali e della qualità della miscela finale. A miscela confezionata, il prodotto si trasporta in cantiere e steso con l'ausilio della vibrofinitrice. La fase di studio della miscela, effettuata tramite il mix design, necessita di una preventiva conoscenza della granulometria degli aggregati, del contenuto d'acqua, del tipo e del dosaggio del legante da utilizzare. L'analisi granulometrica ha una procedura identica a quella della tecnica del riciclaggio a caldo in impianto, si procede infatti ad individuare le percentuali delle frazioni previa vagliatura del RAP. [1]

Nello studio della miscela a freddo, sia in situ che in impianto, è molto importante non sottovalutare il contenuto d'acqua, fondamentale per il costipamento, se necessario la si può aggiungere prima della fase di miscelazione sempre considerando la quota presente sia nel RAP umido che nell'eventuale emulsione bituminosa utilizzata come legante. Nel dettaglio, per produrre un conglomerato bituminoso a freddo, per lo strato di base, si utilizza un'emulsione sovrastabilizzata di bitume normale o modificato, il termine sovrastabilizzata indica l'instaurarsi di una rottura lenta che in teoria avviene nella fase di costipamento o successivamente. Mentre, si utilizza il cemento per i misti cementati e miscele di stabilizzazione per gli strati di fondazione con l'impiego di entrambi i leganti, cemento e bitume o schiumato o emulsione bituminosa, con dosaggi variabili in funzione alle caratteristiche reologiche ricercate. [1]

1.3 Cenni sulla reologia del conglomerato bituminoso

Con il termine *reologia* si intende la scienza che studia il comportamento di un corpo deformato in seguito ad uno stato tensionale indotto da azioni esterne.

Come già affermato, il conglomerato bituminoso è un materiale formato dalla miscelazione di aggregati lapidei, bitume, filler ed eventuali additivi. Perciò, si ha uno scheletro solido costituito dai vari aggregati che sono uniti tra loro mediante l'ausilio del legante bituminoso. Variando la composizione della miscela, la modalità di miscelazione, le caratteristiche volumetriche e le proprietà meccaniche si ottengono conglomerati bituminosi differenti, impiegati per soddisfare le svariate esigenze di progetto dettate dalle funzioni e dalle caratteristiche richieste per ogni strato della pavimentazione stradale flessibile a cui sono indirizzati. La caratterizzazione meccanica del conglomerato bituminoso si basa sullo studio delle proprietà principali di un materiale, come la *rigidezza* e la *resistenza* ai principali meccanismi di rottura e di degrado. Questa analisi può risultare molto complessa, infatti, si riscontrano per i conglomerati bituminosi comportamenti variabili nel campo elastico, viscoso e plastico; con conseguenti deformazioni sia di tipo reversibile che irreversibile. Questo aspetto ha origine principalmente dalla presenza del legante bituminoso che influenza direttamente la risposta tenso-deformativa del conglomerato bituminoso, infatti, si riscontra un comportamento generale dei due materiali molto simile. Nello specifico, i leganti bituminosi manifestano un comportamento meccanico che muta in funzione sia della temperatura di esercizio, detto *termo dipendente*, che del carico gravante, dalle modalità, dai tempi e dalle frequenze di applicazione del carico sollecitante, quindi, è funzione anche del tempo della risposta del materiale alle azioni agenti, detto *tempo dipendente*. Perciò, i bitumi e i conglomerati bituminosi sono spesso definiti *tempo-termo dipendenti*. Analizzando il loro comportamento nei casi estremi di temperatura, si nota che assumono per bassi valori di temperatura la reologia tipica di un solido elastico, mentre, per elevati valori di temperatura sono analoghi a dei fluidi viscosi di tipo Newtoniano, evidenziando, quindi, un andamento intermedio di tipo viscoelastico. [1, 2, 11]

Per il lavoro sperimentale esposto in questa tesi la definizione, la misura e l'analisi della proprietà fondamentale di un materiale nota come rigidezza assume un ruolo essenziale; perciò, si espone successivamente nel dettaglio, mentre, si trascura la proprietà

resistenza nei confronti dei principali meccanismi di rottura e di degrado. Questi ultimi si citano solo per completezza e sono: resistenza a fatica, resistenza all'ormaiamento, resistenza alla fessurazione termica e resistenza a trazione indiretta.

Dalla letteratura sperimentale si rileva una ormai convalidata tesi riguardante l'evoluzione della risposta meccanica del materiale conglomerato bituminoso sottoposto alle azioni cicliche dei carichi di traffico veicolari agenti durante la fase di esercizio di una pavimentazione stradale di tipo flessibile. Gli studi rilevano tre distinte fasi comportamentali identificate nel grafico semplificato che mostra l'andamento della rigidezza al crescere del numero di cicli di carico agenti (Figura 1.8):

- una fase iniziale transitoria di tipo non lineare;
- una fase intermedia a regime di tipo viscoelastico lineare;
- una fase finale di danneggiamento per fatica con il raggiungimento del limite di rottura del materiale. [1]

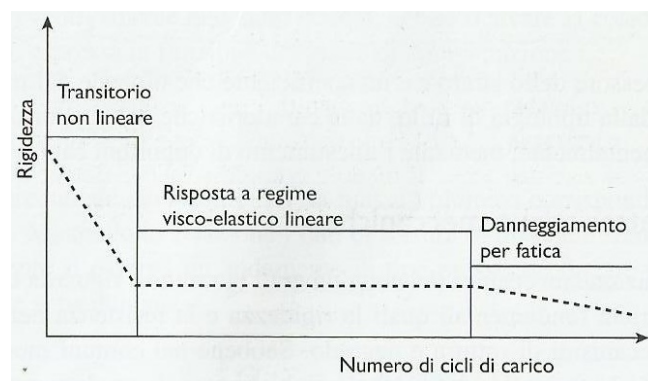


Figura 1.8 - Grafico semplificato dell'andamento della rigidezza all'aumentare del numero di cicli di carico. (Fonte: [1], vol. 1, pag. 550)

La caratterizzazione della rigidezza del conglomerato bituminoso si effettua nel campo di comportamento relativo alla fase intermedia di tipo viscoelastico lineare. Questa caratterizzazione è essenziale per ottenere la risposta tenso-deformativa del materiale soggetto ai carichi ciclici di traffico. I metodi di analisi usuali per questo studio si basano appunto sull'applicazione di carichi ciclici indagando la rigidezza a piccoli livelli di deformazione e rientrando nel campo viscoelastico lineare del materiale. Si individuano due tipologie di prove in base alla storia di carico per la caratterizzazione viscoelastica lineare del materiale:

- prove dinamiche con carico sollecitante sinusoidale;
- prove a carico ripetuto mediante impulsi di durata e intervalli di pausa prestabiliti. [1]

Si distinguono le seguenti modalità di esecuzione di una prova per la caratterizzazione viscoelastica lineare del materiale:

- a tensione imposta, si impone il carico e si misura lo spostamento;
- a deformazione imposta, si impone lo spostamento e si misura il carico.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, per la caratterizzazione viscoelastica lineare delle diverse miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo, si eseguono prove dinamiche in regime oscillatorio con forzante sinusoidale, con la modalità esecutiva a deformazione imposta; questa prova viene descritta successivamente nel dettaglio nel paragrafo 2.3. Per questo motivo, si espongono di seguito le nozioni e le teorie fondamentali alla base della prova dinamica necessarie per una corretta esecuzione delle prove ed un avveduto studio e interpretazione dei risultati sperimentali da queste ottenuti.

Eeguire una caratterizzazione reologica di un materiale con un comportamento di tipo viscoelastico lineare, come il bitume e il conglomerato bituminoso, in un regime oscillatorio dove si sottopone il materiale a sollecitazioni cicliche, significa rappresentare in laboratorio in maniera più veritiera possibile gli effetti indotti dal traffico veicolare gravante su una pavimentazione stradale di tipo flessibile [1].

Le analisi del comportamento viscoelastico del legante bituminoso e del conglomerato bituminoso in condizioni dinamiche necessitano dell'introduzione della definizione dei seguenti parametri:

- *modulo complesso;*
- *modulo dinamico;*
- *angolo di fase.*

La definizione di questi parametri è simile sia per il conglomerato bituminoso che per il bitume, essendo il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso simile a quello del legante bituminoso. Per eseguire una prova dinamica in regime oscillatorio bisogna stabilire una forzante, che può essere sia una tensione che una deformazione che un gradiente di deformazione. [1]

La *forzante*, si assume come tale in questo caso una tensione normale σ o una tensione tangenziale τ , usualmente viene descritta tramite una legge sinusoidale che varia nel tempo t secondo la seguente funzione:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t),$$

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t),$$

dove, i termini σ_0 , τ_0 rappresentano le *ampiezze* delle armoniche delle tensioni, mentre il termine ω indica la *pulsazione* espressa in rad/s che è legata alla *frequenza* di carico f espressa in Hz mediante la seguente espressione:

$$\omega = 2\pi f.$$

La *risposta alla forzante*, corrisponde ad una deformazione normale ε o ad una deformazione tangenziale γ , viene anch'essa rappresentata con una legge sinusoidale che varia nel tempo t ; si ha per la teoria della linearità la stessa frequenza della forzante e stessa pulsazione, ma a causa della viscosità del materiale la risposta risulta sfasata con la forzante di un parametro ϕ o δ chiamato *angolo di fase*:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \phi),$$

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t + \delta),$$

dove, ε_0 e γ_0 rappresentano le ampiezze delle armoniche delle deformazioni.

Analizzando il parametro angolo di fase si nota come esso rientri all'interno del dominio identificato dall'intervallo chiuso $[0, \pi/2]$ e rappresenti il grado di elasticità del legante bituminoso e, perciò, il comportamento viscoelastico del conglomerato bituminoso:

- per $\phi = 0$, si ha una risposta in fase con la forzante e il materiale ha il comportamento tipico di un solido elastico;
- per $\phi = \pi/2$, si ha una risposta in opposizione di fase rispetto alla forzante e il materiale ha un comportamento tipico di un fluido viscoso di tipo Newtoniano.

Quindi, si osserva che all'aumentare del parametro angolo di fase aumenta lo sfasamento della risposta rispetto alla forzante e il materiale assume un comportamento sempre più assimilabile ad un fluido viscoso allontanandosi progressivamente dal campo di solido elastico, viceversa il contrario.

Il rapporto tra le ampiezze delle armoniche della tensione e della deformazione rappresenta la *norma del modulo complesso*, quindi, il suo valore assoluto, è un

parametro di rigidezza, infatti, viene identificato anche come *modulo di rigidezza dinamico* o più semplicemente *modulo dinamico*:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0},$$

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0}.$$

Il modulo dinamico è assimilabile al modulo statico; infatti, entrambi sono moduli di rigidezza ottenuti dal rapporto tra tensione e deformazione e descrivono il comportamento di un materiale sottoposto all'azione di un carico, ciò che li distingue è proprio la tipologia del carico agente: si ha un carico dinamico per il modulo dinamico ed un carico statico per il modulo statico. Il parametro modulo complesso indicato con E^* rappresenta il modulo complesso longitudinale, mentre, se indicato con G^* rappresenta il modulo complesso tangenziale o di taglio. Quindi, il *modulo complesso* è il parametro che descrive meglio il legame tra le tensioni e le deformazioni in condizioni dinamiche di un materiale dal comportamento viscoelastico lineare come il legante bituminoso e il conglomerato bituminoso:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t + \phi)},$$

$$G^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t)} = \frac{\tau_0 \sin(\omega t)}{\gamma_0 \sin(\omega t + \delta)}.$$

Si utilizza il termine complesso e l'uso dell'asterisco come apice della lettera identificativa del parametro modulo complesso, proprio perché è un numero complesso formato da una parte reale e una parte immaginaria:

- E_1 è la parte reale del modulo complesso E^* , rappresenta la componente elastica e il lavoro reversibile associato, viene identificata come *modulo di restituzione elastica*;
- E_2 è la parte immaginaria del modulo complesso E^* , rappresenta la componente viscosa e il lavoro irreversibile associato, viene identificata come *modulo di dissipazione viscosa*.

In Figura 1.9 si individua nel piano complesso la rappresentazione vettoriale e polare del modulo complesso E^* formato dalle sue due componenti E_1 e E_2 ortogonali tra di loro e l'angolo di fase ϕ .

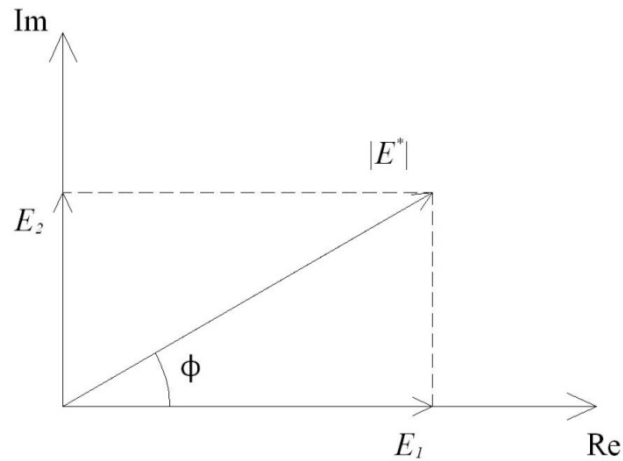


Figura 1.9 - Rappresentazione nel piano complesso del modulo complesso E^* . (Fonte: creazione personale)

Quindi, la *rappresentazione algebrica* del modulo complesso E^* è la seguente:

$$E^* = E_1 + i E_2 ,$$

dove,

$$E_1 = |E^*| \cos \phi ,$$

$$E_2 = |E^*| \sin \phi ,$$

$$i^2 = -1 .$$

Mentre, la *rappresentazione polare* del modulo complesso E^* è fornita dalla seguente espressione:

$$E^* = |E^*|(\cos \phi + i \sin \phi) .$$

Si riportano anche le rappresentazioni dei parametri modulo dinamico $|E^*|$ e angolo di fase ϕ :

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{(E^* \cos \phi)^2 + (E^* \sin \phi)^2} ,$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{E_2}{E_1} .$$

[1]

Di seguito, si analizza il modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ (Figura 1.10), generalmente assimilati al bitume, simili al modulo complesso E^* e angolo di fase ϕ riferiti spesso al conglomerato bituminoso:

$$G^* = G' + i G'' = |G^*| \cos \delta + i |G^*| \sin \delta ,$$

dove, G' è il modulo di restituzione elastica, G'' è il modulo di dissipazione viscosa, i è l'unità immaginaria e $|G^*|$ è la norma del modulo complesso G^* :

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} .$$

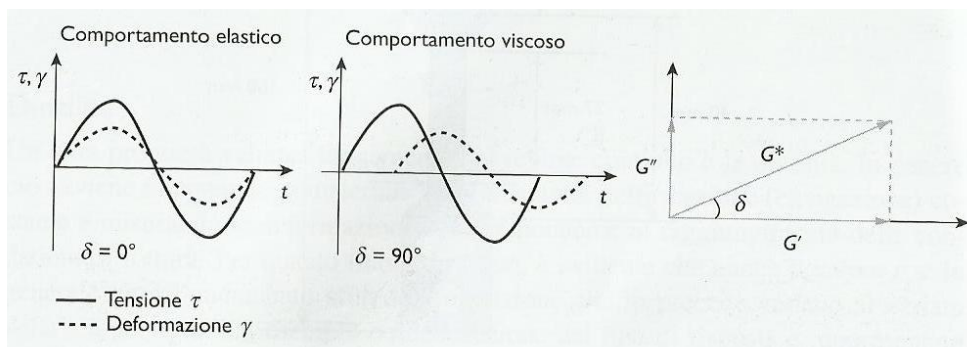


Figura 1.10 - Modulo complesso G^* e angolo di fase δ . (Fonte: [1], vol. 1, pag. 506)

Nella condizione di limite elastico, quindi, per temperature basse e frequenze elevate, il parametro angolo δ di fase assume il valore dell'estremo inferiore dell'intervallo chiuso $[0, \pi/2]$ e il materiale ha il comportamento tipico di un solido elastico; perciò, ne consegue che il modulo complesso diviene un modulo elastico con la seguente relazione:

$$G^* = G' + i G'' = |G^*| \cos 0 + i |G^*| \sin 0 ,$$

$$G^* = G' = |G^*| \cos 0 .$$

Invece, nella condizione di limite viscoso, quindi, per temperature elevate e frequenze basse, il parametro angolo di fase δ assume il valore dell'estremo superiore dell'intervallo chiuso $[0, \pi/2]$ e il materiale ha il comportamento tipico di un fluido viscoso di tipo Newtoniano; perciò, ne consegue che il modulo complesso diviene:

$$G^* = G' + i G'' = |G^*| \cos \frac{\pi}{2} + i |G^*| \sin \frac{\pi}{2} ,$$

$$G^* = G'' = |G^*| \sin \frac{\pi}{2} = \eta^* \cdot \omega ,$$

dove, η^* rappresenta la *viscosità complessa*. [1]

Si eseguono prove in regime oscillatorio per ottenere la caratterizzazione reologica alle medie e alte temperature di esercizio per studiare i fenomeni di ormaiamento e di fatica. [1]

In conclusione, le prove dinamiche di laboratorio in regime oscillatorio eseguite su un materiale dal comportamento viscoelastico lineare come il conglomerato bituminoso, permettono l'ottenimento dei parametri fondamentali per una caratterizzazione reologica del materiale. Questi parametri sono appunto il modulo complesso, il modulo dinamico e l'angolo di fase ricavati a diverse temperature e a diverse frequenze rappresentanti rispettivamente la temperatura di esercizio della pavimentazione ed il carico del traffico veicolare.

1.4 Legante bituminoso

I leganti bituminosi utilizzabili in una pavimentazione stradale rientrano nella tipologia dei bitumi artificiali ricavati dai processi di raffinazione del petrolio grezzo. Si dividono a sua volta in *bitumi tradizionali* e in *bitumi modificati*. I bitumi tradizionali, detti anche di base o tal quali (TQ), sono classificati in funzione alla caratteristica di penetrazione a 25 °C. I bitumi modificati si ottengono aggiungendo al bitume tradizionale degli agenti modificanti, generalmente polimeri; il Capitolato Anas divide i bitumi modificati in: soft (SF) o hard (HD). [1, 2, 5]

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si utilizzano due tipi di bitume vergine artificiale tradizionale 50/70 derivanti da due differenti processi di distillazione del petrolio greggio: bitume Primario o Straight-run (S) e bitume Visbreaking (V).

1.4.1 Processi di produzione

Di seguito, si illustrano separatamente entrambi i processi produttivi da cui si ricavano i due tipi di bitume vergine impiegati nel lavoro sperimentale.

Processo produttivo del bitume di tipo Primario o Straight-run

I bitumi artificiali tradizionali del tipo Primario o Straight-run sono i più comuni e si ottengono dal processo di distillazione frazionata del petrolio greggio (Figura 1.11). Questo processo consiste appunto nel frazionare le varie componenti del greggio, ognuna avente un proprio punto di ebollizione differente, viene eseguito nelle torri di

frazionamento degli impianti di raffinazione del petrolio. Nel dettaglio, si ha una prima fase di distillazione a pressione atmosferica del greggio riscaldato a $350 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$ e introdotto in una prima torre di frazionamento nella quale si separano le componenti più leggere a diverse altezze della torre aventi temperature che oscillano dai $400 \text{ }^\circ\text{C}$ fino ai $15 \text{ }^\circ\text{C}$; successivamente, si procede con la seconda fase di distillazione in una seconda torre questa volta eseguita sottovuoto sul residuo della prima fase. Dal residuo della seconda fase eseguita nella seconda torre si ottiene il bitume primario per uso stradale costituito appunto dalle componenti più pesanti del greggio. In seguito, è possibile effettuare al residuo della seconda fase dei trattamenti aggiuntivi per ottenere dei prodotti differenti dal bitume primario. [1, 12, 13]

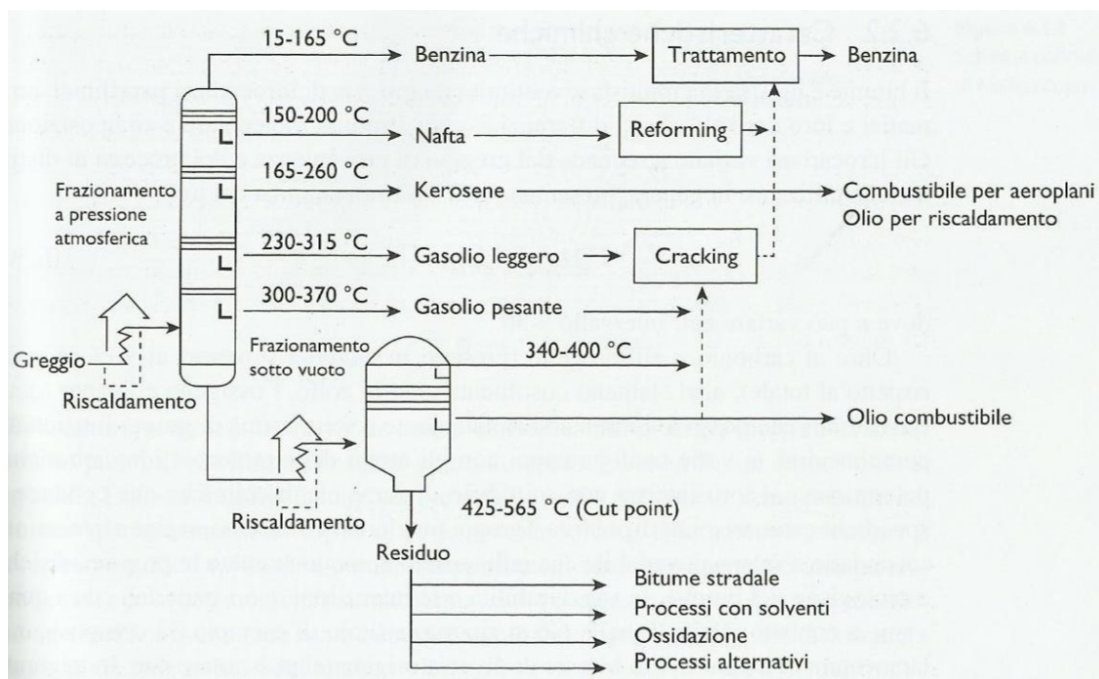


Figura 1.11 - Schema semplificato del processo di distillazione frazionata del petrolio greggio. (Fonte: [1], vol.1, pag. 493)

Processo produttivo del bitume di tipo Visbreaking

I bitumi artificiali tradizionali del tipo Visbreaking si ottengono dalla distillazione sottovuoto del residuo prodotto dal processo di cracking termico limitato noto con il nome di *visbreaking*. Il termine visbreaking è originato dall'unione delle parole in lingua inglese viscosity e breaking, che significano riduzione della viscosità. Infatti, il visbreaking è un processo di raffineria di decomposizione termica, eseguito in un

intervallo di temperatura tra $430 \div 485 \text{ }^{\circ}\text{C}$, del residuo viscoso risultante dalla distillazione frazionata a pressione atmosferica o sottovuoto del petrolio greggio. Durante questo processo avviene una diminuzione delle dimensioni delle molecole più grandi del residuo di distillazione frazionata ottenendo, come risultato, una riduzione della sua viscosità e del suo quantitativo finale. Infatti, dal processo di visbreaking si ricava il residuo in fase liquida e ulteriori prodotti più leggeri dalla generazione dei vapori derivanti dalle reazioni di cracking, questi sono: benzina, gasolio, naphtha e gas. Il residuo o tar si impiega come olio combustibile, alimentazione per unità di deasphalting con solvente, alimentazione per unità di gassificazione e come bitume per uso stradale. Gli impianti di visbreaking si dividono in due tipologie: unità *coil visbreaking* (Figura 1.12) e unità *soaker visbreaking* (Figura 1.13). Nel primo impianto le reazioni avvengono all'interno di tubi in un forno, nel secondo impianto all'interno di una camera di reazione. L'aspetto più critico è la stabilità del residuo e il livello di severità del processo, aumentare la severità porta ad avere un residuo instabile con gli asfalteni che non sono più in dispersione colloidale grazie al potere dei malteni, ma sono attratti tra loro e flocculano. [14] Perciò, aumentare troppo la severità del processo di visbreaking porta ad avere un residuo finale meno viscoso e più duro, ottenendo così un bitume di Visbreaking sempre più ossidato, ossidabile e più rigido già in partenza, con un comportamento molto dipendente dalla temperatura, di tipo viscoelastico tendente al fragile. [12, 13, 14, 15, 16, 17]

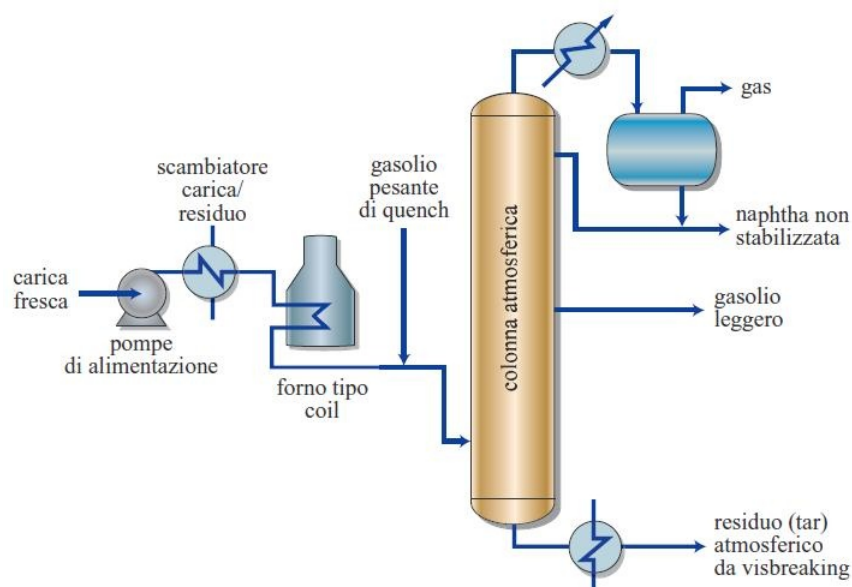


Figura 1.12 - Schema semplificato di una unità visbreaking di tipo *coil*.
(Fonte [14], pag. 230)

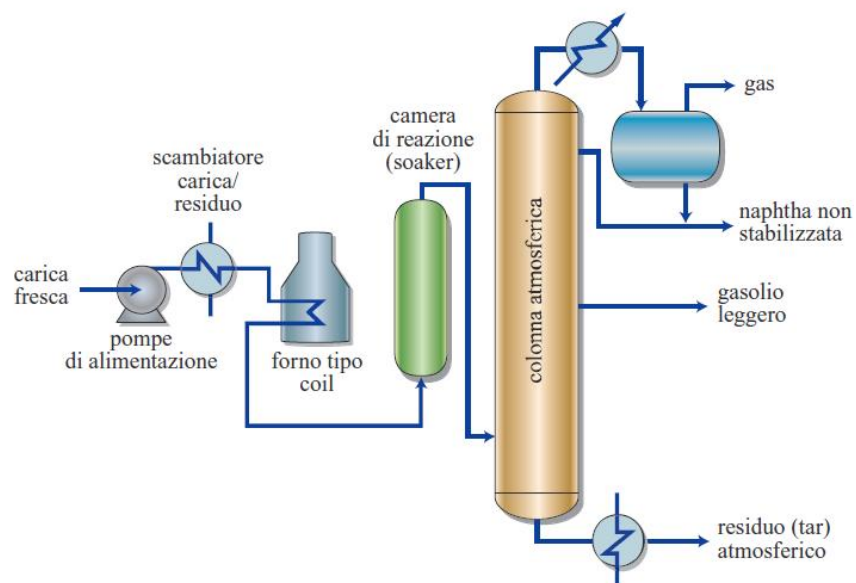


Figura 1.13 - Schema semplificato di una unità visbreaking di tipo *soaker*.
(Fonte [14], pag. 231)

1.4.2 Caratteristiche fisiche e chimiche

Il legante bituminoso viene introdotto nella miscelazione con gli aggregati di varia granulometria per confezionare il conglomerato bituminoso ed ha il compito di legare gli inerti tra loro; questi ultimi, costituiscono lo scheletro solido del materiale composito così ottenuto. Il bitume fornisce le seguenti proprietà: adesione tra legante e aggregati, coesione interna tra le particelle del bitume, consistenza e impermeabilità al prodotto finale. Inoltre, le caratteristiche reologiche del bitume influenzano il comportamento generale del conglomerato bituminoso, rendendolo un materiale termo e tempo dipendente, rientrante nel campo elastico e viscoso; questo aspetto viene trattato nel precedente paragrafo 1.3. Il bitume, a livello chimico e fisico, è un sistema multifase composto principalmente da carbonio (intorno al $82 \div 87$ % in peso rispetto al totale) e dall'idrogeno (circa il 10 %), in percentuali minori da zolfo, ossigeno, azoto e tracce di metalli pesanti come nichel e vanadio. Una rappresentazione chiara della struttura chimica del bitume è fornita dal modello colloidale di Nellensteyn F.J. (1924), illustrato in Figura 1.14, che lo schematizza come un materiale formato da asfaltene, che rappresentano le micelle solide, dispersi nei maltene, che rappresentano la matrice oleosa di base; a sua volta i maltene sono differenziati in tre composti: i saturi, gli aromatici e le resine. Gli asfaltene sono solidi amorfi di colore scuro, insolubili negli

idrocarburi saturi a basso punto di ebollizione e solubili nel tetracloruro di carbonio; sono responsabili del comportamento termo dipendente del bitume e forniscono la resistenza meccanica. Le resine sono composti chimici, viscosi a temperatura ambiente, di colore marrone, solubili negli aromatici, con elevata proprietà di adesione, hanno funzione di disperdenti per gli asfaltini e forniscono un comportamento duttile e adesivo al bitume. La componente liquida che è responsabile del comportamento viscoso del bitume ad elevate temperature e formata dagli aromatici che sono di colore marrone scuro e dai saturi che sono oli biancastri. Perciò, la reologia del bitume è strettamente dipendente da tutte queste sue componenti e dal loro rapporto. [1, 2, 12, 13]

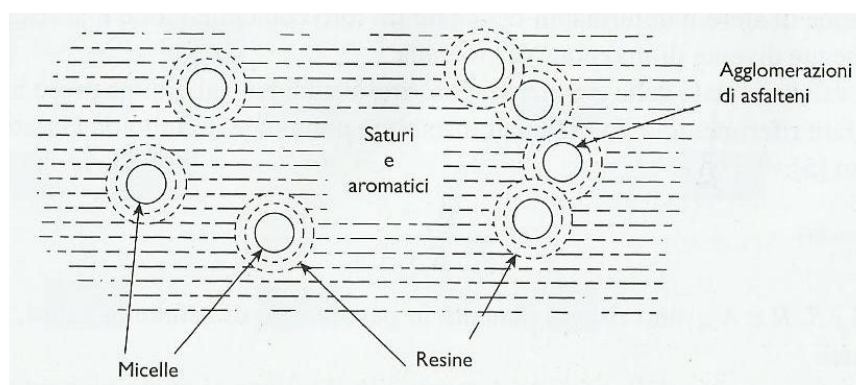


Figura 1.14 - Schema modello colloidale di Nellensteyn F.J. (1924). (Fonte: [1], vol. 1, pag. 495)

1.4.3 Invecchiamento e additivi rigeneranti

Il legante bituminoso è soggetto ad una mutazione delle caratteristiche reologiche iniziali causata dal fenomeno noto come *invecchiamento*, tendendo generalmente ad un incremento della rigidità e del grado di fragilità del materiale come conseguenza dell'azione della temperatura e della presenza di ossigeno. Infatti, si riscontra una perdita dei maltini essendo le componenti più leggere e rimangono solo gli asfaltini più pesanti e solidi. Si distinguono due stadi temporali di invecchiamento:

- *invecchiamento a breve termine*: relativo alle fasi di confezionamento della miscela di conglomerato bituminoso in impianto, del suo successivo trasporto in sito e della stesa per la realizzazione della pavimentazione stradale;

- *invecchiamento a lungo termine*: relativo all'intera fase di esercizio della pavimentazione stradale, dove soprattutto l'esposizione agli agenti atmosferici assume un ruolo rilevante. [1, 2]

Si differenziano, per l'invecchiamento del bitume, i seguenti fenomeni:

- *volatilizzazione*: è responsabile del solo invecchiamento a breve termine, infatti, si ha generalmente entro la fase di miscelazione a caldo tra aggregati e bitume, provoca l'allontanamento per volatilizzazione delle componenti più leggere aventi bassi punti di ebollizione;
- *ossidazione*: riguarda sia l'invecchiamento a breve termine che quello a lungo termine, anche grazie alle elevate temperature si crea una reazione chimica tra l'ossigeno e le macromolecole idrocarburiche che provoca la rottura dei legami covalenti di base riscontrando un aumento del grado di polarità delle suddette molecole;
- *polimerizzazione*: è relativo sia all'invecchiamento a breve termine che a lungo termine, anche grazie alle elevate temperature si formano legami intermolecolari con conseguente incremento della dimensione delle molecole che ne costituiscono la struttura interna. [1]

Essere a conoscenza che un legante bituminoso tende inevitabilmente a processi di invecchiamento, mutando fin da subito durante la miscelazione a caldo le proprie caratteristiche reologiche di bitume vergine, è fondamentale per un corretto impiego del conglomerato bituminoso di recupero. Infatti, il bitume presente all'interno del RAP è ovviamente invecchiato, anche se riesce a riattivarsi, sicuramente ha una maggiore rigidità e fragilità rispetto al bitume vergine di aggiunta; perciò, è come avere nella miscela due tipologie differenti di bitume che si miscelano insieme. Per questi motivi è fondamentale predisporre di una caratterizzazione di tutti i materiali costitutivi della miscela di conglomerato bituminoso da confezionare, così da poter effettuare uno studio dettagliato del mix design, ponderando con accuratezza la tipologia e il quantitativo di bitume vergine addizionale e il dosaggio di eventuali additivi rigeneranti di bitume invecchiato aggiunti. L'uso di questi additivi rigeneranti di bitume, generalmente a base di oli ad elevato contenuto di quelle componenti volatili ormai perse come i malteni, permette di contrastare l'aumento di viscosità, rigidità e fragilità del bitume

invecchiato presente all'interno del RAP. Questi, infatti, agiscono ricreando un equilibrio colloidale tra le varie componenti riuscendo a separare e a disperdere gli asfalteni. Nella realtà commerciale esistono svariate tipologie di additivi rigeneranti per bitumi invecchiati aventi natura, caratteristiche, modalità di applicazione e potere rigenerante differenti, quindi, il corretto dosaggio necessita di essere ricercato mediante analisi e prove eseguite in laboratorio. [1, 2, 6]

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si impiegano due diverse tipologie di additivi rigeneranti di bitume presenti in commercio, aventi caratteristiche e modalità di applicazione differenti.

CAPITOLO 2

Programma sperimentale

Nel seguente capitolo si illustra la prima parte, prevalentemente operativa, del lavoro sperimentale eseguito presso le strutture del *Laboratorio di Strade e Trasporti* del *Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)* della *Facoltà di Ingegneria* dell'*Università Politecnica delle Marche*, dipartimento di eccellenza *2E-LAB*.

Nello specifico, partendo dagli obiettivi della ricerca, si identificano le miscele di conglomerato bituminoso ritenute idonee per lo studio da riciclare e confezionare appositamente a caldo, si riportano i materiali costitutivi e le caratteristiche. Successivamente, si descrivono tutte le apparecchiature di laboratorio utilizzate e i relativi protocolli di prova; si mostrano le procedure di preparazione delle ricette, di miscelazione, di compattazione, di ridimensionamento e di preparazione dei provini alla prova dinamica di modulo complesso. Si illustra la prova dinamica, la teoria alla base del successivo lavoro di interpretazione e rappresentazione grafica dei relativi risultati sperimentali riportato nel capitolo 3 e le prove per la caratterizzazione volumetrica del materiale. Infine, si riportano le specifiche tecniche di Capitolato Speciale di Appalto Anas [5] relative allo strato di binder.

Si sottolinea che per questa fase del lavoro sperimentale, prevalentemente operativa, si predispone una procedura esecutiva standardizzata per svolgere ogni operazione e prova di laboratorio, identificando protocolli di prova; infatti, si ritiene fondamentale assicurare una analogia produttiva di ogni conglomerato bituminoso riciclato e confezionato a caldo per poter garantire una coerenza e un corretto lavoro di comparazione dei risultati sperimentali rappresentativi del comportamento viscoelastico lineare di ogni provino.

Infine, si evidenzia che tutte le procedure operative svolte in laboratorio intendono rappresentare in modo più simile possibile le condizioni reali che si riscontrano negli impianti di produzione e di riciclaggio, considerando anche le tecniche di stesa e di compattazione del materiale eseguite nei cantieri stradali italiani; ovviamente nei limiti di un laboratorio sperimentale.

2.1 Obiettivi e miscele realizzate

Il presente lavoro sperimentale ha come obiettivo principale la caratterizzazione reologica di diverse miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo, contenenti materiali costitutivi differenti, specialmente l'impiego di una percentuale elevata di conglomerato bituminoso di recupero. Si intende confrontare il comportamento viscoelastico lineare ottenuto dall'elaborazione dei risultati sperimentali delle prove dinamiche di modulo complesso eseguite in laboratorio sui provini realizzati, due provini per ogni miscela. Questo comportamento viene rappresentato graficamente mediante la costruzioni delle *curve maestre*, del *piano di Black* e del *piano di Cole-Cole*. Nello specifico, si valuta l'andamento del comportamento reologico di tutte le miscele di conglomerato bituminoso riciclato e confezionato a caldo al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C e 170 °C), del tipo di bitume vergine impiegato ottenuto da due differenti processi di distillazione del greggio (Primario o Straight-run e Visbreaking) e della tipologia di additivo rigenerante di bitume eventualmente aggiunto (additivo A e additivo B). Considerando gli stessi protocolli di prova per tutte le miscele, il lavoro sperimentale trattato intende analizzare:

- come l'impiego di una elevata percentuale di conglomerato bituminoso di recupero (50% in peso sulla miscela degli aggregati) influisce sul comportamento reologico rispetto ad una miscela tradizionale senza RAP;
- se l'aggiunta di additivi rigeneranti di bitume nella miscela con conglomerato bituminoso di recupero riesce a riattivare il bitume invecchiato presente nel RAP, aggiungendo le proprietà perse e migliorando le prestazioni finali della miscela; inoltre, si valuta il potere ringenerante finale di due tipologie di additivi con differente costituzione e modalità applicativa (A e B);
- come la variazione della temperatura di preriscaldamento dei materiali e di miscelazione adottata (140 °C e 170 °C) influenza il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso confezionato a caldo, l'efficacia degli additivi rigeneranti di bitume e la tecnica del riciclaggio a caldo. Si intende valutare anche gli effetti indotti dalla differente temperatura di miscelazione e di permanenza del bitume vergine e del RAP in forno; quindi, l'insorgere del fenomeno di invecchiamento a breve termine del bitume con un conseguente aumento della rigidità e della fragilità finale del materiale e se si

induce una diversa riattivazione e un ulteriore invecchiamento del bitume presente nel RAP;

- se l'impiego di un diverso tipo di bitume vergine tradizionale (Primario o Straight-run e Visbreaking), ottenuto da differenti processi di distillazione del petrolio greggio, ma avente stessa classe di penetrazione a 25 °C (50/70), influenza il comportamento reologico finale del conglomerato bituminoso confezionato a caldo, confrontando le stesse miscele.

Si sottolinea che per tutte le miscele di conglomerato bituminoso da confezionare a caldo si identifica come destinazione funzionale di impiego lo strato di binder, detto anche strato di collegamento, di una pavimentazione stradale di tipo flessibile; nel paragrafo 2.4 si riportano le relative specifiche tecniche di Capitolato Anas [5].

In definitiva, si identificano e si confezionano a caldo in totale 16 miscele di conglomerato bituminoso, 8 impiegando bitume vergine Primario o Straight-run (S) e 8 utilizzando bitume vergine Visbreaking (V). Come già affermato, queste 8 miscele per ogni tipologia di bitume vergine sono identiche e speculari tra loro sia nelle ricette che nelle procedure di confezionamento; in Tabella 2.1 si riporta la designazione adottata per ogni miscela di progetto, per il lavoro sperimentale svolto.

Tabella 2.1 - Identificazione delle 16 miscele totali di progetto di conglomerato bituminoso confezionato a caldo in laboratorio per il lavoro sperimentale trattato. Il RAP è riciclato a caldo.

MISCELE TOTALI DI PROGETTO	
n. 16 miscele totali di conglomerato bituminoso confezionato a caldo	
n. 8 miscele con bitume vergine di tipo Primario o Straight-run (S)	n. 8 miscele con bitume vergine di tipo Visbreaking (V)
00RAP_S_140 00RAP_S_170 50RAP_S_140 50RAP_S_170 50RAP_S_140_A 50RAP_S_170_A 50RAP_S_140_B 50RAP_S_170_B	00RAP_V_140 00RAP_V_170 50RAP_V_140 50RAP_V_170 50RAP_V_140_A 50RAP_V_170_A 50RAP_V_140_B 50RAP_V_170_B

Le sigle nei nomi delle miscele di progetto riportate in Tabella 2.1 identificano le seguenti caratteristiche:

- ‘00RAP’ e ‘50RAP’ corrispondono alla percentuale di RAP in peso sull’aggregato totale in miscela: 0% di RAP e 50% di RAP nella miscela;
- ‘S’ e ‘V’ individuano il tipo di bitume vergine impiegato nella miscela, ricavato da due differenti processi di distillazione del petrolio greggio: Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V);
- ‘140’ e ‘170’ identificano la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata: 140 °C e 170 °C;
- ‘A’ e ‘B’ rappresentano la tipologia di additivo rigenerante di bitume eventualmente presente in miscela: additivo A e additivo B.

Perciò, le quattro miscele 00RAP sono rappresentative di un conglomerato bituminoso tradizionale confezionato a caldo impiegando aggregati lapidei vergini e due diversi tipi di bitume vergine, adottando due temperature di preriscaldamento e di miscelazione diverse. Queste miscele 00RAP assumono un ruolo di riferimento per tutte le altre miscele 50RAP contenenti anche fresato con o senza additivi rigeneranti di bitume.

In definitiva, in Tabella 2.2, si riassumono le caratteristiche principali delle otto miscele di conglomerato bituminoso di progetto da confezionare a caldo in laboratorio variando il tipo di bitume vergine impiegato; quindi, tutte le otto miscele si confezionano due volte, una volta con il bitume vergine Primario o Straight-run (S) e un’altra volta con il bitume vergine Visbreaking (V).

Tabella 2.2 - Caratteristiche delle miscele di progetto di conglomerato bituminoso confezionato a caldo; da confezionare due volte variando solo il tipo di bitume vergine (Primario o Straight-run e Visbreaking). Il RAP è riciclato a caldo.

MISCELA	RAP [%]	TEMPERATURA DI MISCELAZIONE [°C]	ADDITIVO RIGENERANTE DI BITUME
00RAP	0	140	non presente
00RAP	0	170	non presente
50RAP	50	140	non presente
50RAP	50	170	non presente
50RAP	50	140	additivo A
50RAP	50	170	additivo A
50RAP	50	140	additivo B
50RAP	50	170	additivo B

Risulta evidente che per tutte le miscele si hanno in totale due ricette principali, una per le miscele 00RAP e una per le miscele 50RAP; vengono riportate nel paragrafo 2.3.1. Si redige un piano operativo standardizzato rispettato per tutte le procedure e le prove eseguite in laboratorio su ogni miscela di conglomerato bituminoso di progetto riciclata e confezionata a caldo, seguendo precisi protocolli di prova, ad eccezione delle particolari fasi relative alle modalità di applicazione degli additivi rigeneranti di bitume in seguito esposti. Con questo si garantisce una congruenza e omogeneità del lavoro svolto; permettendo di ottenere per ogni provino dei risultati sperimentali ricavati dalla prova dinamica di modulo complesso da analizzare, studiare e confrontare tra di loro senza il rischio di commettere negligenze, incongruenze ed errori di valutazione nella fase esposta successivamente nel capitolo 3.

2.2 Materiali

Nel seguente paragrafo si riportano tutti i materiali impiegati nello studio delle miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo in laboratorio per svolgere il lavoro sperimentale trattato in questa tesi. Nello specifico, si suddividono in:

- aggregati vergini (aggregato grosso di calcare, sabbia di calcare e filler);
- fresato (RAP grosso e fino);
- due tipi di bitume vergine tradizionale (Primario o Straight-run e Visbreaking);
- due tipologie di additivi rigeneranti di bitume (additivo A e additivo B).

Si illustrano le caratteristiche e le proprietà di ogni materiale e le curve granulometriche degli aggregati e del fresato. Tutti i materiali posseggono la marcatura CE e risultano conformi ad un uso stradale secondo le normative vigenti italiane ed europee.

2.2.1 Aggregati vergini

Gli aggregati vergini vengono spesso chiamati anche aggregati di primo impiego proprio perché non provengono da fasi di riciclo e di recupero, ma sono impiegati dall'uomo per la prima volta, in questo caso proprio nel confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso. Sono aggregati lapidei, ottenuti dalle rocce presenti in natura; queste sono classificate in: *igne* o *magmatiche*, *sedimentarie* e *metamorfiche*. Gli aggregati vergini si ricavano da depositi naturali oppure da operazioni di cava di prestito; questi ultimi sono preferiti ai primi, soprattutto per l'impiego negli strati

superficiali di una pavimentazione flessibile, poiché, avendo una superficie di taglio ruvida e gli spigoli vivi forniscono maggiori caratteristiche meccaniche al conglomerato bituminoso. La prima fase operativa eseguita in una cava di prestito consiste nell'estrazione del materiale con l'ausilio di macchine da cantiere o di esplosivi, in seguito, si esegue la fase di frantumazione della roccia per ottenere le diverse classi granulometriche e di vagliatura per il successivo stoccaggio degli aggregati in cumuli e il loro trasporto in impianti di produzione del conglomerato bituminoso e in cantiere. [1] In una miscela di conglomerato bituminoso gli aggregati lapidei rappresentano il cosiddetto scheletro solido, generalmente formando circa l'80% del volume e il 95% in peso; sono caratterizzati dalle seguenti proprietà principali:

- geometriche: dimensione, granulometria, forma, grado di angolarità e tessitura superficiale;
- fisiche e meccaniche: massa volumica, resistenza e durabilità;
- chimiche: composizione mineralogica e adesione con il bitume. [1, 2]

Sono da evitare forme del granulo allungate e appiattite, privilegiando forme sferiche o cubiche; mentre, il grado di angolarità identifica la presenza degli spigoli vivi e la tessitura superficiale fornisce il grado di scabrezza, entrambe le proprietà influiscono il mutuo incastro e l'attrito granulare. Gli aggregati si identificano in funzione della loro dimensione, si definisce una designazione d/D (D è il diametro massimo e d il diametro minimo) mediante setacci, vagli o stacci che variano in funzione della normativa considerata (*UNI EN 13043, ISO 3310, CNR, ASTM,...*). Si riconosce così una prima classificazione degli aggregati:

- *aggregati grossi*, aventi dimensione massima D inferiore di 31,5 mm e dimensione minima d maggiore di 4 mm per la norma *UNI EN 13043*;
- *aggregati fini*, aventi dimensione massima D inferiore di 4 mm e dimensione minima d nulla per la norma *UNI EN 13043*;
- *filler*, coincide con il passante al vaglio 0,075 mm o 0,063 mm. [1, 2]

Inoltre, nella pratica ingegneristica si ha una ulteriore suddivisione nelle seguenti classi dimensionali a cui corrisponde un intervallo nominale (d/D) di dimensioni del granulo, spesso detto anche frazione granulometrica:

- *pietrischi* (se da cava) o *ghiaie grosse* (se naturali), con intervallo $71 \div 25$ mm;
- *pietrischetti* o *ghiaie fini*, con intervallo $25 \div 10$ mm;

- *graniglie*, con intervallo $10 \div 2$ mm;
- *sabbie*, passanti a 2 mm. [1]

Per il confezionamento di un conglomerato bituminoso è necessario definire la distribuzione granulometrica della miscela di aggregati definita come la percentuale relativa in peso di ogni dimensione; questa incide notevolmente sulle caratteristiche e proprietà finali del materiale. L'analisi granulometrica è rappresentata graficamente mediante la *curva granulometrica* che individua sull'asse delle ordinate la percentuale di passante in peso rispetto al totale a cui corrisponde sull'asse delle ascisse la dimensione di ogni vaglio in scala logaritmica. Durante questa analisi si cerca di ottimizzare il quantitativo e l'assortimento degli aggregati impiegati ottenendo la massima densità possibile per il conglomerato bituminoso. Perciò, la designazione d/D deve effettuarsi per ogni aggregato, definendo con il termine *sopravaglio* il passante percentuale coincidente con la dimensione massima dell'aggregato, mentre con *sottovaglio* si considera il passante percentuale relativo alla dimensione minima dell'aggregato. Il diametro massimo D influenza molte proprietà della miscela come l'instaurarsi di un idoneo attrito intergranulare, la resistenza, la stabilità e la lavorabilità. Il diametro massimo D è in funzione dello spessore dello strato s della pavimentazione a cui è indirizzato il conglomerato bituminoso, questo valore di D deve essere inferiore a $s/3$ e massimo uguale a $s/2$. [1, 2]

La norma europea *UNI EN 13043:2013* identifica le proprietà degli aggregati e del filler ottenuti da materiali vergini o riciclati, eccetto il RAP, richieste per essere conformi con marcatura CE per il confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso e per i trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico.

Successivamente, si illustrano gli aggregati vergini impiegati nel lavoro sperimentale: aggregato grosso di calcare, sabbia di calcare e filler di recupero (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Aggregati vergini impiegati nel lavoro sperimentale. Da sinistra: sabbia calcarea, aggregato grosso di calcare (6/12 e 12/16) e filler di recupero.

Aggregato grosso di calcare

Il calcare è una roccia sedimentaria formata prevalentemente da carbonato di calcio CaCO_3 , detto calcite. In natura si distinguono svariate tipologie di calcare in funzione della composizione mineralogica e della tipologia di sedimentazione.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, la roccia calcarea è impiegata come aggregato vergine in tutte le miscele di progetto 00RAP e 50RAP; nello specifico, per l'aggregato grosso si considerano le seguenti designazioni d/D : 16/20, 12/16, 6/12 e 4/8. In entrambe le ricette delle miscele risultano necessari e presenti solo gli aggregati di calcare con designazione 12/16 e 6/12. Il valore della massa volumica dell'aggregato grosso di calcare è di $2,69 \text{ g/cm}^3$. Di seguito, si riporta la curva granulometrica di ogni frazione di calcare impiegata (Tabella 2.3, Tabella 2.4, Tabella 2.5).

Tabella 2.3 - Curva granulometrica del calcare 12/16. (P è il passante e d è il diametro).

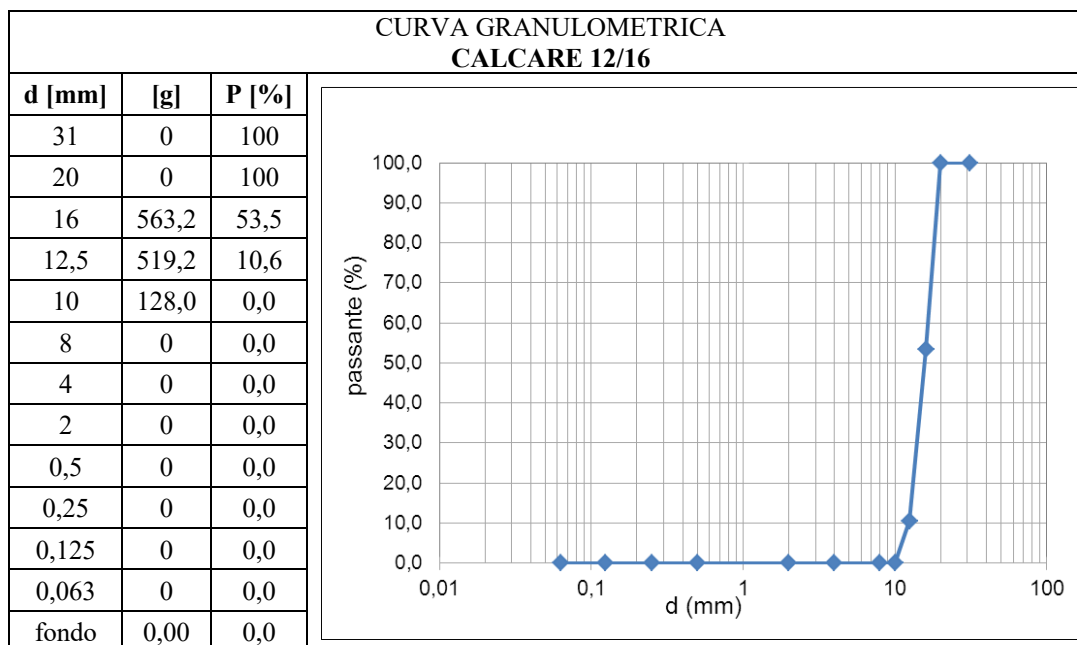


Tabella 2.4 - Curva granulometrica del calcare 6/12. (P è il passante e d è il diametro).

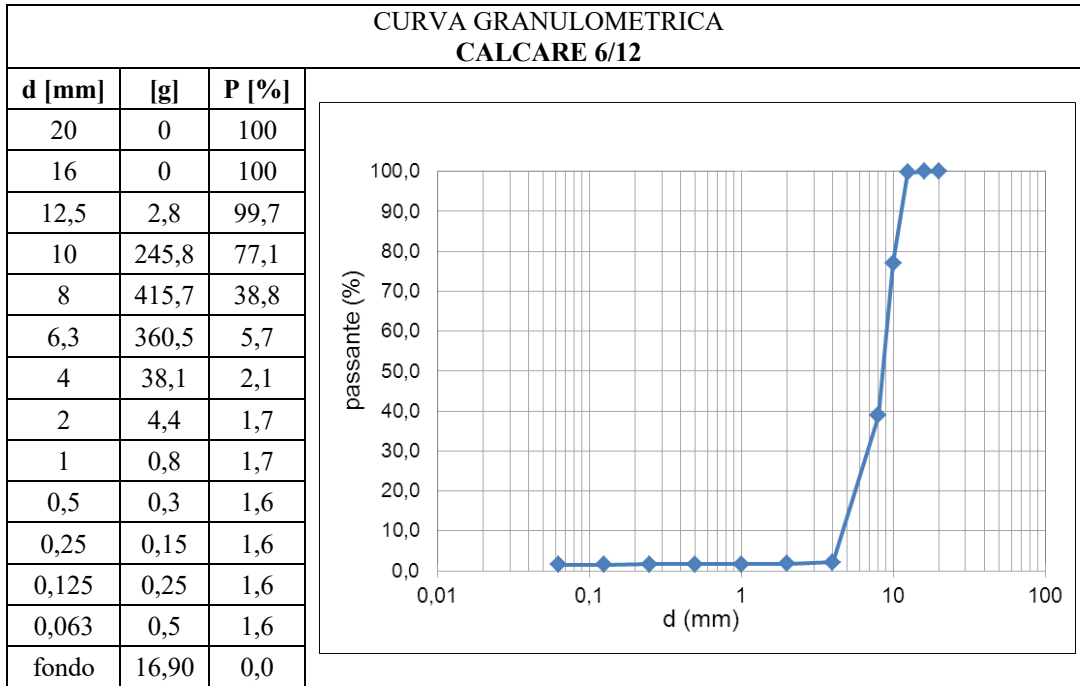
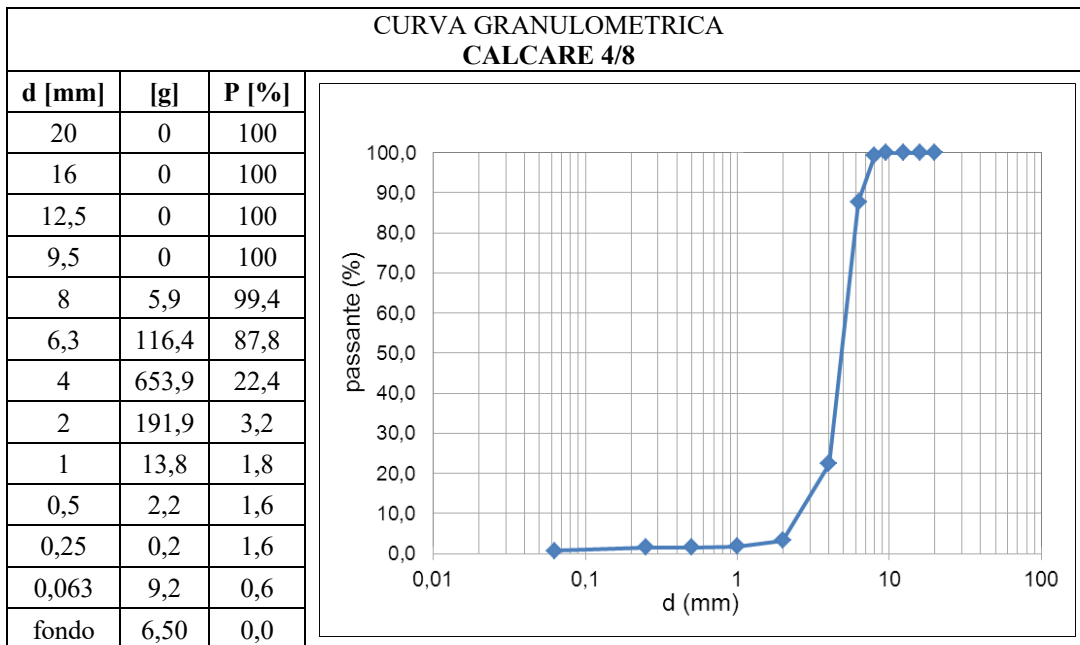


Tabella 2.5 - Curva granulometrica del calcare 4/8. (P è il passante e d è il diametro).

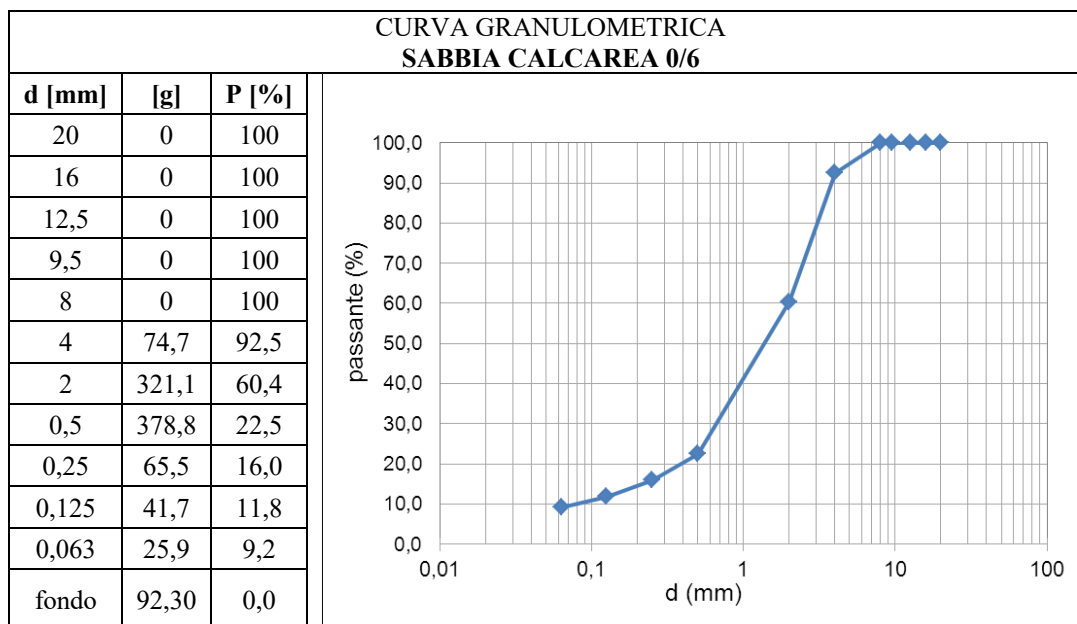


Sabbia di calcare

La sabbia generalmente è identificata come il passante a 2 mm, in natura è il risultato dell'azione disgregante degli agenti atmosferici e dell'acqua sulle rocce sedimentarie.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si impiega una sabbia di origini calcaree con designazione d/D : 0/6. Il valore della massa volumica della sabbia di calcare è di $2,69 \text{ g/cm}^3$. Di seguito, si riporta la relativa curva granulometrica (Tabella 2.6).

Tabella 2.6 - Curva granulometrica della sabbia calcarea 0/6. (P è il passante e d è il diametro).



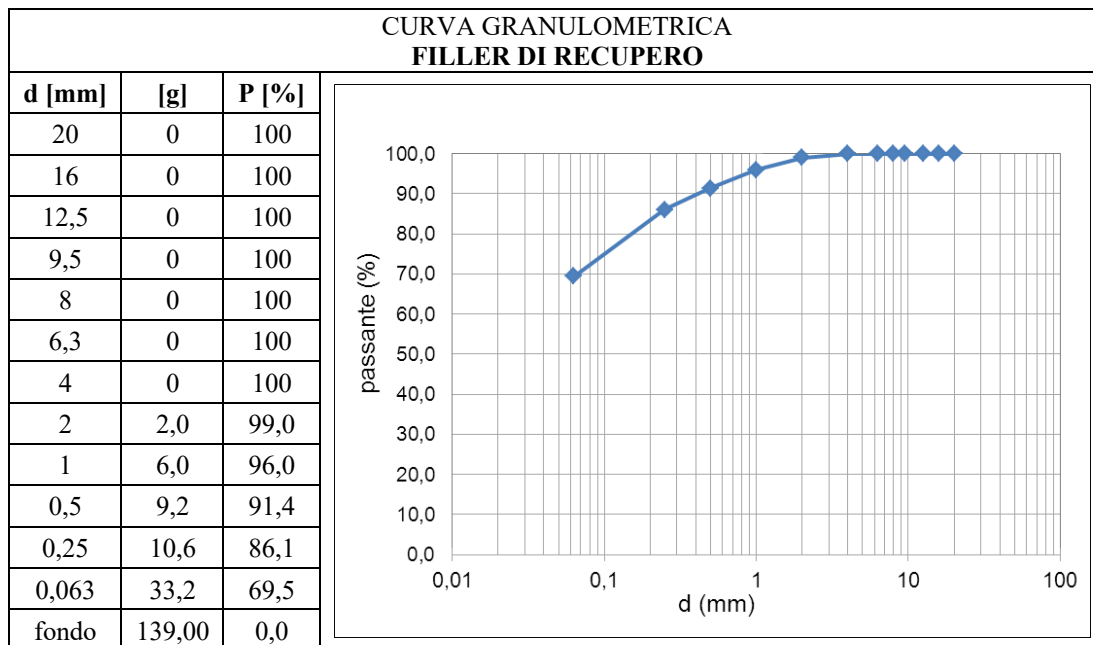
Filler

Il filler per definizione è la frazione minerale passante al setaccio 0,075 mm o 0,063 mm; proviene dalla parte più fina degli aggregati vergini oppure da polvere di roccia, consigliabile la polvere di calcare, da cemento, da calce idrata, da calce idraulica, da polvere di asfalto e da ceneri volanti [1, 6]. Il filler oltre a fungere da aggregato, partecipando alla curva granulometrica della miscela e riempiendo i vuoti intergranulari, interagisce con il legante bituminoso e si mescola con esso influenzando la reologia del conglomerato bituminoso [1]. Si crea così un mastice dall'unione del filler con il bitume che impedisce il fenomeno del trasudamento e dello spogliamento, aumentando la stabilità generale della miscela [2].

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, il filler impiegato è di recupero di origine calcarea. Il valore della massa volumica del filler di recupero di calcare è di $2,69 \text{ g/cm}^3$.

Di seguito, si riporta la relativa curva granulometrica (Tabella 2.7).

Tabella 2.7 - Curva granulometrica del filler di recupero. (P è il passante e d è il diametro).



2.2.2 Fresato

Nel capitolo 1 si espone il tema del conglomerato bituminoso di recupero; come già affermato, il termine *fresato* corrisponde al conglomerato bituminoso di recupero proveniente dalla demolizione di pavimentazioni stradali flessibili esistenti, effettuata con l'ausilio di macchine da cantiere chiamate fresatrici. Per un impiego in miscela il fresato deve essere qualificato e conforme con marcatura CE secondo la norma europea *UNI EN 13108-8:2016*, con dimensione non superiore al diametro massimo di progetto del mix design.

Il fresato è impiegato come aggregato di recupero in parziale sostituzione agli aggregati vergini, ma è fondamentale considerare la presenza al suo interno del bitume invecchiato se si procede come in questo caso ad un riciclo a caldo. Infatti, preriscaldare il materiale e miscelarlo poi a caldo tende a far riattivare il bitume del RAP e a farlo unire con il bitume vergine creando così il legante bituminoso finale della miscela; l'aggiunta di additivi rigeneranti di bitume aiuta la riattivazione del bitume ossidato e fornisce proprietà e caratteristiche aggiuntive al legante e alla miscela.

Nel paragrafo 2.4.7 si riportano le direttive tecniche di Capitolato Speciale di Appalto Anas [5] relative all'impiego di fresato nel confezionamento a caldo di un conglomerato bituminoso indirizzato allo strato di binder di una pavimentazione stradale flessibile. In Tabella 2.8 si riportano le specifiche tecniche di Capitolato Anas [2, 5] e quelle della provincia di Bolzano [6] in merito all'impiego massimo di percentuale in peso di RAP riferita al totale della miscela degli aggregati utilizzabile nel confezionamento a caldo di un conglomerato bituminoso per lo strato di binder.

Tabella 2.8 - % di fresato impiegabile in una miscela di conglomerato bituminoso riciclato e confezionato a caldo indirizzata allo strato di binder secondo le specifiche tecniche di Capitolato Anas [2, 5] e della provincia di Bolzano [6].

Strato della pavimentazione	Binder			
	Anas			Prov. Bolzano
Specifiche Tecniche	TQ	SF	HD	-
Tipo di bitume				
% di fresato	≤ 15	≤ 25	≤ 20	≤ 20

Nello studio sperimentale effettuato, si aumenta drasticamente la percentuale di RAP impiegato in miscela degli aggregati al valore di 50%; si utilizza nelle miscele denominate 50RAP. Nello specifico, si impiegano due frazioni di fresato (Figura 2.2), entrambe derivanti dalla fresatura di più strati della medesima pavimentazione stradale flessibile, perciò, contengono aggregati lapidei di natura assortita come il calcare e il basalto.



Figura 2.2 - Frazioni di RAP impiegate nel lavoro sperimentale. Da sinistra: RAP 0/8 e RAP 8/16.

Siccome il RAP viene riciclato a caldo, si ricavano due curve granulometriche, dette: curva nera (aggregati e bitume invecchiato) e curva bianca (solo aggregati). Mediante le curve nere si identificano le seguenti designazioni d/D delle due frazioni di RAP

impiegato: 8/16 e 0/8. Invece, le curve bianche si determinano dopo l'estrazione ed evaporazione del bitume contenuto nel RAP, quindi, rappresentano le curve granulometriche del solo aggregato del RAP e si utilizzano per la successiva definizione delle curve granulometriche di progetto delle miscele. Di seguito, si riporta la curva granulometrica del RAP 8/16 (Tabella 2.9) e del RAP 0/8 (Tabella 2.10).

Tabella 2.9 - Curva granulometrica del RAP 8/16. (P è il passante e d è il diametro).

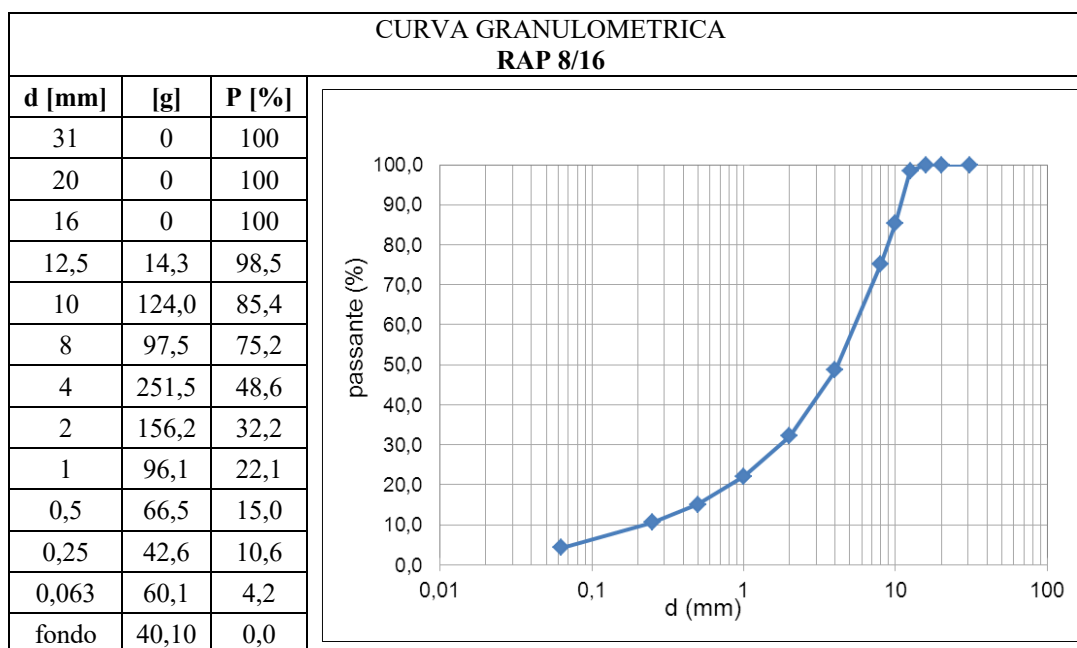
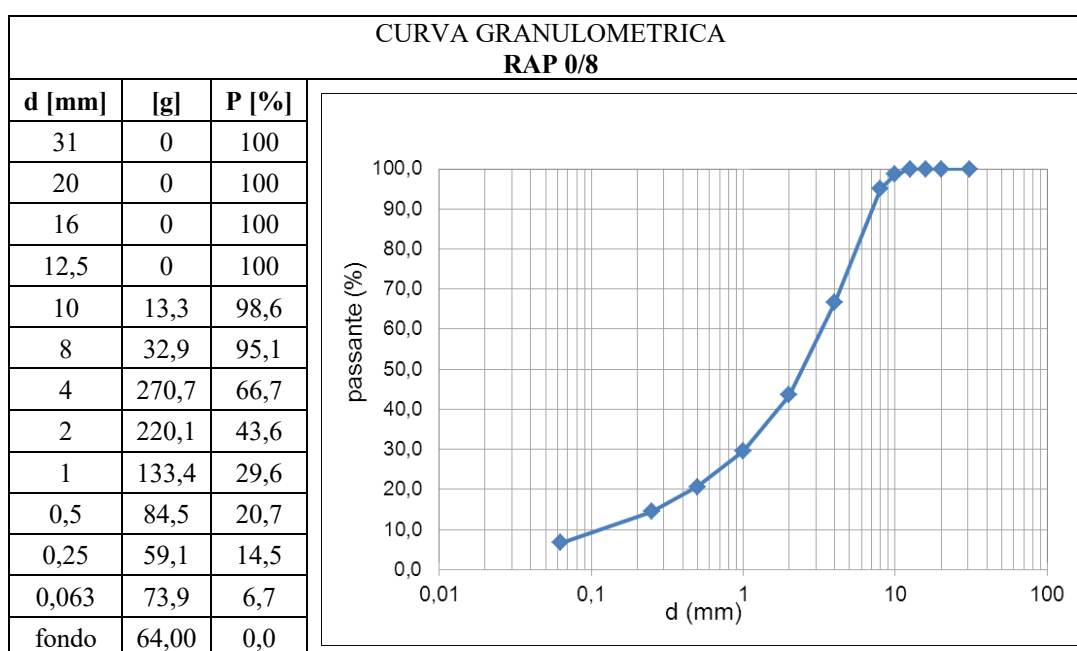


Tabella 2.10 - Curva granulometrica del RAP 0/8. (P è il passante e d è il diametro).



Per ogni frazione di RAP si determina il contenuto di bitume mediante estrazione (*UNI EN 12697-1*) ed evaporazione con evaporatore rotante (*UNI EN 12697-3*); in Tabella 2.11 si riporta la percentuale del contenuto di bitume in peso nel RAP individuata per ogni frazione di RAP. Il valore della massa volumica del RAP 8/16 è di 2,482 g/cm³, mentre quello del RAP 0/8 è di 2,494 g/cm³.

Tabella 2.11 - % di bitume in peso nel RAP.

BITUME NEL RAP	
[%]	
RAP 8/16	5,11
RAP 0/8	4,81

In Tabella 2.12 si riportano le proprietà fisiche del bitume interno al RAP; si determina la penetrazione a 25 °C con ago (*UNI EN 1426*) e il punto di rammollimento con il metodo biglia e anello (*UNI EN 1427*).

Tabella 2.12 - Proprietà del bitume interno al RAP.

Penetrazione a 25 °C [mm]	1,3
Punto di rammollimento [°C]	77,1

2.2.3 Bitumi vergini

Il legante bituminoso impiegato per realizzare lo strato di binder deve essere un bitume semisolido per applicazioni stradali prodotto artificialmente mediante processi di raffinazione del petrolio greggio [6]; tema esposto nel paragrafo 1.4.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si impiegano due bitumi vergini artificiali tradizionali, detti anche di base o tal quali (TQ), aventi classe di penetrazione a 25 °C del valore 50/70, ma ricavati da differenti processi di distillazione del petrolio greggio (Figura 2.3); così identificati:

- bitume vergine del tipo 50/70 Primario o Straight-run (S);
- bitume vergine del tipo 50/70 Visbreaking (V).



Figura 2.3 - Bitume Primario o Straight-run (S) e bitume Visbreaking (V) impiegati nel lavoro sperimentale.

In Tabella 2.13 si riportano le principali proprietà fisiche di entrambi i tipi di bitume impiegati, evidenziando una similitudine dei valori.

Tabella 2.13 - Proprietà dei due tipi di bitume impiegati: Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V).

TIPO BITUME	S	V
Penetrazione a 25 °C [dmm]	63	62
Punto di rammollimento [°C]	49	50
Penetrazione trattenuta dopo RTFOT [%]	> 50	> 50

Entrambi questi bitumi vengono spesso impiegati per il confezionamento di conglomerati bituminosi in Italia. Come già esposto nel paragrafo 1.4, il bitume TQ del tipo Primario o Straight-run (S) è il più comune in commercio e si ottiene dal residuo della seconda fase del processo di distillazione frazionata del petrolio greggio; mentre il bitume TQ del tipo Visbreaking (V) si ottiene dalla distillazione sottovuoto del residuo prodotto dal processo di cracking termico limitato chiamato visbreaking. La differenza sostanziale tra questi due tipi di bitume è che il bitume Visbreaking si ricava dal residuo di un processo di raffineria di decomposizione termica eseguito a sua volta sul residuo da cui viene ricavato il bitume Primario. Perciò, il bitume Visbreaking rispetto al bitume Primario essendo sottoposto a più trattamenti sia termici che di pressione, risulta essere più ossidato manifestando un comportamento più rigido, più fragile e più soggetto al fenomeno dell'invecchiamento. [12, 13, 14, 15, 16, 17]

2.2.4 Additivi rigeneranti

Come già esposto nel paragrafo 1.4, gli additivi rigeneranti per bitumi vengono impiegati per rigenerare e mobilitare il bitume invecchiato presente all'interno del fessato, permettendo così una riduzione della quantità di bitume vergine da utilizzare nel confezionamento di un conglomerato bituminoso contenente una fissata percentuale di RAP. Come già detto, il bitume ossidato risulta più rigido e fragile e riattivandosi tende a fondersi con il bitume vergine influenzando negativamente il comportamento reologico della miscela legante. Perciò, l'impiego di additivi può sopperire in parte a questa problematica, aggiungendo alcune componenti e proprietà perse dal bitume per l'invecchiamento. In commercio esistono svariati tipi di additivi con diverse caratteristiche, proprietà aggiuntive e modalità di applicazioni. [1, 2, 6]

Nel caso specifico del lavoro sperimentale effettuato si utilizzano due diversi prodotti in commercio di additivi rigeneranti per bitumi, in questa tesi vengono identificati semplicemente come: *additivo A* e *additivo B*. Successivamente, si espongono separatamente per ogni additivo le caratteristiche, le proprietà e le modalità di applicazione ottenute dalle relative schede tecniche fornite dalle aziende produttive.

Additivo A

La scheda tecnica del prodotto identificato come *additivo A* riporta che è un additivo liquido rigenerante per bitumi, di colore bruno, polifunzionale a elevato potere rigenerante di nuova generazione, composto da una miscela di poliammine e oli vegetali, privo di oli aromatici tossici ed ha un basso impatto odorigeno. Risulta possedere le caratteristiche di antiossidante, plastificante, rigenerante, bagnante, diluente, disperdente e attivante di adesione per i bitumi. In Tabella 2.14 si riportano le principali specifiche e proprietà fisiche dell'additivo 'A'.

Tabella 2.14 - Proprietà dell'additivo A.

Densità apparente a 25 °C [g/cm ³]	0,8 ± 0,1
Viscosità 25 °C [cP]	60 ± 10
Punto di infiammabilità [°C]	> 150
Pour Point [°C]	≥ - 5

L'applicazione dell'additivo avviene direttamente nel bitume vergine, nelle cisterne di stoccaggio o durante il ciclo produttivo mediante dosatori. Il dosaggio varia in funzione

delle condizioni operative di lavoro e della percentuale di fresato impiegato, la scheda tecnica consiglia di impiegare una percentuale di additivo pari allo 0,20% ÷ 0,40% sul peso del fresato presente nel conglomerato bituminoso confezionato.

Tabella 2.15 - Dettagli di impiego dell'additivo A per il lavoro sperimentale.

Tipologia additivo rigenerante	A
Dosaggio in % sul bitume del RAP	9%
Modalità di applicazione	aggiunto nel bitume vergine allo stato liquido e poi miscelati insieme
Miscele di progetto 50RAP di conglomerato bituminoso confezionato a caldo contenenti l'additivo	50RAP_S_140_A 50RAP_S_170_A 50RAP_V_140_A 50RAP_V_170_A

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, l'additivo liquido 'A' è impiegato nelle miscele e con le caratteristiche riportate in Tabella 2.15. La procedura di applicazione dell'additivo, eseguita in laboratorio, viene esposta nel dettaglio nel paragrafo 2.3.2.

Additivo B

La scheda tecnica del prodotto identificato come *additivo B* riporta che è un additivo liquido rigenerante per bitumi, limpido e brillante, di colore dal giallo all'ambra, in grado di incrementare la resistenza alle fessurazioni indotte da gradienti termici e da fenomeni di fatica, migliora la sensibilità all'acqua, riducendo la viscosità. Viene ottenuto dai processi produttivi delle industrie di carta, dalla lavorazione del legno di pino; infatti, contiene olii e resine. Un suo impiego permette, quindi, di aumentare il quantitativo di RAP nella miscela. In Tabella 2.16 si riportano le principali specifiche e proprietà fisiche dell'additivo 'B'.

Tabella 2.16 - Proprietà dell'additivo B.

Punto di infiammabilità [°C]	> 295
Viscosità dinamica a 25 °C [mPa.s]	71
Viscosità cinematica a 40 °C [mm ² /s]	40 ÷ 46
Valore di acidità [mg KOH/g]	max 15
Densità [ton/m ³]	0,93

L'additivo è solubile in qualsiasi tipo di bitume ed è compatibile con solventi aromatici, alcolici e con chetoni. Inoltre, è compatibile con altri additivi per miscelazione a caldo.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, l'additivo liquido 'B' è impiegato nelle miscele e con le caratteristiche riportate in Tabella 2.17. La procedura di applicazione dell'additivo, eseguita in laboratorio, viene esposta nel dettaglio nel paragrafo 2.3.2.

Tabella 2.17 - Dettagli di impiego dell'additivo B per il lavoro sperimentale.

Tipologia additivo rigenerante	B
Dosaggio in % sul bitume del RAP	6%
Modalità di applicazione	aggiunto nel fresato mediante spruzzatura
Miscela di progetto 50RAP di conglomerato bituminoso confezionato a caldo contenenti l'additivo	50RAP_S_140_B 50RAP_S_170_B 50RAP_V_140_B 50RAP_V_170_B

2.3 Apparecchiature e protocolli di prova

Nel seguente paragrafo si illustrano tutte le apparecchiature di laboratorio adoperate durante il lavoro sperimentale svolto e i relativi protocolli di prova. Inizialmente, si riportano le curve granulometriche di progetto e le ricette delle due miscele di conglomerato bituminoso da confezionare a caldo; successivamente, si espone la procedura operativa eseguita in laboratorio in diverse fasi per la realizzazione di due provini per ogni miscela da sottoporre a prove di carattere dinamico per la caratterizzazione reologica del materiale. Perciò, si susseguono le fasi di preparazione della ricetta, di miscelazione dei materiali costitutivi, di compattazione per realizzare i provini, di preparazione dei provini per la prova dinamica, l'esecuzione della prova dinamica di modulo complesso e la costruzione delle curve maestre di ogni miscela di conglomerato bituminoso confezionato.

2.3.1 Curve granulometriche di progetto

La curva granulometrica, come già detto nel paragrafo 2.2.1, rappresenta graficamente la distribuzione granulometrica di un campione di terreno ed è ottenuta mediante setacciatura o vagliatura.

Si sottolinea che la fase relativa allo studio del mix design non è affrontata nel dettaglio in questa tesi, poiché, è eseguita antecedentemente allo studio sperimentale qui trattato; si riporta per completezza di dati che il relativo mix design delle miscele è di tipo

volumetrico, noto anche come *metodo SUPERVAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVements)*, che permette di identificare una curva granulometrica ottimale basandosi sulle caratteristiche volumetriche della miscela.

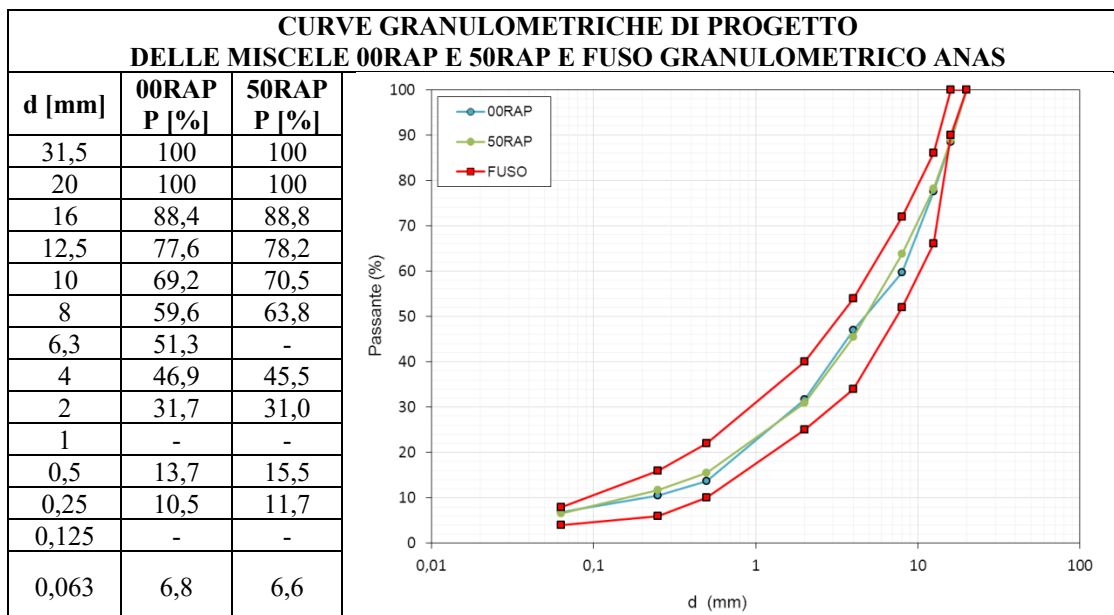
Si riportano le specifiche tecniche di Capitolato Speciale di Appalto Anas [2, 5] relative allo strato di binder, riportate nel paragrafo 2.4, che indicano, per un conglomerato bituminoso da confezionare a caldo, un fuso granulometrico e un intervallo della percentuale di bitume da impiegare riferita al peso della miscela (Tabella 2.18).

Tabella 2.18 - Fuso granulometrico e intervallo della % di bitume in miscela di Capitolato Anas [5] per lo strato di binder. (P è il passante e d è il diametro).

Specifiche di Capitolato ANAS - Binder				
FUSO GRANULOMETRICO			BITUME IN MISCELA	
d [mm]	Pmin [%]	Pmax [%]	min [%]	max [%]
20	100	100	4,1	5,5
16	90	100		
12,5	66	86		
8	52	72		
4	34	54		
2	25	40		
0,5	10	22		
0,25	6	16		
0,063	4	8		

La curva granulometrica di progetto deve rientrare all'interno del fuso granulometrico di Capitolato Anas ed è il risultato della migliore ottimizzazione possibile di assortimento granulometrico, impiegando i materiali costitutivi di progetto illustrati nel paragrafo 2.2. In Tabella 2.19, si riportano le curve granulometriche di progetto delle due miscele 00RAP e 50RAP, entrambe sono all'interno del fuso granulometrico di Capitolato Anas e risultano molto simili tra di loro, quasi sovrapposte.

Tabella 2.19 - Curve granulometriche di progetto delle miscele 00RAP e 50RAP e fuso granulometrico di Capitolato Anas [5]. (P è il passante e d è il diametro).



Identificate le curve granulometriche di progetto delle due miscele 00RAP e 50RAP, si determinano le relative ricette (Tabella 2.20 e Tabella 2.21). Entrambe le ricette delle miscele 00RAP e 50 RAP presentano lo stesso contenuto di bitume identificato con il 5,20% rispetto al peso della miscela, si considera che il bitume invecchiato presente nel RAP riesce a riattivarsi totalmente collaborando alla funzione legante e permettendo così un risparmio di bitume vergine impiegato nelle miscele 50RAP di circa il 42% rispetto alle miscele tradizionali senza RAP. Infine, il contenuto dei vuoti di ogni miscela è identificato con il valore del 6% per ottenere un valore prossimo al 4% nel nucleo centrale del provino compattato.

Tabella 2.20 - Ricetta di progetto della miscela 00RAP.

RICETTA MISCELA 00RAP			
AGGREGATI		BITUME	
FRAZIONE	% sull'aggregato	5,20	% sulla miscela
Filler	3,00		
Sabbia	47,00		
Calcere 4/8	0,00		
Calcere 6/12	25,00		
Calcere 12/16	25,00		
Calcere 16/20	0,00		
RAP grosso	0,00		
RAP fino	0,00		
TOTALE	100,00		

Tabella 2.21 - Ricetta di progetto della miscela 50RAP.

RICETTA MISCELA 50RAP					
AGGREGATI		BITUME		BITUME VERGINE	
FRAZIONE	% sull'aggregato	5,20	% sulla miscela	3,00	% sulla miscela
Filler	3,50				
Sabbia	13,00				
Calcare 4/8	0,00				
Calcare 6/12	9,50				
Calcare 12/16	24,00				
Calcare 16/20	0,00				
RAP grosso	20,00				
RAP fino	30,00				
TOTALE	100,00				

2.3.2 Miscelazione (UNI EN 12697-35) e compattazione dei provini (UNI EN 12697-31)

Nel lavoro sperimentale trattato, si identificano le seguenti fasi, svolte in laboratorio, per il confezionamento a caldo alle temperature di preriscaldamento e di miscelazione di 140 °C oppure di 170 °C delle 16 miscele di conglomerato bituminoso di progetto:

1. preparazione della ricetta relativa alla miscela da confezionare a caldo;
2. accensione del forno (Figura 2.4) alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) e introdurre due fustelle e gli aggregati per il preriscaldamento relativi alla miscela considerata (calcare, sabbia, filler e se presente anche il fresato);
3. trascorse 2 ore dalla fase 2, introdurre la lattina contenente il bitume vergine di progetto (Primario Straight-run o Visbreaking) nel forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C);
4. trascorsi 15 minuti dalla fase 3, accensione del miscelatore alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C);
5. trascorsa 1 ora dalla fase 3, iniziare la procedura di miscelazione a caldo alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) e dividere il materiale miscelato finale in due teglie;
6. alloggiare le due teglie contenenti il materiale miscelato in forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) per il condizionamento del materiale, per uniformare la temperatura interna e per replicare in laboratorio le tempistiche di trasporto del materiale;
7. trascorsi 30 minuti dalla fase 6, si intraprende la procedura di compattazione per realizzare due provini compattati per ogni miscela.



Figura 2.4 - Forno da laboratorio impiegato e relativi comandi con temperatura impostata rispettivamente a 140 °C e a 170 °C.

La procedura appena elencata in sette fasi è identica per tutte le miscele di progetto, eccetto per quelle contenenti l'additivo 'A' che necessitano della seguente modifica della sola fase 3:

- 3.1. trascorsa 1 ora e 40 minuti dalla fase 2 (anziché 2 ore), introdurre la lattina contenente il bitume vergine di progetto (Straight-run o Visbreaking) nel forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C);
- 3.2. trascorsi 45 minuti dalla fase 3.1, prendere dal forno la lattina del bitume vergine e posizionarla su una bilancia da laboratorio per aggiungere al suo interno il dosaggio da ricetta dell'additivo liquido 'A'. Raggiunto il peso del dosaggio dell'additivo 'A' si mescolano i due materiale tra loro con l'ausilio di un miscelatore per una durata di 5 minuti (Figura 2.5);
- 3.3. completata la fase 3.3 i materiali sono amalgamati e si introducono nel forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C).



Figura 2.5 - Modalità di applicazione dell'additivo A eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: dosaggio additivo A direttamente nel bitume vergine e successiva miscelazione.

Si sottolinea che questa procedura, relativa al solo additivo 'A', è atta a garantire una analogia dei tempi di permanenza del bitume vergine in forno alla temperatura di progetto con tutte le altre miscele; infatti, come già detto, il bitume tende ad invecchiare con la permanenza alle temperature elevate.

Di seguito, si espongono nel dettaglio le procedure eseguite in laboratorio per le fasi più rilevanti delle sopraccitate sette.

Fase 1: Preparazione della ricetta

In questa fase si preparano i materiali costitutivi seguendo la ricetta di ogni miscela di conglomerato bituminoso da confezionare a caldo.

Per prima cosa, si prendono 16 lattine metalliche con coperchio metallico per contenere il quantitativo di bitume richiesto nelle ricette. Si posiziona la latta contenente il bitume vergine Primario o Straight-run e in seguito quella del bitume vergine Visbreaking in un forno da laboratorio per mutare il suo stato e permetterne il versamento. Con l'ausilio di una bilancia da laboratorio con precisione al centesimo di grammo, si annota la tara di ogni lattina (Figura 2.6), poi si versa al suo interno un quantitativo di bitume leggermente superiore al peso necessario di ricetta, poiché, durante il futuro versamento nella tazza di miscelazione rimane, inevitabilmente, una porzione di bitume attaccata alle pareti e al fondo della lattina. Riempita la lattina, si trascrive il tipo e il peso del bitume contenuto, per poi stoccarle chiuse con il coperchio in uno scaffale a temperatura ambiente.



Figura 2.6 - Identificazione della tara delle lattine metalliche eseguita nel lavoro sperimentale.

Per preparare la miscela degli aggregati, vergini e di recupero, si identifica il peso richiesto dalla ricetta per ogni frazione mediante l'ausilio di una bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo, alloggiandoli in contenitori metallici.

Precedentemente, si è illustrato il metodo di applicazione e di dosaggio in laboratorio dell'additivo rigenerante 'A' che viene aggiunto direttamente al bitume vergine allo stato liquido e poi mescolato mediante miscelatore.

Invece, l'additivo rigenerante 'B' è aggiunto direttamente al fresato mediante spruzzatura eseguita a temperatura ambiente in laboratorio (Figura 2.7). Si dispongono insieme in una teglia metallica entrambe le frazioni di RAP secondo il quantitativo da ricetta, si pone su una bilancia e si nebulizza l'additivo sul fresato fino ad ottenere il dosaggio in peso misurato dalla bilancia. Questa tecnica di spruzzatura viene eseguita il giorno prima della fase di miscelazione e si effettua in laboratorio in piena sicurezza con idonea ventilazione sotto cappa di aspirazione, si impiega una pistola ad aria compressa con un serbatoio contenente l'additivo. Durante questa procedura si rimescola più volte il fresato con una spatola per ottenere un ricoprimento omogeneo, prestando attenzione all'intensità del getto dello spruzzo per non far disperdere porzioni di fresato e di non spruzzarlo sulle pareti della teglia altrimenti viene sì pesato, ma non agisce sul bitume del RAP. A dosaggio raggiunto, si avvolge il materiale in un sacchetto di plastica per lo stoccaggio giornaliero.



Figura 2.7 - Modalità di applicazione dell'*additivo B* eseguite nel lavoro sperimentale. Da sinistra: spruzzatura dell'*additivo B* sul RAP e risultato finale.

Si sottolinea che per ogni bilancia da laboratorio impiegata nel lavoro sperimentale (Figura 2.8) si procede sempre con una fase di preventivo controllo della taratura e di messa in bolla.



Figura 2.8 - Bilance da laboratorio impiegate nel lavoro sperimentale.

Fase 5: Miscelazione (UNI EN 12697-35)

La fase 5 è relativa alla miscelazione a caldo dei materiali e varia leggermente in alcune fasi in base alla miscela considerata. Si esegue in laboratorio mediante l'ausilio del miscelatore meccanico *Real Asphalt Mixer 30* (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Miscelatore meccanico impiegato nel lavoro sperimentale, pale e console comandi con display riportante la temperatura di miscelazione adottata nel lavoro sperimentale.

Questo macchinario è costituito principalmente da una tazza di miscelazione metallica atta a contenere i materiali da miscelare e da un corpo motore che aziona la rotazione di due pale metalliche miscelatrici; una pala fissa e sottile che ruota attorno al perimetro della tazza e una pala piatta e sagomata completamente removibile alla testa di ancoraggio che ruota al centro della tazza. La tazza di miscelazione è collegata al corpo principale mediante dei perni che permettono il movimento verticale e la rotazione in avanti; è possibile riscaldarla attraverso un sistema di resistenze elettriche e oli interni. Nella parte superiore del macchinario è alloggiata la console comandi con display per impartire i movimenti della tazza, avviare e arrestare la miscelazione, gestire la velocità di rotazione delle pale e la temperatura di riscaldamento della tazza di miscelazione.

Considerando la fase 4, il miscelatore viene acceso e impostato alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) almeno 45 minuti prima della fase di miscelazione, tempo necessario per il riscaldamento della tazza di miscelazione. La procedura di miscelazione eseguita in laboratorio è svolta in tempistiche rapide per non creare un eccessivo e pericoloso gradiente termico nella miscela; si divide nelle seguenti fasi:

- i. si immettono nella tazza di miscelazione tutti gli aggregati collocati in forno ad eccezione del filler, quindi, preriscaldati alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C). Perciò, in base alla ricetta considerata si introducono i seguenti aggregati: calcare, sabbia e fresato;
- ii. si avvia la miscelazione per una durata di 30 secondi consecutivi, trascorsi i quali, si arresta la rotazione delle pale;
- iii. si aggiunge nella tazza di miscelazione il bitume vergine che essendo riscaldato in forno alla temperatura di progetto da 1 ora è allo stato liquido. Questa è la fase più delicata della miscelazione; infatti, il bitume vergine viene aggiunto con la tecnica della pesata per differenza. Questa tecnica consiste nel posizionare la lattina senza tappo contenente il bitume sopra una bilancia da laboratorio e impostare lo zero sulla bilancia, successivamente, ad ogni versamento del bitume nella tazza di miscelazione si ripesa la lattina, leggendo così un peso negativo che corrisponde al peso introdotto in miscela, questa procedura si ripete finché non si raggiunge il dosaggio di bitume da ricetta;
- iv. si avvia la miscelazione per una durata di 2 minuti consecutivi, trascorsi i quali, si arresta la rotazione delle pale;

- v. si prende il filler dal forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) e lo si introduce nella tazza di miscelazione;
- vi. si avvia la miscelazione per una durata di 3 minuti consecutivi, trascorsi i quali, si arresta la rotazione delle pale;
- vii. si abbassa la tazza di miscelazione e si rimuove la pala metallica piatta sagomata, recuperando il materiale rimasto ad essa attaccato. Si ribalta in avanti la tazza di miscelazione e si trasferisce l'impasto all'interno di un contenitore metallico, poi, lo si suddivide in due teglie metalliche ognuna con il quantitativo corrispondente al peso del provino da compattare;
- viii. si alloggiano le due teglie metalliche con il materiale miscelato in forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) per il condizionamento, per una durata di 30 minuti. (Nota: questa fase corrisponde alla fase 6).

Si osserva che la procedura di miscelazione e i relativi tempi di miscelazione hanno assicurato un corretto ricoprimento degli aggregati, distribuendo omogeneamente il legante bituminoso.

Fase 7: Compattazione con pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)

La fase 7 è relativa alla procedura di compattazione del materiale miscelato a caldo e condizionato alla temperatura di progetto per la realizzazione dei provini cilindrici, n. 2 provini per ogni miscela di progetto. Si esegue in laboratorio mediante l'ausilio del macchinario noto come *pressa a taglio giratoria* (Figura 2.10).

La norma europea *UNI EN 12697-31:2019* specifica la procedura di compattazione di un provino cilindrico in conglomerato bituminoso mediante l'impiego della pressa a taglio giratoria e nello specifico riporta che:

Il metodo può essere utilizzato per la determinazione del contenuto di vuoti d'aria per tracciare una curva della massa volumica rispetto al numero di giri e per preparare provini di altezza e massa volumica predeterminate per prove successive.

Il funzionamento della pressa a taglio giratoria si basa sull'indurre uno stato di addensamento del materiale contenuto all'interno di una fustella sottoponendolo ad una continua riorganizzazione interna degli aggregati, applicando una compressione costante mentre la fustella ruota sul proprio asse e viene contemporaneamente inclinata,

facendo così variare l'asse di applicazione dei carichi principali e creando tensioni normali e tangenziali nel materiale. Da studi presenti in letteratura si conviene che la pressa a taglio giratoria, rispetto alle altre apparecchiature di laboratorio per la compattazione del conglomerato bituminoso come il compattatore Marshall, rappresenta la procedura di compattazione di laboratorio che più si avvicina alla compattazione reale che si ottiene in sito mediante i rulli, fornendo caratteristiche volumetriche analoghe del materiale compattato. Inoltre, con l'impiego della pressa a taglio giratoria è possibile, agendo sul numero di giri della fustella, ottenere dei provini con un differente grado di compattazione così da poter rappresentare in laboratorio stadi di compattazione differenti che si hanno in una pavimentazione stradale flessibile durante la sua vita utile. Infatti, oltre alla compattazione mediante rulli dopo la stesa, si ha nel tempo una continua compattazione indotta dai carichi agenti del traffico veicolare. [18]

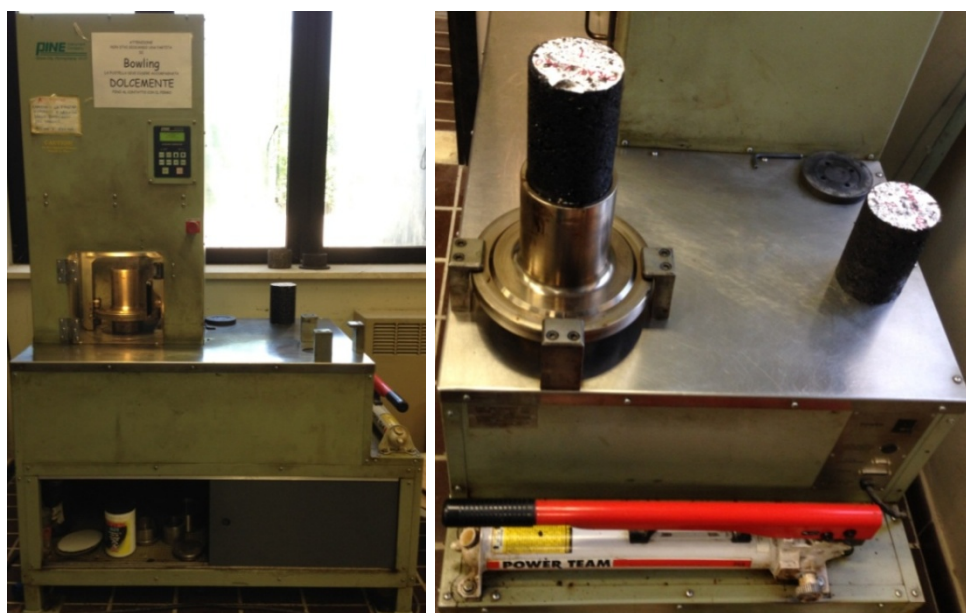


Figura 2.10 - A sinistra: pressa a taglio giratoria impiegata nel lavoro sperimentale, con fustella alloggiata nella camera di compattazione. A destra: fase di estrazione del provino compattato con l'ausilio della pompa idraulica.

Il macchinario impiegato in laboratorio è formato principalmente dalla zona motore, dal telaio, dalla camera di compattazione, dalla postazione di estrazione del provino compattato e dalla console comandi. Nella camera di compattazione è presente l'alloggiamento della fustella contenente il materiale da compattare mediante l'ausilio di un pistone cilindrico; inoltre, al confine con l'utente è situata una porticina di sicurezza

che si apre solo a compattazione ultimata per recuperare la fustella. Il corretto alloggiamento della fustella avviene mediante delle guide laterali interne alla camera di compattazione e si conclude facendo combaciare un dente metallico saldato sul lato della base della fustella in un meccanismo di contrasto ubicato sul fondo della camera tramite una rotazione della fustella su se stessa a corsa ultimata, così facendo si posiziona la fustella su una base rotante e in un supporto laterale per l'inclinazione della medesima. La postazione di estrazione del provino è composta da un pistone azionato manualmente mediante una pompa idraulica e un alloggiamento con tre profili metallici per bloccare la fustella durante l'innalzamento del pistone al suo interno. La console comandi è di tipo digitale e permette la gestione e la visualizzazione di tutte le impostazioni della prova; inoltre, durante la compattazione il display fornisce il valore dell'altezza del provino all'avanzare del numero di giri. Le fustelle (Figura 2.11) sono metalliche, di forma cilindrica, cave all'interno e aperte alle basi; queste ultime vengono chiuse mediante due coperchi metallici cilindrici piatti, il coperchio inferiore permette la risalita interna indotta dal pistone estrattore, mentre sul coperchio superiore vi agisce il pistone di compattazione. Il diametro interno è di 100 mm oppure di 150 mm, questo coincide con il diametro del provino da ottenere.



Figura 2.11 - A destra: fustella con coperchio da 100 mm impiegata nel lavoro sperimentale. A sinistra: fustella contenente il materiale miscelato da compattare per ottenere il provino.



Figura 2.12 - Display della console comandi con i parametri di prova relativi al lavoro sperimentale.

La prova prevede due differenti tipologie esecutive di compattazione:

- a numero di giri imposti;
- ad altezza imposta.

Nel lavoro sperimentale svolto, tutti i provini vengono compattati impiegando i seguenti parametri di prova conformi alle specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] relative ad un conglomerato bituminoso confezionato a caldo per lo strato di binder:

- compattazione a massa volumica predeterminata e ad altezza imposta a 150 mm (contenuto dei vuoti finale di ogni miscela è identificato con il valore del 6% per ottenere un valore prossimo al 4% nel nucleo centrale del provino compattato);
- si impiega una fustella metallica di diametro interno di 100 mm;
- pressione verticale costante di compattazione di 600 kPa;
- velocità di rotazione della fustella di 30 giri/minuto;
- inclinazione rispetto all'asse orizzontale della fustella di $1,25 \pm 0,02$ °.

Quindi, per il lavoro sperimentale trattato, la procedura di compattazione effettuata in laboratorio inizia trascorsi 30 minuti dalla fase 6 di condizionamento in forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) del materiale miscelato a caldo disposto su due teglie metalliche rappresentativo del peso di ogni provino di progetto. Si procede con una teglia alla volta, in modo rapido per non creare un gradiente termico nella miscela, nelle seguenti fasi:

- a. si prende dal forno alla temperatura di progetto (140 °C o 170 °C) la teglia con il materiale miscelato rappresentativo del primo provino e una fustella con il relativo coperchio;
- b. si alloggia sul fondo della fustella un dischetto in carta e si riempie l'interno con il materiale in teglia (Figura 2.11), si pone un dischetto di carta riportante il nome del provino sulla sommità del materiale e si posiziona il coperchio metallico superiore della fustella;
- c. si alloggia la fustella con il materiale nella pressa a taglio giratoria e si avvia la compattazione secondo i parametri di prova impostati mediante la console comandi (Figura 2.12);
- d. a compattazione ultimata il display fornisce il valore del numero di giri relativi all'ottenimento dell'altezza imposta di 150 mm. Si recupera la fustella e la si

posiziona sul piano di estrazione incastrandola sui tre profili metallici, si estrae il provino compattato con l'ausilio di un pistone idraulico (Figura 2.10);

- e. si ripone il provino compattato per un raffreddamento a temperatura ambiente; si ripete la procedura per ottenere il secondo e ultimo provino relativo alla miscela.

In definitiva, si ottengono in totale 2 provini compattati per ogni miscela di progetto, essendo le miscele 16, si hanno 32 provini in totale. Ogni provino risulta possedere le seguenti caratteristiche:

- forma cilindrica, altezza di 150 mm e diametro di 100 mm;
- contenuto dei vuoti finale di circa il 4% nel nucleo centrale del provino;
- peso del materiale miscelato impiegato per realizzare un singolo provino compattato relativo alla miscela 00RAP è di circa 2735 g;
- peso del materiale miscelato impiegato per realizzare un singolo provino compattato relativo alla miscela 50RAP è di circa 2745 g.

In Figura 2.13 si riporta il valore del numero di giri effettuati per ottenere l'altezza imposta di 150 mm relativo ad ogni provino realizzato. Questi valori risultano sempre inferiori a 120 giri, denotando una buona compattazione per tutte le miscele di progetto. Nel dettaglio, la presenza di RAP aumenta il numero di giri necessari a causa dell'incremento di viscosità del legante, l'impiego di additivi rigeneranti di bitume riducono il valore dei giri, mentre sia la differente temperatura di miscelazione che il diverso tipo di bitume impiegato non influiscono marcatamente sulla compattazione. Infatti, per i provini con bitume Primario risultano più compattabili quelli confezionati a 140 °C, mentre per i provini con bitume Visbreaking quelli a 170 °C.

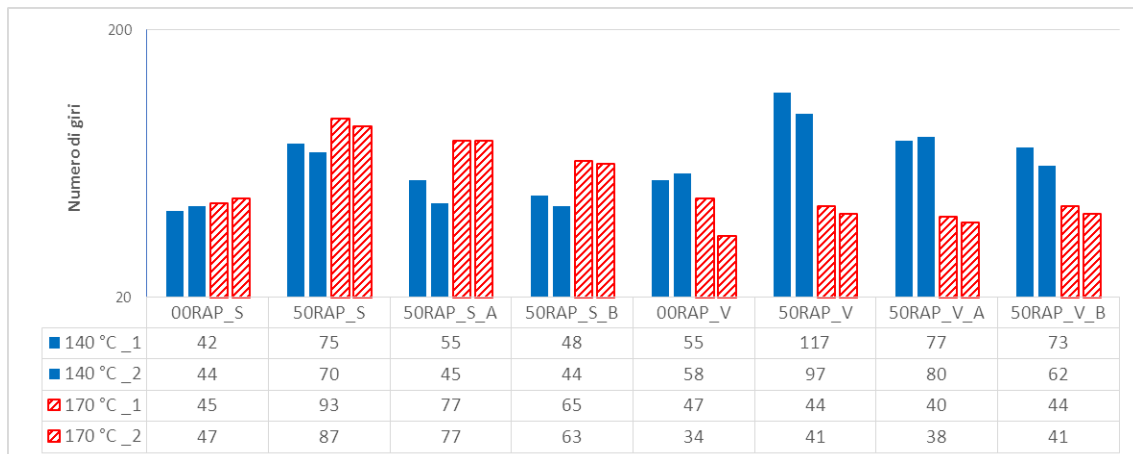


Figura 2.13 - Numero di giri relativi ad ogni provino, necessari per ottenere l'altezza imposta di 150 mm.

2.3.3 Preparazione dei provini per la prova dinamica di modulo complesso

Per eseguire correttamente la prova dinamica di modulo complesso e per ottenere risultati migliori, sempre più rappresentativi e privi di incertezze, assume un ruolo fondamentale la messa a punto di una fase antecedente di preparazione di ogni singolo provino al successivo svolgimento della prova. Nel lavoro sperimentale trattato, si eseguono in laboratorio per ogni provino le seguenti fasi cronologiche (Figura 2.14):

- I. ridimensionamento geometrico del provino compattato;
- II. asciugatura del provino ridimensionato in camera climatica;
- III. misure di massa e di volume del provino ridimensionato;
- IV. spianatura di entrambe le facce o basi del provino ridimensionato;
- V. incollaggio di tre coppie di riscontri sul contorno del provino con facce spianate;
- VI. misurazione dell'altezza finale del provino con facce spianate;
- VII. condizionamento del provino a condizioni ambientali controllate.



Figura 2.14 - Rappresentazione delle fasi, eseguite nel lavoro sperimentale, per preparare un provino compattato all'esecuzione della prova dinamica di modulo complesso. Da sinistra: provino compattato, ridimensionamento (fase I), spianatura delle basi con resina (fase IV) e posizionamento di 6 riscontri sul contorno (fase V).

Fase I: Ridimensionamento del provino compattato

Per ogni provino cilindrico compattato, di altezza 150 mm e di diametro 100 mm, raffreddato a temperatura ambiente, si effettua un ridimensionamento geometrico per ottenere il nucleo centrale relativo alla percentuale dei vuoti residui di progetto del 4%. Mediante una carotatrice si varia il diametro del provino da 100 mm a 75 mm; poi, con l'ausilio di una sega circolare si effettuano due tagli trasversali in corrispondenza delle

due basi del provino rimuovendo 15 mm per estremità, ottenendo così un'altezza finale del provino di 120 mm.

Fase II: Asciugatura del provino ridimensionato

Siccome le operazioni di taglio della fase I non sono eseguite a secco, ma in presenza di un getto d'acqua per garantirne la corretta e sicura esecuzione, si alloggia il provino bagnato all'interno di una camera climatica da laboratorio che assicura il controllo continuo della temperatura e dell'umidità ambientale per far evaporare l'acqua assorbita dal provino. Ovviamente, si imposta una temperatura tale da non provocare alterazioni reologiche irreversibili sul provino e lo si mantiene all'interno della camera climatica finché non risulta completamente asciutto.

Fase III: Misurazioni sul provino ridimensionato

Espulsa tutta l'acqua assorbita dal provino, si procede con la fase delle misurazioni di massa e di volume del provino (Figura 2.15). Mediante l'ausilio di una bilancia da laboratorio si annota il peso di ogni provino con precisione al decimo di grammo. Le misurazioni geometriche delle altezze e dei diametri di ogni provino si effettuano utilizzando un calibro manuale di tipo a corsoio a nonio semplice che permette di eseguire letture del valore da misurare al centesimo di millimetro. Nello specifico, si effettuano per ogni provino almeno 3 misurazioni ben distanziate sia dell'altezza che del diametro per ottenere poi il valore medio.



Figura 2.15 - Misurazioni sul provino ridimensionato. Bilancia da laboratorio e calibro manuale di tipo a corsoio a nonio semplice.

Fase IV: Spianatura di entrambe le basi del provino ridimensionato

Questa fase è molto importante e consiste nel regolarizzare le imperfezioni della superficie delle basi del provino causate dal taglio delle estremità mediante la sega a nastro nella fase I. Infatti, l'esecuzione del taglio provoca inevitabilmente perdite localizzate di materiale sul bordo della base e una non linearità della superficie con la creazione di piccoli gradini o scanalature relative alla rotazione e all'attrito della sega a nastro. Questi inevitabili difetti causano un leggero barcollamento del provino che sottoposto a carico assiale di compressione potrebbe non instaurare un flusso uniforme di isostatiche di tensione. Quindi, conoscendo l'elevato grado di precisione richiesto per l'esecuzione della prova dinamica, per non creare negligenze e per ottenere dei risultati accurati, si ritiene fondamentale correggere tutte le imperfezioni create dal taglio. Nel lavoro sperimentale svolto, si ricrea in laboratorio una superficie perfettamente piana delle basi mediante un materiale aggiuntivo, identificato con una resina epossidica. La procedura è svolta manualmente, richiede molta precisione e l'impiego dei seguenti materiali e attrezzature (Figura 2.16):

- resina bicomponente ibrida a iniezione e pistola con beccucci per l'applicazione;
- 2 basi in metallo con superficie perfettamente liscia;
- livella a bolla;
- carta lucida;
- spatolina.



Figura 2.16 - Materiali impiegati nel lavoro sperimentale per la fase IV di spianatura delle basi del provino ridimensionato.

Inizialmente, si posiziona a livello una base metallica su un piano da lavoro con il lato liscio in alto (Figura 2.17). Si posiziona la carta lucida sul lato liscio della base metallica, si posiziona il beccuccio sul contenitore della resina epossidica alloggiato sulla pistola e si estrae la resina adagiandola su un foglio di carta, si rimuove subito il beccuccio e si richiude con il tappo. Poiché la resina epossidica indurisce velocemente bisogna eseguire la prossima fase in modo rapido, ma preciso. Si distribuisce immediatamente la resina sulla base del provino con l'ausilio di una spatolina cercando di colmare i difetti e le mancanze di materiale; fatto ciò, si pone il provino con la base ricoperta di resina a contatto diretto con la carta lucida posta sulla base metallica. Si posiziona la livella a bolla sulla testa del provino e si esegue una prima livellazione nelle due direzioni principali; poi, si pone una base metallica sopra la testa per comprimere la resina ancora non indurita e si effettua una seconda misura del corretto livello nelle due direzioni ortogonali del piano. Si lascia la base di carico sulla testa e si procede velocemente con una spatolina a rimuovere la resina fuoriuscita dal bordo della base per la compressione indotta. Si lascia solidificare la resina per il tempo necessario senza toccare il provino, a solidificazione avvenuta si solleva il provino e si rimuove la carta lucida ottenendo così una superficie perfettamente liscia (Figura 2.18). Si ripete la procedura appena illustrata per la seconda faccia e per tutti i provini di progetto. Si sottolinea che si impiega il minimo quantitativo di resina necessario allo scopo per non alterare l'omogeneità del provino, essendo questi due materiali differenti.



Figura 2.17 - Dettagli della procedura di spianamento di una faccia del provino ridimensionato eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: posizionamento della base metallica con superficie liscia perfettamente a livello, distribuzione della resina su una faccia del provino ridimensionato, rimozione della resina adiacente al perimetro della base del provino con l'ausilio di una spatolina.



Figura 2.18 - Dettagli della procedura di spianamento di una faccia del provino ridimensionato eseguita nel lavoro sperimentale. Da sinistra: solidificazione della resina con base di carico in testa al provino e controllo livello, provino con base spianata a procedura ultimata.

Fase V: Posizionamento dei riscontri

Ultimata la fase IV si incollano sulla superficie laterale del provino tre coppie di *riscontri* (Figura 2.19). Questi sono dei solidi metallici con base esagonale di piccole dimensioni, simili a dei dadi e fungono da supporto per il corretto posizionamento dei sei sostegni dei tre *trasduttori LVDT*, chiamati *Xmen*; esposti nel paragrafo 2.3.4.

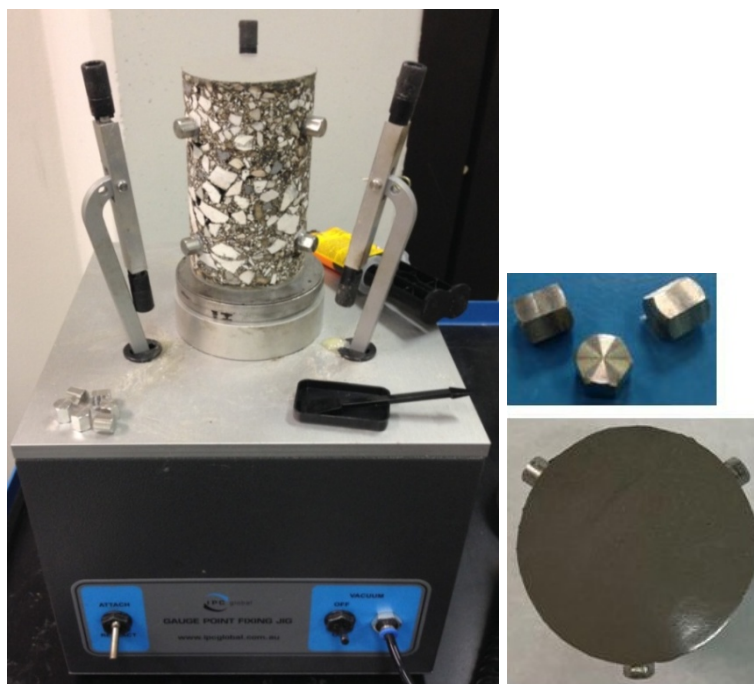


Figura 2.19 - Apparecchiatura e materiali necessari per il posizionamento di 6 riscontri posti a 120° tra di loro nel piano.

La procedura di posizionamento dei riscontri avviene mediante incollaggio di una sua faccia esagonale sul contorno del provino con l'ausilio di un adesivo epossidico bicomponente trasparente e di una specifica apparecchiatura di laboratorio per il corretto distanziamento e posizionamento. In totale si incollano 6 riscontri a coppia di 2, quindi, 2 riscontri per ogni trasduttore collocati a circa 120° in pianta tra di loro. L'accortezza da eseguire è di collocare i riscontri in egual distanza da entrambe le basi e di posizionarli in adiacenza di una superficie del provino regolare e priva di fori.

Fase VI: Misurazione altezza finale del provino con facce spianate

In questa fase si determina l'altezza finale media del provino con entrambe le facce spianate; infatti, l'aggiunta della resina epossidica aumenta leggermente l'altezza. Per ottenere l'altezza media si effettuano almeno tre misurazioni equidistanti con l'ausilio di un calibro manuale di tipo a corsoio a nonio semplice che permette di eseguire letture del valore da misurare al centesimo di millimetro.

Fase VII: Condizionamento provino

Il provino con facce spianate e riscontri incollati deve essere sottoposto ad un periodo di condizionamento di 3 ore alla temperatura di prova. Si esegue questa procedura di condizionamento per ogni temperatura di prova (5, 20, 35 e 50 °C) prima di eseguire la relativa prova dinamica.

2.3.4 Prova dinamica di modulo complesso

Come già detto nel paragrafo 1.3, nella pratica di laboratorio ci sono diverse tipologie di prove dinamiche. Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, per la caratterizzazione viscoelastica lineare di tutte le miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo, si eseguono prove dinamiche in regime oscillatorio con forzante sinusoidale con la modalità esecutiva a deformazione imposta. Questa prova viene eseguita su tutti i 32 provini compattati, ridimensionati e preparati, 2 provini per ogni miscela di progetto. Si misurano i parametri dinamici, modulo dinamico $|E^*|$ e angolo di fase ϕ , indagando otto frequenze di carico per quattro temperature di prova.

Nello specifico, terminata la fase di preparazione del provino compattato, si esegue la prova dinamica di modulo complesso impiegando il macchinario di laboratorio noto con

il nome di *Universal Testing Machines* o con l'acronimo *UTM-30* (Figura 2.20); questo permette di eseguire svariate tipologie di prove avanzate sia di carattere statico che dinamico su un provino di conglomerato bituminoso.

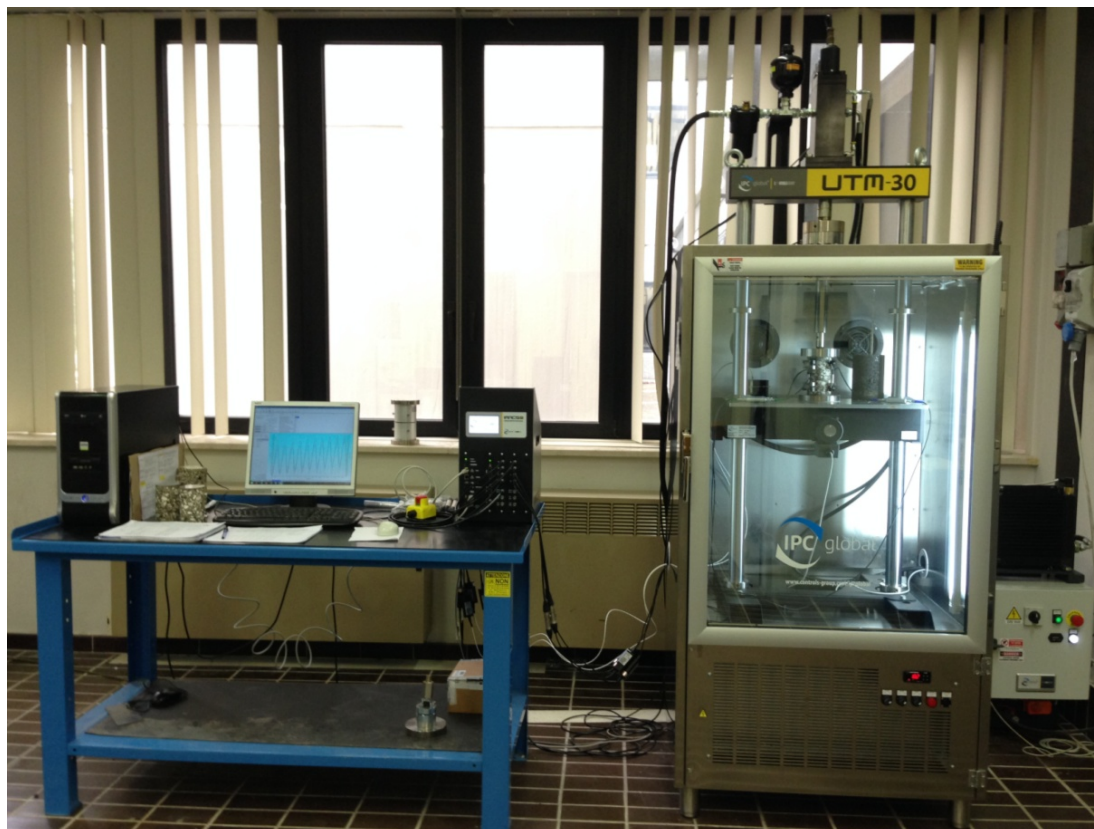


Figura 2.20 - *Universal Testing Machines (UTM-30)*, macchinario impiegato nel lavoro sperimentale per eseguire la prova dinamica di modulo complesso. Da sinistra: computer, centralina, camera climatica/di carico e alimentatore idraulico.

La scheda tecnica del macchinario riporta che il numero 30, nella sigla *UTM-30*, indica 30 kN che corrisponde all'entità del carico raggiungibile; inoltre, è possibile impostare una frequenza di carico in regime oscillatorio di tipo sinusoidale fino a 70 Hz. Il macchinario è provvisto di una gestione della temperatura interna rendendolo a tutti gli effetti una camera climatica con ventilazione forzata. Infatti, si presenta come un grande contenitore con una porta frontale con triplo vetro isolato con argon e guarnizioni, all'interno è presente il telaio di carico rigido formato da due sezioni tubolari in acciaio poste verticalmente lungo l'asse principale che fungono sia da sostegno che da guida per il movimento motorizzato verticale del piano orizzontale di una traversa metallica sulla quale è presente la base di alloggiamento per il provino da testare, mentre da un

foro in sommità fuoriesce il pistone idraulico di carico. Al di sopra ed esternamente al grande contenitore è situata la traversa di carico fissa che collega le estremità superiori delle due colonne in acciaio e sopra vi è il meccanismo idraulico di carico. Nella parte frontale bassa del macchinario è presente la console comandi da cui gestire la temperatura interna della camera climatica e tre leve relative all'accensione e allo spegnimento generale del macchinario, della camera climatica e dell'illuminazione interna della camera.



Figura 2.21 - Dettagli UTM-30. A sinistra: sistema traversa/pistone interno alla camera climatica; a destra: console comandi.

Il macchinario è ovviamente collegato alla rete elettrica mediante un alimentatore idraulico esterno, noto anche con il termine inglese *Hydraulic Power Supply (HPS)*, sul quale sono posizionati gli interruttori per l'accensione e lo spegnimento del medesimo. Esternamente al macchinario è situata una centralina digitale per il collegamento tra macchinario e computer, per la gestione e l'acquisizione in tempo reale dei dati e dei risultati di prova, per la gestione dell'alimentatore idraulico e di tutte le impostazioni di prova e del macchinario principale. Nel computer è installato il software proprietario dell'azienda costruttrice del macchinario per garantire un'interfaccia con l'utente e gestire tutti i parametri e le impostazioni necessari per la corretta esecuzione di una prova, visualizzare i risultati della prova in tempo reale e non, impartire comandi

digitali al macchinario come il movimento e il bloccaggio idraulico verticale della traversa e del pistone e gestire il funzionamento dell'alimentatore idraulico. Si posiziona un termometro analogico a galinstano di laboratorio con la punta inserita in un provino di conglomerato bituminoso alloggiato sulla traversa per avere un ulteriore riscontro della temperatura raggiunta dal provino da testare, il macchinario fornisce la temperatura sul display della console comandi e sul software mediante il sensore di temperatura interno alla camera accostato ad un altro provino di conglomerato bituminoso sempre posto sulla traversa. Per tutte le letture della temperatura effettuate nel lavoro sperimentale trattato si è tenuto fede al termometro analogico.

Inoltre, per l'esecuzione della prova dinamica di modulo complesso, sono necessari i seguenti accessori del macchinario *UTM-30*:

- n. 3 trasduttori di spostamento induttivo *LVDT (Linear Variable Displacement Transducer)*, presenti in tre colori differenti (nero, verde, blu), sono strumenti elettromagnetici di altissima precisione, riescono a misurare gli spostamenti dell'ordine del micrometro; nel caso della prova svolta misurano il millesimo di millimetro degli spostamenti assiali da cui si ottiene la deformazione assiale;
- n. 6 riscontri metallici di base esagonale, esposti nel paragrafo 2.3.3;
- n. 6 supporti, detti *Xmen*, da ancorare ai riscontri metallici esagonali mediante un meccanismo a molla e fungono da supporto per il corretto posizionamento assiale dei *trasduttori LVDT*;
- n. 1 testa di carico metallica di forma cilindrica con un foro circolare al centro di una base per il contatto diretto con la testa sferica del pistone di carico.

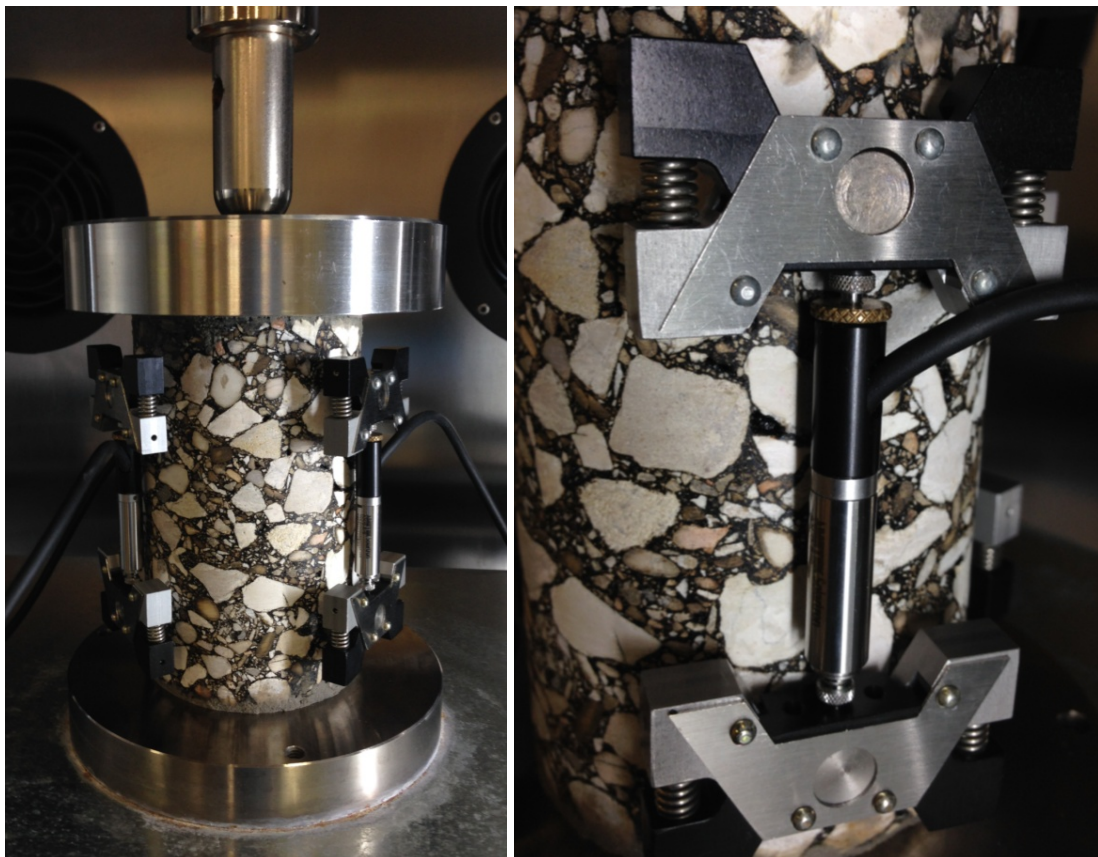
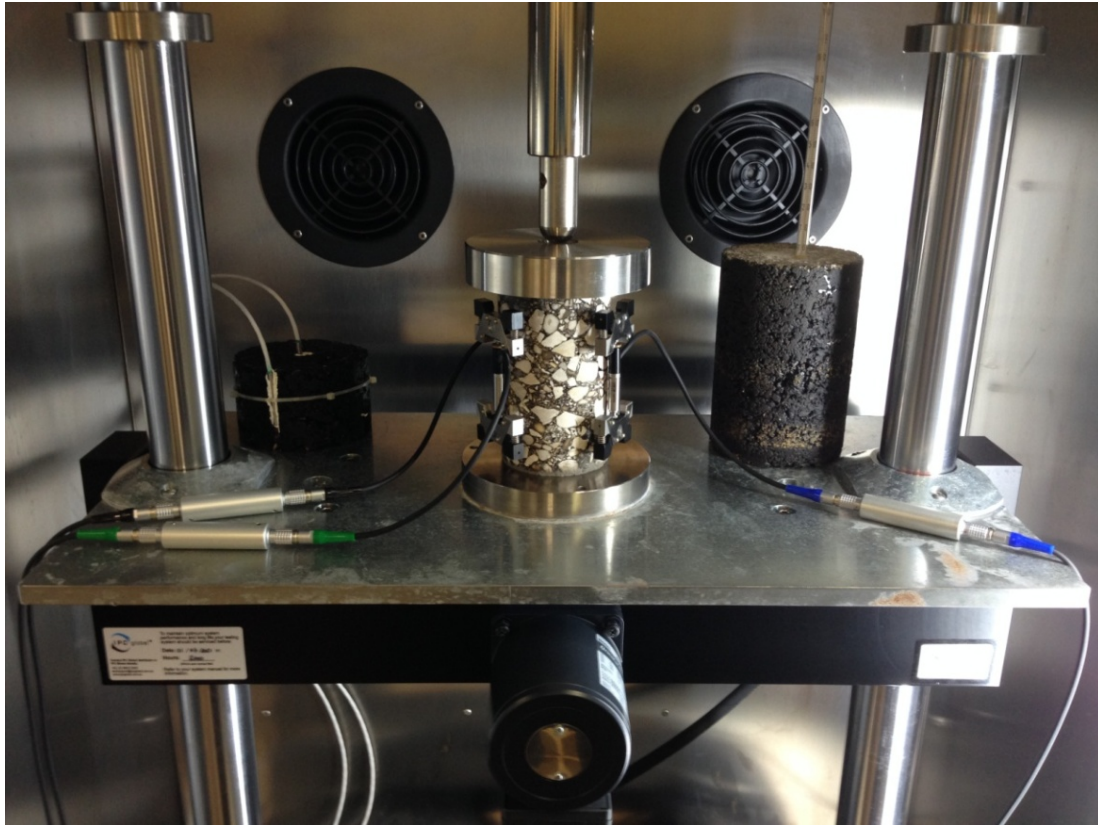


Figura 2.22 - Dettagli di un provino di una miscela 50RAP alloggiato sulla traversa con i tre trasduttori LVDT posizionati mediante i relativi supporti *Xmen*, testa di carico e termometro interno.

Si elencano i parametri e i protocolli di prova dinamica di modulo complesso adottati per tutti i 32 provini delle miscele di conglomerato bituminoso di progetto:

- la prova dinamica è in regime oscillatorio con forzante sinusoidale, indagando le seguenti 8 frequenze di carico espresse in Hz: 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1;
- la modalità esecutiva della prova dinamica è a deformazione assiale imposta, si assume una deformazione di 50 micro-strain ($50 \cdot 10^{-6}$ mm/mm) (immettendo nella sezione *Setup and Control* del software il valore *Average dynamic strain from 45 to 55 micro-strain*);
- la sollecitazione assiale di compressione è controllata e fornita dal pistone di carico, mentre la deformazione assiale è ottenuta dalla media delle misurazioni delle estensioni dei 3 *trasduttori LVDT* posti lungo l'asse del provino ad una posizione di circa 120° in pianta tra di loro;
- si esegue per lo stesso provino una serie di quattro prove dinamiche con gli stessi parametri e protocolli di prova variando solo la temperatura di prova applicata nel seguente ordine crescente: 5 °C, 20 °C, 35 °C e 50 °C;
- ogni prova viene eseguita dopo un periodo di condizionamento del provino di almeno 3 ore alla relativa temperatura di prova.

Mediante la prova dinamica si intende analizzare in laboratorio ciò che avviene realmente in una pavimentazione stradale flessibile; le diverse frequenze di carico rappresentano i carichi di traffico veicolare ciclici (20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz), mentre ripetere la prova variando solo la temperatura di prova (5, 20, 35 e 50 °C) fornisce una rappresentazione delle condizioni climatiche in esercizio.

Di seguito, si elenca la procedura eseguita in laboratorio per lo svolgimento della prova dinamica di modulo complesso.

Inizialmente, si accende il macchinario, la camera climatica, la centralina digitale, il computer e l'alimentatore idraulico. Si avvia il software proprietario presente nel computer (*UTS 006 - AMPT Dynamic Modulus Test* versione 3.06) che si presenta con un'interfaccia grafica di lavoro divisa in più sezioni, ognuna con un compito differente, così identificate: *General*, *Setup and Control*, *Test Data*, *Tuning* e *Chart*. Nella parte superiore è presente la barra dei menù e alcuni pulsanti rapidi di comando, nella parte inferiore è presente una barra delle informazioni, al centro è presente l'area del grafico di prova e sopra ad esso la finestra che varia in base alla sezione visualizzata. Avviato il

software si presenta nella sezione *General*. Per intraprendere la prova, per prima cosa è necessario avviare il file noto come *Template*. Nel lavoro sperimentale svolto, si impiegano quattro differenti file *Template* a seconda della risposta in termini di rigidità del materiale sottoposto alla prova, così identificati:

- alta rigidità, relativo a basse temperature di prova, per la prova eseguita sui provini 00RAP a 5 °C;
- alta rigidità RAP, relativo a basse temperature di prova, per la prova eseguita sui provini 50RAP a 5 °C;
- rigidità intermedia, relativo a temperature intermedie di prova, per la prova eseguita sui provini 00RAP e 50RAP a 20 °C e 35 °C;
- bassa rigidità, relativo a elevate temperature di prova, per la prova eseguita sui provini 00RAP e 50RAP a 50 °C.

Selezionato il file *Template* si avvia una nuova configurazione mediante il comando *New* (*Clear current data and load template file*), si apre la sezione *General* e ci si sposta nella sezione *Setup and Control* (Figura 2.23) per immettere i parametri di prova.

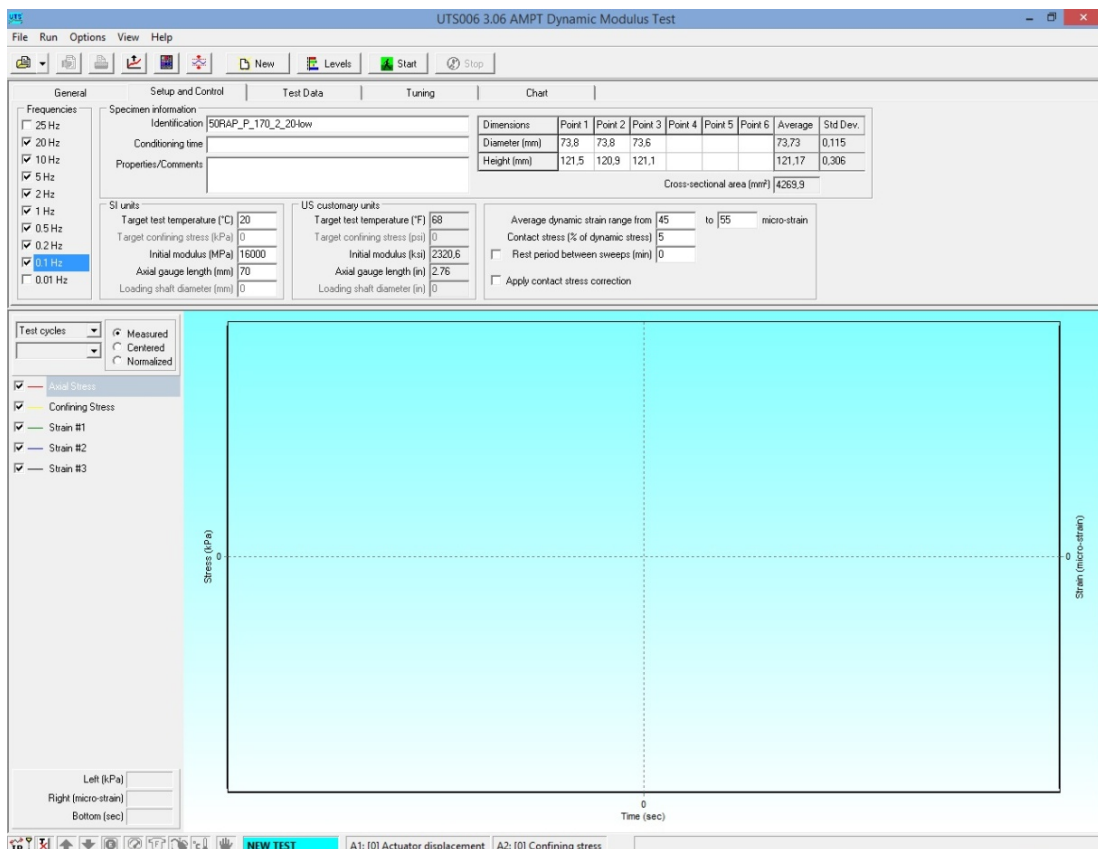


Figura 2.23 - Sezione *Setup and Control* del software per l'esecuzione della prova dinamica.

Nella finestra *Setup and Control* si impostano i seguenti parametri di prova: le caratteristiche del provino da testare (nome, altezza, diametro, modulo iniziale) e i parametri di prova (frequenze di carico, temperatura, *Average dynamic strain from 45 to 55 micro-strain*, *Contact stress* e *Axial gauge length*).

Mediante la finestra *Virtual Pendant* (Figura 2.24) si gestisce l'alimentatore idraulico, accensione e spegnimento dei motori, movimenti verticali del pistone mediante il *Canale 1* (eseguiti a motori accesi) e della traversa mediante il *Canale C* (eseguiti a motori spenti).

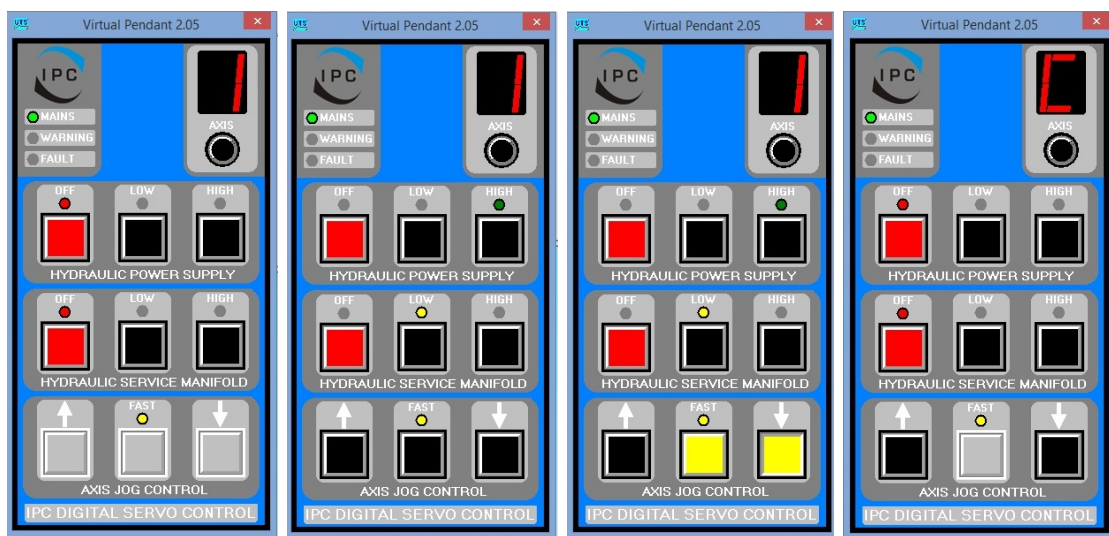


Figura 2.24 - Finestra *Virtual Pendant* del software per l'esecuzione della prova dinamica. Da sinistra: motori spenti e *Canale 1*, motori accesi e *Canale 1* (configurazione adoperata nel lavoro svolto per avviare la prova dinamica e muovere il pistone), motori accesi e *Canale 1* (comando abbassamento del pistone), motori spenti e *Canale C* (per muovere la traversa).

Si alloggia il provino, con i sostegni dei *trasduttori LVDT* ben ancorati ai riscontri, sulla base rialzata presente sulla traversa, si posiziona sulla testa del provino la base metallica cilindrica con l'incavo circolare in corrispondenza del pistone per ripartire il carico assiale di compressione indotto dal pistone al provino. Ora si collocano i tre *trasduttori LVDT* (nero, verde, blu) con le rispettive punte metalliche negli alloggiamenti centrali presenti negli *Xmen*. I trasduttori grazie a questi supporti si posizionano perfettamente verticali lungo l'asse del provino e misurano lo spostamento assiale e la deformazione assiale. Ogni trasduttore possiede su una sua punta un meccanismo manuale, formato da una ghiera e una vite, per regolare la lunghezza del medesimo. Questo si effettua con la finestra *Transducer Levels* (Figura 2.25), dove, si visualizza la temperatura interna e la

corsa dei trasduttori e del pistone. Per regolare i trasduttori bisogna impartire il comando *clear zero offset* su ogni barra relativa ai trasduttori, poi, agendo manualmente sul meccanismo dei trasduttori, si imposta la lunghezza in modo tale che la barra risulti prossima alla metà, poi, si impone il comando *set zero offset* su ogni barra relativa ai trasduttori; così facendo ora tutti i trasduttori possiedono la stessa lunghezza anche a livello software. Inoltre, anche la barra del pistone deve essere a circa metà lunghezza.

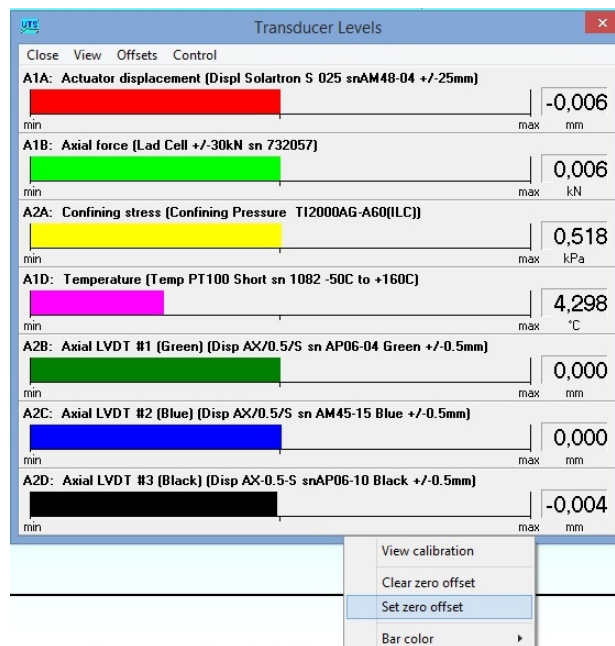


Figura 2.25 - Finestra *Transducer Levels* del software per l'esecuzione della prova dinamica. Barre colorate relative al pistone (rosso), *trasduttori LVDT* (verde, blu, nero) e finestra di comando per settare i trasduttori.

Ora il provino deve essere ben centrato, in asse con il pistone e i trasduttori devono fornire delle curve il più possibile sovrapposte con bassi valori di errori. Questa verifica si esegue nella sezione *Tuning* (Figura 2.26) e si svolge a bassa temperatura o a temperatura ambiente, ad una frequenza di carico di 1 Hz e con una deformazione imposta di 50 micro-strain; si considerano queste accortezze per non compromettere il provino. Mediante il pulsante *Ram* si muove il pistone e il *Tuning* si avvia con il pulsante *Haversine*. Si ripete la procedura del *Tuning*, spostando manualmente il provino, finché non si riscontrano degli andamenti simili delle curve.

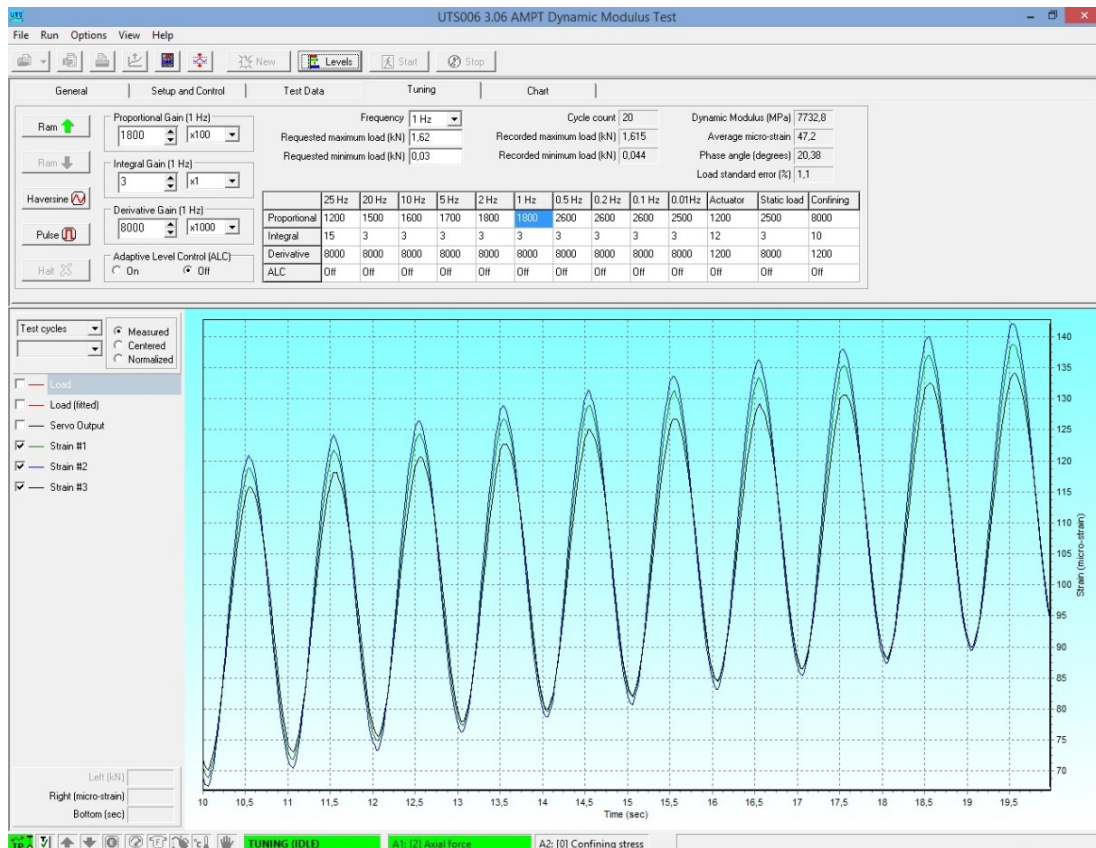


Figura 2.26 - Tuning del software per l'esecuzione della prova dinamica.

Al termine del *Tuning* si esegue una prova dinamica alla sola frequenza di 1 Hz (Figura 2.27) per valutare i valori degli errori: *Deformation uniformity (%)* e *Phase uniformity (Degrees)*, questi devono risultare inferiori rispettivamente a 20% ed a 5°.

Verificati i valori degli errori, il provino e i trasduttori risultano ben posizionati e si procede con la prova; d'ora in poi il provino non viene più toccato e si condiziona alla temperatura di prova per almeno 3 ore.

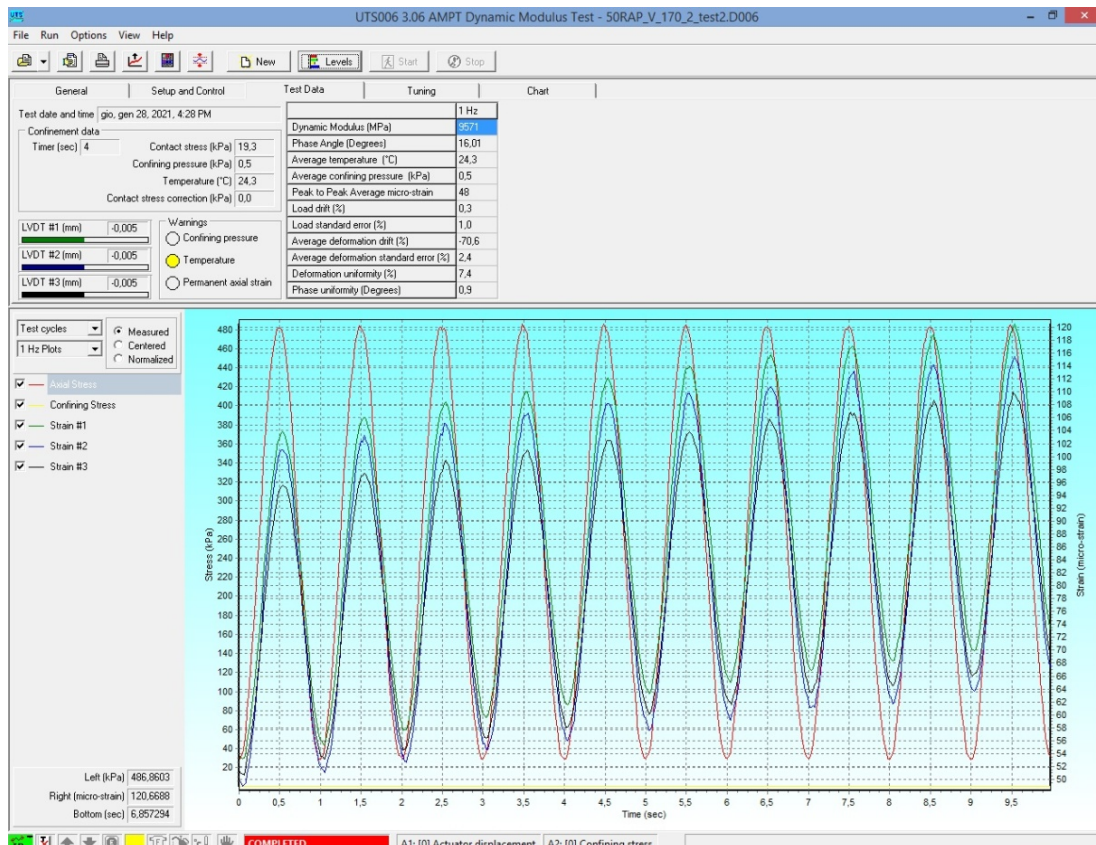


Figura 2.27 - Prova di test alla frequenza di carico di 1 Hz per valutare gli errori.

In seguito, nella sezione *Setup and Control* si immettono i parametri di prova necessari e si avvia la prova mediante il pulsante *Start (Start the Test)*. Si apre la sezione *Test Data*, si salva il file di prova e si confermano le finestre di *Pre-Test Check List* (Figura 2.28).

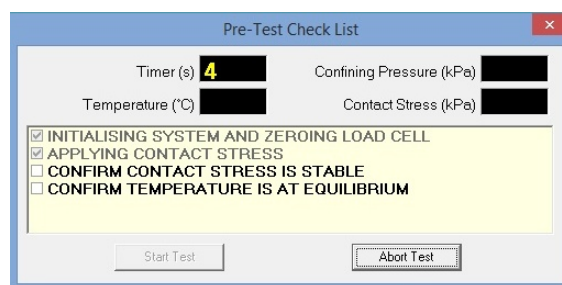


Figura 2.28 - Finestra di *Pre-Test Check List* del software per confermare l'avvio della prova dinamica.

Nella sezione *Test Data* si osservano in tempo reale i valori dei risultati della prova e l'andamento delle curve di carico e dei tre trasduttori (Figura 2.29). Si osserva, per ogni

temperatura di prova fissata, l'andamento dei valori del modulo dinamico e dell'angolo di fase al diminuire della frequenza di carico indagata, si parte da 20 Hz e si arriva a 0,1 Hz. Inoltre, per ogni frequenza indagata si valutano i valori degli errori *Deformation uniformity (%)* e *Phase uniformity (Degrees)*, che devono risultare sempre inferiori a 20% ed a 5°.

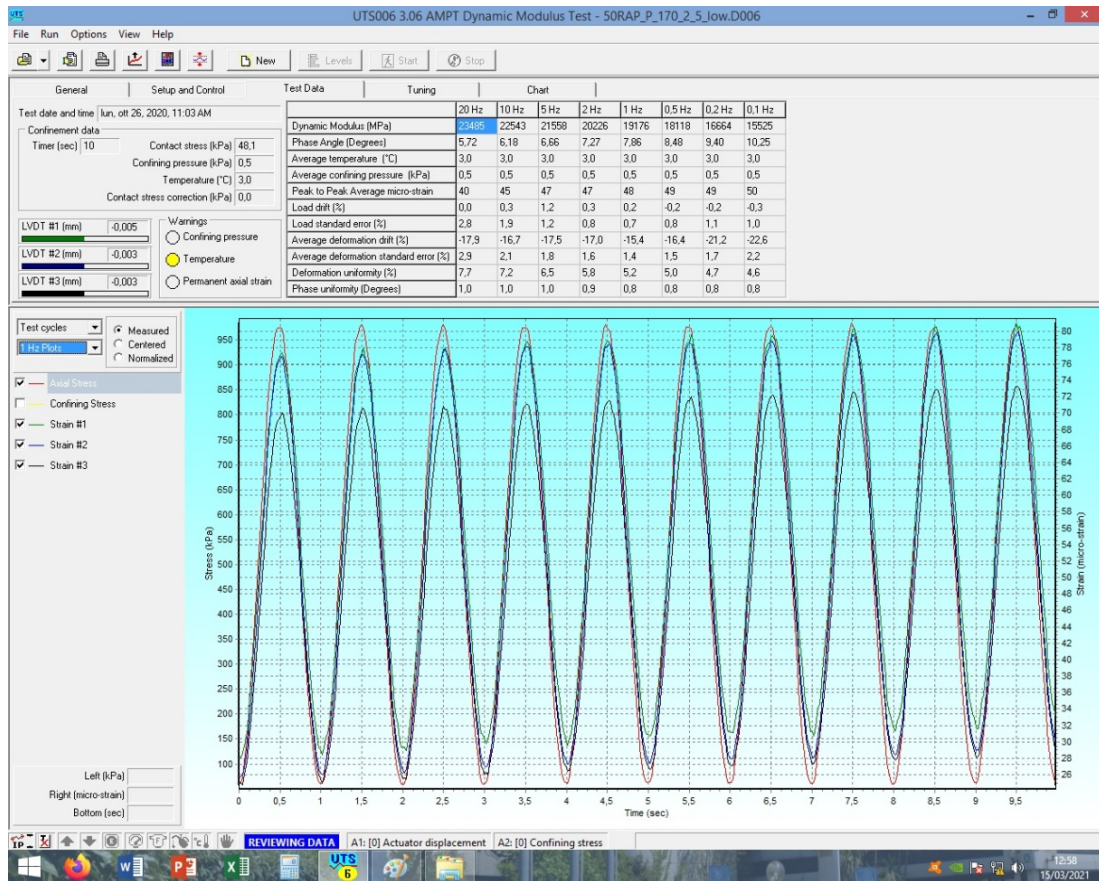


Figura 2.29 - *Test Data* del software per l'esecuzione della prova dinamica. Riporta i parametri dinamici misurati mediante la prova alle frequenze indagate e la rappresentazione grafica delle curve del carico e dei trasduttori.

A prova ultimata si imposta la temperatura della camera climatica al valore relativo alla prova successiva e si lascia condizionare il provino per 3 ore, terminate le quali si procede ad effettuare la prova alla temperatura superiore senza la necessità di ripetere la fase di *Tuning*. Terminata la serie di quattro temperature per ogni provino si procede con un altro provino.

In definitiva, ogni prova dinamica di modulo complesso eseguita ad una fissata temperatura di prova fornisce l'andamento del modulo dinamico e dell'angolo di fase al variare delle otto frequenze di carico indagate; risulta evidente che per ogni provino si misurano i valori dei parametri dinamici per otto frequenze a quattro temperature diverse. Generalmente, si osserva il seguente andamento:

- ad ogni prefissata temperatura di prova, al diminuire della frequenza di carico indagata diminuisce il valore del modulo dinamico misurato e aumenta il valore dell'angolo di fase misurato;
- aumentando la temperatura di prova, a parità di frequenza indagata ad una temperatura di prova inferiore, si riscontra un decadimento del valore del modulo dinamico e un aumento dell'angolo di fase.

I dati così ottenuti vengono rappresentati in curve isoterme per poi essere traslati in un'unica curva, detta *curva maestra*, tramite fattori di traslazione (*shift factor*) e interpolati con l'ausilio di un modello analitico e diversi parametri; questo concetto viene esposto nel successivo paragrafo 2.3.5. Si ottengono così tutti i parametri dinamici fondamentali per descrivere il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso: il modulo dinamico $|E^*|$, il modulo complesso E^* , la componente elastica E_1 e quella viscosa E_2 del modulo complesso e l'angolo di fase ϕ .

2.3.5 Cenni teorici sull'elaborazione dei risultati della prova dinamica

Per poter analizzare i risultati sperimentali ottenuti dall'esecuzione della prova dinamica di modulo complesso su ogni singolo provino di conglomerato bituminoso è necessario introdurre i concetti teorici alla base dello studio. Già dai risultati delle prove dinamiche eseguite si nota che i valori dei parametri dinamici misurati variano, oltre che dalle caratteristiche costitutive della miscela, anche in funzione della temperatura di prova e della frequenza di carico. Quindi, questo rispecchia quanto detto nel paragrafo 1.3 in merito alla reologia di un materiale dal comportamento viscoelastico lineare come il conglomerato bituminoso, definendolo appunto tempo-termo dipendente.

Per ottenere una rappresentazione grafica dei risultati di una prova dinamica in regime oscillatorio è necessario introdurre il *principio di sovrapposizione tempo-temperatura* o *time-temperature superposition principle (TTSP)*. Questo principio afferma che un qualunque parametro meccanico, identificato nel caso trattato con il modulo dinamico $|E^*|$ e l'angolo di fase ϕ , ricavato da una prova dinamica in regime oscillatorio

effettuata a diverse temperature mantenendo costante la frequenza di carico equivale al viceversa, cioè, la stessa grandezza si può ottenere mantenendo costante la temperatura di prova e variando la frequenza di carico. Perciò, gli effetti prodotti dal tempo e dalla temperatura sono sovrapponibili; infatti, si nota che aumentare il tempo di carico, riducendo le frequenze di carico, corrisponde per il materiale un comportamento simile indotto da un aumento della temperatura di prova. I materiali che rispettano tale *principio di TTS* sono definiti *termoreologicamente semplici*. [12, 13]

Nello specifico, il *principio di TTS* ammette che una variazione di temperatura modifica i tempi di rilassamento di un identico fattore di traslazione noto anche con il termine *shift factor*, quindi, tutti i tempi di rilassamento sono ugualmente dipendenti dalla temperatura. Perciò, se si considera un sistema avente i seguenti tempi di rilassamento τ in funzione della temperatura di riferimento $T_{rif} = T_0$:

$$\tau_1(T_0), \tau_2(T_0), \tau_3(T_0), \dots,$$

se si cambiano le condizioni di temperatura da T_0 a T , allora si modificano anche tutti i tempi di rilassamento del sistema:

$$\tau_1(a_T), \tau_2(a_T), \tau_3(a_T), \dots,$$

dove, a_T è il valore del fattore di traslazione orizzontale (*horizontal shift factor*) e risulta essere funzione della temperatura T , assumendo valore unitario per $T = T_{rif} = T_0$. In generale per un tempo di rilassamento i -esimo si ha:

$$\tau_i(T) = a_T \tau_i(T_0).$$

Rappresentando il materiale come tante masse collegate tra di loro con delle molle rigide, si ricava la seguente relazione di variazione del modulo di rigidezza della i -esima molla al variare della temperatura:

$$G_i(T) = G_i(T_0) \frac{T \rho}{T_0 \rho_0} = G_i(T_0) b_T,$$

dove, ρ rappresenta la densità del materiale e b_T è il valore del fattore di traslazione verticale (*vertical shift factor*) indotto proprio dalla densità del materiale. [12, 13]

Il conglomerato bituminoso nelle ipotesi di viscoelasticità lineare è un materiale termoreologicamente semplice ed è possibile trascurare la variazione della sua densità con la temperatura, perciò, non sussistono i fattori di traslazione verticale (*vertical shift factors*). Quindi, la traslazione dei dati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche in regime oscillatorio con forzante sinusoidale avviene con i soli fattori di traslazione

orizzontale (*horizontal shift factors*) ricavabili analiticamente attraverso numerose leggi presenti in letteratura, come l'*equazione empirica di Williams-Landel-Ferry* [19] oppure la *legge di Arrhenius*. [12, 13, 20]

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, ci si avvale dell'*equazione empirica di Williams-Landel-Ferry* (o *equazione di WLF*) [19] relativa al *principio di TTS* e permette di determinare il fattore di traslazione orizzontale (*horizontal shift factor*) a_T mediante la seguente relazione:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{rif})}{C_2 + (T - T_{rif})},$$

dove,

C_1 e C_2 sono due costanti da regolare in funzione al valore dello *shift factor* e dipendono dalla temperatura e dal materiale;

T_{rif} è la temperatura di riferimento.

L'*equazione di WLF* è applicabile solo per temperature T superiori alla *temperatura di transizione vetrosa* T_g , nel caso in esame è sempre verificato. [1, 12, 13, 19]

Nel lavoro sperimentale eseguito, gli *horizontal shift factors* a_T sono relativi alle quattro temperature di prova T (5 °C, 20 °C, 35°C e 50 °C): a_5 , a_{20} , a_{35} e a_{50} .

Considerando il *principio di TTS* e impiegando un modello reologico analitico del materiale è possibile rappresentare graficamente i risultati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche in regime oscillatorio, identificando così il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso; si distinguono le seguenti possibili rappresentazioni grafiche:

- *Curva Maestra* o *Master Curve*;
- *Piano di Black* o *Black Space*;
- *Piano di Cole-Cole* o *Cole-Cole Space*.

Curva Maestra

La *Curva Maestra* o *Master Curve* è una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso o del legante bituminoso mediante una curva ottenuta dall'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura. Questa curva maestra rappresenta per una prefissata temperatura, detta temperatura di riferimento T_{rif} , l'andamento di una grandezza dinamica, modulo

dinamico $|E^*|$ o angolo di fase ϕ , in funzione della frequenza di carico ridotta f_r . La curva maestra si costruisce partendo dalle curve isoterme (Figura 2.30), queste rappresentano i valori dei parametri dinamici misurati, durante l'esecuzione della prova dinamica in regime oscillatorio con forzante sinusoidale su un singolo provino, ad una fissata temperatura di prova indagando le diverse frequenze di carico. Quindi, si procede scegliendo il parametro dinamico da rappresentare in ordinata tra il modulo dinamico $|E^*|$ oppure l'angolo di fase ϕ , poi, si decide la temperatura di riferimento T_{rif} della curva maestra da rappresentare e si prendono le curve isoterme rappresentanti i dati dei risultati di ogni prova dinamica eseguita su un singolo provino alle diverse frequenze di carico e alle diverse temperature di prova e le si sovrappongono tra di loro utilizzando gli *horizontal shift factors* a_T determinati con l'equazione empirica di WLF per ottenere la curva maestra del provino. Si sottolinea che il valore del fattore di traslazione orizzontale è identico sia per il modulo dinamico che per l'angolo di fase. Siccome i risultati sono ottenuti da una prova in regime oscillatorio con forzante sinusoidale si introduce la *frequenza ridotta* f_r , riportata sull'asse delle ascisse delle curve maestre, identificando la traslazione orizzontale dei dati mediante la seguente legge:

$$\begin{aligned}\log(f_r(T_{rif})) &= \log(a_T) + \log(f(T)), \\ f_r(T_{rif}) &= a_T f(T), \\ a_T &= \frac{f_r(T_{rif})}{f(T)},\end{aligned}$$

dove,

a_T è il fattore di traslazione orizzontale alla temperatura T ;

f è la frequenza di carico relativa alla prova dinamica eseguita in funzione della temperatura di prova T ;

f_r è la frequenza di carico ridotta in funzione della temperatura di riferimento della curva maestra T_{rif} .

Inoltre, si possono ottenere anche i *tempi ridotti* t_r mediante la seguente relazione:

$$t_r(T_{rif}) = \frac{t(T)}{a_T},$$

dove,

a_T è il fattore di traslazione orizzontale alla temperatura T ;

t è il tempo di carico relativo alla prova dinamica eseguita in funzione della temperatura di prova T ;

t_r è il tempo di carico ridotto in funzione della temperatura di riferimento della curva maestra T_{rif} . [1, 12, 13, 20]

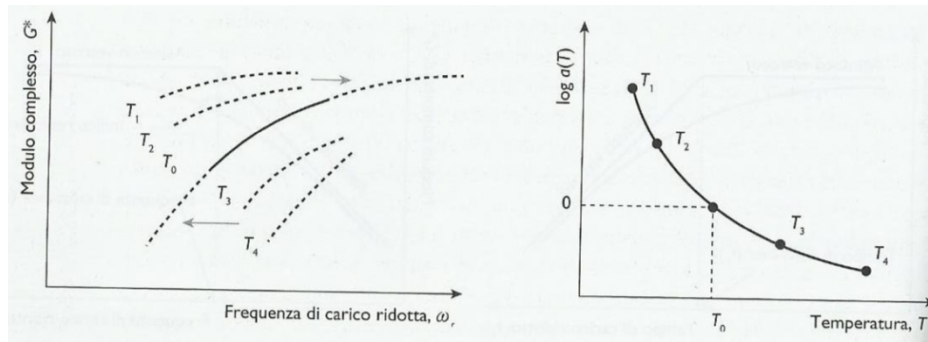


Figura 2.30 - Applicazione del *principio tempo-temperatura*, *shift factors* e costruzione della *curva maestra*. (Fonte: [1], vol. 1, pag. 510)

Applicando così il *principio di TTS* si ottiene una curva unica per ogni provino di conglomerato bituminoso analizzato, detta appunto *curva maestra*, si ha come enorme vantaggio la possibilità di avere una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare di un conglomerato bituminoso ad una prefissata temperatura di riferimento T_{rif} e in un campo di dominio di frequenze di carico molto più ampio rispetto a quello effettivamente indagabile in laboratorio con le prove dinamiche. Le curve maestre, relative sia al modulo dinamico che all'angolo di fase, presentano in prossimità dei loro valori limite due asintoti:

- asintoto vetroso, presente alle frequenze più elevate e alle temperature più basse, in questa situazione limite il modulo dinamico viene identificato come modulo vetroso E_{∞} ; l'angolo di fase tende a zero;
- asintoto viscoso, presente alle basse frequenze e alle temperature più elevate, in questa situazione limite si ottiene la viscosità Newtoniana o stazionaria; l'angolo di fase tende a $\pi/2$. [1, 12, 13, 20]

Modello generale 2S2P1D

Nella fase analitica del lavoro sperimentale affrontato, per regolarizzare e interpolare i risultati sperimentali misurati in ogni singola prova dinamica di modulo complesso eseguita, ci si avvale del *modello generale 2S2P1D* proposto nel 2003 da *Olard F.* e *Di Benedetto H.* [21] a seguito di un vasto lavoro sperimentale riguardante la caratterizzazione del comportamento viscoelastico dei leganti bituminosi e dei conglomerati bituminosi, con lo scopo di ricercare i legami tra le proprietà viscoelastiche dei due materiali indagate nel campo delle piccole deformazioni mediante prove di modulo a differenti temperature e frequenze. Gli autori propongono così un modello reologico unico per la modellazione delle proprietà viscoelastiche lineari dei leganti bituminosi e delle miscele di conglomerato bituminoso. Inoltre, considerando il materiale termoreologicamente semplice, questo modello permette di ricavare il comportamento viscoelastico lineare su un vasto intervallo di frequenze anche se si possiedono pochi dati iniziali. Il *modello 2S2P1D* prende il proprio nome dall'acronimo dei termini inglesi degli elementi meccanici principali che lo costituiscono (Figura 2.31):

- *2S* corrisponde a 2 *springs*, cioè 2 molle ($E_{\infty}-E_0$ e E_0);
- *2P* corrisponde a 2 *parabolic elements*, cioè 2 elementi parabolici (k e h);
- *1D* corrisponde a 1 *dashpot*, cioè 1 smorzatore viscoso lineare (β).

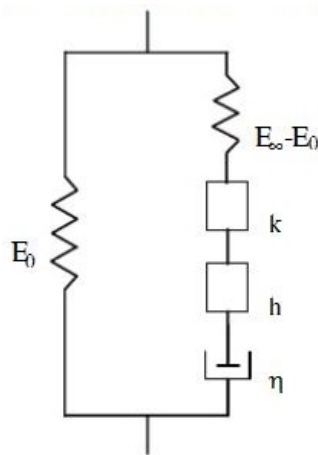


Figura 2.31 - Schema del modello 2S2P1D. (Fonte: [21])

Questo modello, ad una prefissata temperatura e introducendo 7 parametri ($E_0, E_\infty, \delta, k, h, \beta, \tau$), permette di determinare il modulo complesso E^* mediante la seguente relazione:

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}},$$

dove,

i è l'unità immaginaria del numero complesso, $i^2 = -1$;

ω è la frequenza angolare, $\omega = 2\pi f$, f è la frequenza di carico;

E_0 è il modulo statico relativo a $\omega \rightarrow 0$;

E_∞ è il modulo vetroso relativo a $\omega \rightarrow \infty$;

δ è un parametro adimensionale di forma;

k, h sono i parametri degli elementi parabolici, $0 < k < h < 1$;

β è un parametro adimensionale della viscosità Newtoniana η del dashpot;

τ è il valore del tempo caratteristico che varia solo in funzione della temperatura.

Secondo il *TTSP* si nota che solo il parametro τ dipende dalla temperatura T e si definisce:

$$\tau(T) = a_T(T) \tau(T_{rif}) = a_T(T) \tau_0,$$

dove,

a_T è il fattore di traslazione orizzontale alla temperatura T ricavato con l'equazione empirica di *WLF* [19];

τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento $T_{rif} = T_0 = 20$ °C.

Quindi, il *modello 2S2PID* permette di rappresentare il comportamento viscoelastico lineare del materiale con un modello meccanico fisico mediante la determinazione dei suoi parametri, ottenibile sperimentalmente. In Figura 2.32 si osserva il legame tra alcuni parametri del *modello 2S2PID* con la curva rappresentata nel piano identificato con le componenti del modulo complesso E^* , detto *piano di Cole-Cole*, analizzato successivamente; nel dettaglio, si nota che i parametri k e h sono in funzione degli angoli che si rilevano dall'intersezione della retta tangente alla curva con l'asse delle ascisse che corrisponde alla componente reale del modulo complesso, il parametro δ definisce l'altezza massima di picco della curva, mentre il modulo statico E_0 e il modulo vetroso E_∞ definiscono l'intersezione con l'asse con l'angolo di fase $\phi = 0$ [23].

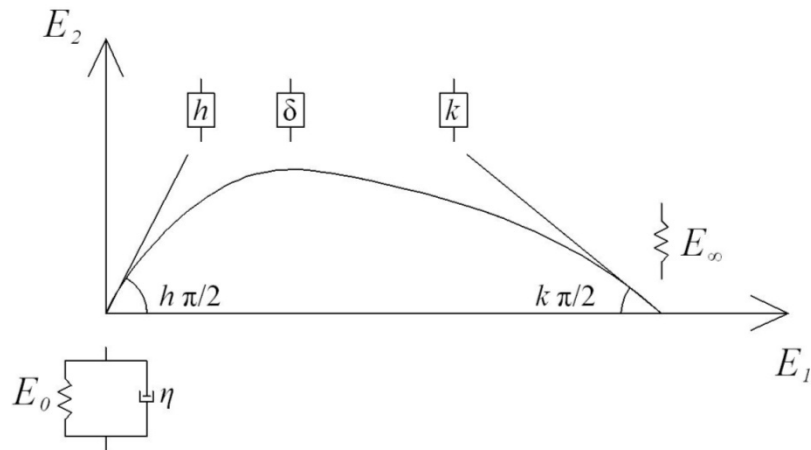


Figura 2.32 - Legame tra i parametri del *modello 2S2PID* e la curva nel piano di Cole-Cole. (Fonte: creazione personale, rivisitazione da: [21, 22])

Nel lavoro sperimentale svolto, per i due provini rappresentativi della stessa miscela di progetto si assumono valori identici dei parametri k , h , δ , $\log(\beta)$ e $\log(\tau_0)$, poiché, i provini di una stessa miscela risultano molto simili tra di loro essendo costituiti dallo stesso legante bituminoso [24].

Nel lavoro sperimentale, i parametri del *modello 2S2PID* si ottengono effettuando la sovrapposizione dei valori sperimentali misurati mediante la prova dinamica al modello analitico, eseguita cercando di minimizzare, per ogni temperatura di prova e frequenza indagata, lo scarto di errore dato dalla somma degli errori ottenuti con la seguente relazione, relativi ad ogni frequenza e temperatura di prova:

$$Errore = \left(\frac{|E^*|_c - |E^*|_m}{|E^*|_c} \right)^2 + \left(\frac{\phi_c - \phi_m}{\phi_c} \right)^2,$$

dove,

$|E^*|_c$ è il modulo dinamico ottenuto da calcolo usando il modello;

$|E^*|_m$ è il modulo dinamico ottenuto da misurazioni mediante la prova dinamica;

ϕ_c è l'angolo di fase ottenuto da calcolo usando il modello;

ϕ_m è l'angolo di fase ottenuto da misurazioni mediante la prova dinamica.

[12, 13, 19, 21, 22, 23, 24]

Parametro di Glover-Rowe

Generalmente, il *parametro di Glover-Rowe* viene impiegato per la caratterizzazione reologica del legante bituminoso, si determina misurando i valori del modulo dinamico e dell'angolo di fase del bitume alla temperatura di prova di 15 °C e alla frequenza angolare di 0,005 rad/s, per poi individuare se la pavimentazione con esso realizzata è soggetta in futuro alle fessurazioni, questo si osserva mediante la rappresentazione grafica nel *piano di Black* individuando una curva limite di danneggiamento superando la curva relativa a 180 kPa. [25]

Lo studio di *Ogbo et al.* [26] propone di impiegare il *parametro di Glover-Rowe* per individuare la resistenza alle fessurazioni per una miscela di conglomerato bituminoso, anziché, per il bitume, modificando la relazione iniziale non ritenendo idonei i valori di temperatura e frequenza delle misurazioni. Infatti, le curve maestre dell'angolo di fase di una miscela alle basse frequenze e alte temperature sono diverse rispetto alle relative curve maestre di un bitume, poiché, in una miscela è presente lo scheletro solido.

Nel lavoro sperimentale eseguito, a supporto del *modello 2S2PID*, si utilizza il *parametro di Glover-Rowe* determinato con la seguente relazione:

$$G - R = |E^*| \frac{(\cos \phi)^2}{\sin \phi},$$

dove,

$|E^*|$ è il modulo dinamico;

ϕ è l'angolo di fase.

Nel lavoro sperimentale, per calcolare il *parametro di G-R*, entrambi i parametri dinamici $|E^*|$ e ϕ , sono relativi ai valori dei risultati della prova dinamica di modulo complesso misurati alla temperatura di prova di 20 °C e alla frequenza di carico di 5 Hz.

Piano di Black

Il *Piano di Black* o *Black Space* è una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso. In questo piano si riporta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ al variare dell'angolo di fase ϕ .

Mediante il *piano di Black* è possibile valutare se il materiale è termoreologicamente semplice, quindi, se è applicabile il *principio di sovrapposizione tempo-temperatura*.

Inoltre, viene anche impiegato per determinare una prima stima del modulo vetroso E_∞ da inserire nel *modello analitico 2S2PID* prima della procedura numerica di minimizzazione degli errori.

Piano di Cole-Cole

Il *Piano di Cole-Cole* o *Cole-Cole Space* è una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso. Il piano è descritto dalle componenti del modulo complesso E^* . L'asse delle ascisse riporta la componente elastica E_1 (modulo di restituzione elastica) che identifica il lavoro reversibile, mentre l'asse delle ordinate rappresenta la componente viscosa E_2 (modulo di dissipazione viscosa) a cui è associato il lavoro irreversibile. Infatti, come già affermato, il valore delle due componenti varia al variare del modulo complesso e dell'angolo di fase, che a loro volta variano con la frequenza di carico e con la temperatura di prova considerate; variando così la risposta alle sollecitazioni e il comportamento del materiale.

Mediante il *piano di Cole-Cole* è possibile valutare se il materiale è termoreologicamente semplice, quindi, se è applicabile il *principio di sovrapposizione tempo-temperatura*. Inoltre, viene anche impiegato per determinare una prima stima del modulo statico E_0 da inserire nel *modello analitico 2S2PID* prima della procedura numerica di minimizzazione degli errori.

2.3.6 Determinazione delle proprietà volumetriche

La presenza di aria all'interno del conglomerato bituminoso viene identificata tramite la percentuale di vuoti residui sul volume; incide notevolmente sulle proprietà e sulle caratteristiche finali del materiale e della pavimentazione stradale, compresa la durata della vita utile. Perciò, la conoscenza delle proprietà volumetriche di un conglomerato bituminoso rappresenta un requisito fondamentale dello studio e si determinano mediante delle precise procedure standardizzate riportate nelle norme tecniche. [27]

Come già accennato, i conglomerati bituminosi assumono una classificazione anche in base alla loro percentuale dei vuoti residui:

- conglomerati bituminosi *chiusi* se la % vuoti residui è ≤ 5 ;
- conglomerati bituminosi *semi-chiusi* se la % vuoti residui è $5 \div 10$;
- conglomerati bituminosi *semi-aperti* se la % vuoti residui è $10 \div 15$;

- conglomerati bituminosi *aperti* se la % vuoti residui è > 15. [28]

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si ottengono le proprietà volumetriche di tutti i provini relativi alle miscele di conglomerato bituminoso confezionato a caldo di progetto per valutare il corretto raggiungimento del contenuto dei vuoti finale al valore di progetto del 6% per le miscele e di circa il 4% nel nucleo dei provini compattati, a sua volta conforme ai requisiti tecnici di Capitolato Anas [5] per lo strato di binder di una pavimentazione stradale flessibile. Nello specifico, per completezza, si riportano i protocolli di prova eseguiti in laboratorio per determinare: la massa volumica massima, la massa volumica apparente mediante provino sigillato, la massa volumica apparente geometrica e il volume dei vuoti. Si sottolinea che le prove sono eseguite sui provini ridimensionati, ma privi della resina di livellamento sulle basi.

Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)

La norma europea *UNI EN 12697-5:2019* prescrive i metodi di prova per determinare la massa volumica massima di una miscela di conglomerato bituminoso, sia fresca che invecchiata. Tale norma identifica diversi procedimenti di calcolo: un procedimento volumetrico, un procedimento idrostatico e un procedimento matematico.

La massa volumica massima di una miscela di conglomerato bituminoso rappresenta la sua massa per unità di volume priva dei vuoti di aria ad una prefissata temperatura.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si esegue in laboratorio il protocollo di prova dettato dalla norma europea *UNI EN 12697-5:2019* relativo al *procedimento C* detto *procedimento matematico* per determinare la massa volumica massima di tutte le miscele di conglomerato bituminoso di progetto:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)},$$

dove,

ρ_m è la massa volumica massima della miscela espressa in g/cm³;

p_a è la percentuale di aggregati nella miscela espressa in m/m;

ρ_a è la massa volumica apparente degli aggregati espressa in g/cm³;

p_b è la percentuale di legante nella miscela espressa in m/m;

ρ_b è la massa volumica del legante a 25 °C espressa in g/cm³.

Determinazione della massa volumica apparente (UNI EN 12697-6)

La norma europea *UNI EN 12697-6:2020* prescrive i metodi di prova per determinare la massa volumica in mucchio di provini di conglomerato bituminoso compattati in laboratorio oppure ottenuti da carote prelevate da una pavimentazione stradale esistente. Tale norma identifica diversi procedimenti di calcolo.

La massa volumica apparente di un provino di conglomerato bituminoso compattato è la massa per unità di volume considerando i vuoti di aria ad una prefissata temperatura di prova.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si eseguono in laboratorio due protocolli di prova dettati dalla norma europea *UNI EN 12697-6:2020* relativo alla determinazione della massa volumica apparente: il *procedimento C* detto *procedimento con provino sigillato* e il *procedimento D* detto *procedimento geometrico*.

La prova eseguita con il *procedimento C* detto *procedimento con provino sigillato* si svolge in laboratorio su tutti i provini compattati, ridimensionati e privi di resina sulle basi mediante le seguenti fasi operative in ordine cronologico (Figura 2.33):

- si identifica il peso di ogni provino mediante una bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo;
- si procede a sigillare ogni provino impiegando la paraffina. Questa a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, per impiegarla bisogna portarla al suo stato liquido con l'ausilio di una piastra riscaldante da laboratorio sotto cappa di aspirazione. In seguito, si riveste totalmente con la paraffina liquida la superficie di ogni provino, riempiendo i fori superficiali presenti;
- si identifica il peso di ogni provino rivestito con la paraffina mediante la bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo impiegata prima;
- si identifica la temperatura dell'acqua che viene impiegata per la successiva pesata idrostatica mediante un termometro da laboratorio digitale con sonda fissa a penetrazione in acciaio inossidabile; poiché, la massa volumica dell'acqua varia in funzione della propria temperatura;
- si identifica il peso in acqua di ogni provino rivestito con la resina alloggiandolo su un cestello interno ad un bidone pieno di acqua e collegato alla bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo impiegata prima. Per una

corretta pesata idrostatica, il provino deve essere completamente sommerso e la lettura si effettua a stabilizzazione avvenuta dell'acqua.



Figura 2.33 - Illustrazione delle fasi eseguite in ordine cronologico, nel lavoro sperimentale trattato, per determinare le caratteristiche volumetriche con il *procedimento C* detto *procedimento con provino sigillato*.

Eseguita la procedura sopraccitata per ogni provino, si determina la massa volumica apparente mediante la seguente relazione:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)},$$

dove,

ρ_{bsea} è la massa volumica apparente del provino sigillato espressa in g/cm³;

m_1 è la massa del provino asciutto in aria espressa in g;

m_2 è la massa del provino sigillato asciutto in aria espressa in g;

m_3 è la massa del provino sigillato in acqua espressa in g;

ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova espressa in g/cm³;

ρ_{sm} è la massa volumica del materiale sigillante espressa in g/cm³.

La prova eseguita con il *procedimento D* detto *procedimento geometrico* si svolge in laboratorio e permette di determinare la massa volumica apparente di ogni provino cilindrico di conglomerato bituminoso confezionato a caldo e compattato con pressa a taglio giratoria mediante la seguente relazione:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} \cdot 10^6,$$

dove,

ρ_b è la massa volumica apparente del provino espressa in g/cm³;

m_1 è la massa del provino asciutto in aria espressa in g;

h è l'altezza del provino espressa in cm;

d è il diametro del provino espressa in cm.

Nel lavoro sperimentale, i valori della massa, del diametro e dell'altezza di ogni provino sono ottenuti con la procedura esposta nel paragrafo 2.3.3 Fase III.

Determinazione del contenuto dei vuoti (UNI EN 12697-8)

La norma europea *UNI EN 12697-8:2019* prescrive una procedura per il calcolo delle caratteristiche volumetriche di provini compattati di conglomerato bituminoso; queste caratteristiche sono: il contenuto di vuoti d'aria e il contenuto di vuoti nell'aggregato minerale riempiti di legante.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si esegue in laboratorio il protocollo di prova dettato dalla norma europea *UNI EN 12697-8:2019* relativo alla determinazione del contenuto dei vuoti residui di provini compattati:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 ,$$

dove,

V_m è il volume o contenuto dei vuoti residui espresso in percentuale;

ρ_m è la massa volumica massima della miscela espressa in g/cm³;

ρ_b è la massa volumica apparente totale della miscela espressa in g/cm³.

La massa volumica apparente è calcolata con due procedimenti (*C*, *D*) ottenendo così due valori di contenuto dei vuoti residui per ogni provino compattato rappresentativo delle miscele di progetto. Si ritiene che i valori del volume dei vuoti determinati con il *procedimento C (procedimento con provino sigillato)* siano più rappresentativi delle reali caratteristiche volumetriche dei provini rispetto a quelli ottenuti dal *procedimento D (procedimento geometrico)*; i relativi risultati vengono riportati nel paragrafo 3.1.

2.4 Specifiche di Capitolato

In questo paragrafo si riportano le specifiche tecniche di *Capitolato Speciale di Appalto - Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 - Pavimentazioni stradali di Anas S.p.A.* [5] relative allo strato di binder, detto anche di collegamento, di una pavimentazione stradale di tipo flessibile, considerate nel lavoro sperimentale effettuato. Un conglomerato bituminoso per essere conforme alle norme di Capitolato Anas deve superare tutte le verifiche e le prove di controllo sulla qualità e sulle caratteristiche dei materiali costituenti, delle miscele confezionate e delle modalità esecutive della pavimentazione stradale in cantiere. Questi controlli sul conglomerato bituminoso si dividono cronologicamente in: preliminari, in corso d'opera e a fine lavori. [2]

Il Capitolato Anas [5] impone dei vincoli sul mix design della miscela, identificando l'assortimento granulometrico degli aggregati lapidei, il quantitativo massimo di materiale fresato impiegabile, il dosaggio e il tipo di bitume e le caratteristiche volumetriche della miscela da soddisfare. Le caratteristiche volumetriche di una miscela sono rappresentate dalla percentuale dei vuoti residui e dalle modalità di stesa e compattazione del conglomerato bituminoso in cantiere. [2]

Il Capitolato Anas [5] prevede per lo strato di binder l'impiego di un conglomerato bituminoso confezionato a caldo per tutte le tipologie di lavorazione, Manutenzione Ordinaria, Manutenzione Straordinaria e Nuove Costruzioni. Il conglomerato bituminoso è composto da una miscela di inerti di primo impiego e bitume semisolido impastata a caldo in impianti di tipo fisso automatizzati. I materiali costituenti la miscela devono possedere la marcatura CE e soddisfare i seguenti requisiti dettati dalle norme tecniche di Capitolato Anas per lo strato di binder. [5]

2.4.1 Bitumi e additivi

Si possono impiegare bitumi di base oppure bitumi modificati SF e HD.

Si possono impiegare attivanti chimici funzionali (ACF) e attivanti di adesione (DP). [5]

2.4.2 Materiali inerti

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per i materiali inerti sono:

Gli inerti dovranno essere costituiti da elementi sani, duri, di forma poliedrica, puliti e privi di polvere e da materiali estranei secondo le norme UNI EN 13043; gli elementi litoidi non dovranno mai avere forma appiattita, allungata o lenticolare.

La miscela degli inerti è costituita dall'insieme degli aggregati grossi e dagli aggregati fini ed eventuali additivi (filler) secondo la definizione delle norme UNI EN 13108-1. [...] [5]

2.4.3 Aggregati grossi

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per gli aggregati grossi sono:

AGGREGATO GROSSO (PEZZATURE DA 4 A 31,5 MM)

L'aggregato grosso sarà costituito da frantumati, ghiaie, ghiaie frantumate, pietrischetti e graniglie che potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa, purché alle prove di seguito elencate eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare risponda ai seguenti requisiti: [...]

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

Per questo strato dovranno essere impiegati esclusivamente inerti frantumati (privi di facce tonde), con una perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (secondo la Norma UNI EN 1097-2) inferiore o uguale al 25%.

Il coefficiente di appiattimento, determinato in accordo con la UNI EN 933-3, deve essere inferiore o uguale a 15. [...] [5]

2.4.4 Aggregati fini

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per gli aggregati fini sono:

AGGREGATO FINO (PEZZATURE INFERIORI A 4 MM)

L'aggregato fino di tutte le miscele sarà costituito esclusivamente da sabbie di frantumazione.

L'equivalente in sabbia determinato secondo la UNI EN 933-8 dovrà essere superiore od uguale a 75, nel caso di impiego in strati di usura, ovvero superiore o uguale a 60 negli altri casi. [5]

2.4.5 Additivi (filler)

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per gli additivi (filler) sono:

Gli additivi (filler) provenienti dalla macinazione di rocce preferibilmente calcaree o costituiti da cemento, calce idrata, calce idraulica, dovranno soddisfare ai seguenti requisiti:

- alla prova UNI EN 933-10 dovranno risultare compresi nei seguenti limiti minimi:

setaccio UNI 2 mm	passante in peso 100%
setaccio UNI n. 0,125	passante in peso 85 - 100%
setaccio UNI n. 0,063	passante in peso 70 - 100%
- indice di plasticità (UNI CEN ISO/TS 17892-12): NP
- palla e anello (filler/bitume=1.5) (UNI EN 13179-1): $\Delta_{R\&B} > 5\%$. [5]

2.4.6 Miscele

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per le miscele sono:

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

BINDER CON BITUME MODIFICATO E TAL QUALE

D.01.017 “conglomerato bituminoso per strato di collegamento (binder)”

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %
setaccio 20	100
setaccio 16	90-100
setaccio 12,5	66-86
setaccio 8	52-72
setaccio 4	34-54
setaccio 2	25-40
setaccio 0,5	10-22
setaccio 0,25	6-16
setaccio 0,063	4-8

Bitume, riferito alla miscela, 4,1%-5,5% (UNI EN 12697-1 e 39) e spessori compresi tra 4 e 8 cm. [...] [5]

2.4.7 Requisiti di accettazione

Le specifiche tecniche di Capitolato Anas [5] per i requisiti di accettazione sono:

[...] Le miscele devono avere massime caratteristiche di resistenza a fatica, all'ormaiamento, ai fattori climatici e in generale ad azioni esterne.

Le miscele devono essere verificate mediante pressa giratoria con i seguenti parametri di prova:

Pressione verticale (kPa)	600 ± 3
Angolo di rotazione (°)	1,25 ± 0,02
Velocità di rotazione (giri/min)	30
Diametro provino (mm)	100

[...]

STRATO DI COLLEGAMENTO (BINDER)

Elevata resistenza meccanica cioè capacità di sopportare senza deformazioni permanenti le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli. I provini dovranno essere compattati mediante giratoria ad un numero di giri totali (N3) dipendente dalla tipologia della miscela e dalla tipologia del legante.

La verifica della % dei vuoti dovrà essere fatta a tre livelli di n° giri: N1 (iniziale), N2 (medio) e N3 (finale); il numero dei giri di riferimento con le relative percentuali dei vuoti sono:

n° giri	Bitume TQ	% vuoti Vm UNI EN 12697-8
N1	10	11-15
N2	100	3-6
N3	180	≥ 2

[...]

CONGLOMERATO BITUMINOSO RICICLATO (FRESATO) - MODALITÀ DI REIMPIEGO

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

[...] Per gli strati di [...] binder si possono usare fresati di qualsiasi provenienza [...]

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

L'impiego dei fresati comporta l'impiego di rigeneranti (0,2 – 0,5% in peso sul bitume totale) per il vecchio bitume; [...]

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

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

BINDER	% di impiego di fresato		
	TQ	SF	HD
Tipologia bitume			
% di fresato	≤ 15	≤ 25	≤ 20
% di ACF sul bitume	0,2 0,4	0,2 0,4	0,2 0,4

[...]. [5]

CAPITOLO 3

Risultati sperimentali

Nel seguente capitolo si illustra la seconda parte, prevalentemente analitica, del lavoro sperimentale trattato in questa tesi. Si analizzano i risultati sperimentali ottenuti dalle singole prove dinamiche di modulo complesso eseguite su tutti i provini delle miscele di conglomerato bituminoso di progetto confezionato a caldo, due provini per ogni miscela. Grazie all'applicazione del *principio di sovrapposizione tempo-temperatura*, si considera il conglomerato bituminoso come un materiale termoreologicamente semplice e si rappresenta graficamente il comportamento viscoelastico lineare di ogni provino, quindi, di ogni miscela, mediante il *piano di Black*, il *piano di Cole-Cole* e le *curve maestre* del modulo dinamico e dell'angolo di fase al variare della frequenza relativa; queste permettono di rappresentare il comportamento reologico del materiale in un campo di frequenze molto più ampio di quello operativamente indagabile in laboratorio con la prova dinamica. Nel lavoro sperimentale svolto, le analisi analitiche si eseguono prevalentemente con l'ausilio di software di calcolo e fogli elettronici, considerando:

- con la prova dinamica di modulo complesso si misurano per ogni provino, ad ogni temperatura di prova (5, 20, 35 e 50 °C), i parametri dinamici (modulo dinamico $|E^*|$ e angolo di fase ϕ) al variare delle otto frequenze di carico indagate (20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz). Perciò, per ogni provino si hanno quattro curve isoterme relative all'andamento del modulo dinamico al variare della frequenza e altre quattro per l'angolo di fase al variare della frequenza;
- validità del *principio di TTS e materiale termoreologicamente semplice*;
- *horizontal shift factors* a_T determinati con l'*equazione empirica di WLF* [19];
- utilizzo del *modello 2S2PID* [21] per regolarizzare e interpolare i dati sperimentali misurati in un'unica curva rappresentativa;
- utilizzo del *parametro di Glover-Rowe* in supporto al modello;
- definizione di 9 parametri per rappresentare il comportamento reologico del materiale (2 costanti dell'*equazione di WLF* e 7 parametri del *modello 2S2PID*);
- si ricerca la massima minimizzazione possibile dello scarto di errore tra i parametri dinamici misurati e quelli calcolati con il modello;

- temperatura di riferimento delle curve $T_{rif} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Di seguito, si riportano le curve rappresentative del comportamento viscoelastico lineare di ogni miscela nel *piano di Black*, nel *piano di Cole-Cole* e le *curve maestre* del modulo dinamico $|E^*|$ e dell'angolo di fase ϕ . Nello specifico, in ogni piano (*di Black*, *di Cole-Cole* e delle *curve maestre*), si confronta e si valuta l'andamento delle curve delle miscele riportate in un unico grafico prima a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata e del tipo di bitume vergine impiegato; poi, a parità di miscela di progetto al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata e del tipo di bitume vergine impiegato. Infine, si analizzano i parametri del *modello analitico 2S2PID* e il *parametro di Glover-Rowe*.

Dai risultati sperimentali delle prove dinamiche eseguite sui provini delle miscele di progetto, generalmente, si nota che:

- il modulo dinamico assume valori variabili tra 50 MPa ÷ 25000 MPa per le miscele con bitume Primario e tra 150 MPa ÷ 25500 MPa per le miscele con bitume Visbreaking. Quanto appena detto risulta valido per entrambe le temperature di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C);
- l'angolo di fase assume valori variabili tra 4° ÷ 48° per le miscele con bitume Primario e tra 4° ÷ 35° per le miscele con bitume Visbreaking;
- per ogni provino, si misura il valore massimo del modulo dinamico alla frequenza di carico di 20 Hz relativo alla temperatura di prova di 5 °C, presentando valori ben confrontabili tra di loro che oscillano tra 18300 MPa per 00RAP_S_170_2 e 25500 MPa per 50RAP_V_170_1;
- alle temperature di prova più elevate (35 e 50 °C) si osservano differenze di valori del modulo dinamico e dell'angolo di fase;
- la presenza di RAP provoca un aumento del modulo dinamico alle temperature di prova più elevate e una diminuzione dell'angolo di fase a tutte le temperature di prova eseguite. Quanto appena detto risulta più marcato con la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione più elevata (170 °C) e con il bitume Primario.

3.1 Volume dei vuoti determinato con il procedimento C, con provino sigillato (UNI EN 12697-6 e UNI EN 12697-8)

Si riportano in Tabella 3.1 i valori del volume dei vuoti $V_{m,sea}$ espressi in percentuale determinati con il *procedimento C (procedimento con provino sigillato)* relativi ad ogni provino di conglomerato bituminoso delle miscele di progetto (compattato, ridimensionato e privo della resina alle basi), secondo le normative europee *UNI EN 12697-6:2020* e *UNI EN 12697-8:2019*.

Tabella 3.1 - Volume dei vuoti $V_{m,sea}$ [%] (determinato con il *procedimento C, con provino sigillato*) relativo ad ogni provino compattato e ridimensionato delle miscele di progetto confezionate con bitume vergine di tipo Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V).

MISCELA	N. PROVINO	$V_{m,sea}$ [%]	
		S	V
00RAP_140	1	3,3	2,9
	2	3,3	3,3
00RAP_170	1	3,3	3,2
	2	3,9	3,1
50RAP_140	1	3,5	2,7
	2	4,1	3,9
50RAP_170	1	4,3	2,6
	2	2,7	3,2
50RAP_140_B	1	3,7	2,8
	2	3,3	3,1
50RAP_170_B	1	3,6	3,2
	2	3,3	3,0
50RAP_140_A	1	2,9	3,0
	2	3,2	3,6
50RAP_170_A	1	3,4	3,4
	2	2,6	2,9

3.2 Rappresentazione nel piano di Black e nel piano di Cole-Cole a parità di temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine

Si rappresenta graficamente il comportamento viscoelastico lineare di tutte le miscele di progetto mediante le relative curve nel piano di *piano di Black* ($|E^*|-\phi$) (Figura 3.1) che rappresenta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ espresso in MPa al variare dell'angolo di fase ϕ espresso in gradi angolari e nel *piano di Cole-Cole* (E_2-E_1) (Figura 3.2) relativo all'andamento delle componenti del modulo complesso E^* (modulo di restituzione elastica E_1 e modulo di dissipazione viscosa E_2) espresse in MPa. In questo paragrafo, per entrambi i piani, si confronta in un unico grafico l'andamento delle curve delle miscele aventi la stessa temperatura di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C) e lo stesso tipo di bitume vergine impiegato (S e V).

Dalla rappresentazione grafica nei due piani, si osserva che i valori di ogni miscela assumono andamenti abbastanza variabili tra di loro, formando una curva pressoché localizzata, ad eccezione di alcune piccole zone di dispersione di valori, rilevate soprattutto nelle miscele tradizionali senza RAP. Si ipotizza che questa dispersione sia dovuta dal macchinario di prova *UTM-30*, che essendo universale, possiede una potenza del motore troppo elevata per testare correttamente le miscele tradizionali senza RAP aventi valori di modulo dinamico bassi e angoli di fase alti; infatti, la dispersione aumenta alle temperature di prova più elevate. Quindi, escludendo questa ristretta dispersione di valori, si conferma il comportamento tipico di un materiale termoreologicamente semplice e l'applicazione del *principio di sovrapposizione tempo-temperatura*.

Inoltre, entrambe le rappresentazioni grafiche, *piano di Black* e *piano di Cole-Cole*, sono indispensabili per stimare un primo valore degli asintoti statici e vetrosi di ogni provino necessari a definire analiticamente il *modello 2S2PID* e introdotti prima della ricerca di minimizzazione dell'errore. Nel dettaglio:

- il *modulo statico* E_0 viene stimato nel *piano Cole-Cole* estendendo le relative curve fino ad intersecare l'asse delle ascisse. I valori del modulo statico di ogni provino variano tra di loro in funzione delle differenze delle miscele di progetto: presenza di RAP, temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata, tipo di bitume vergine impiegato e presenza e differenza dell'additivo rigenerante di bitume. Il valore del modulo statico assume il valore minimo di

35 MPa nella miscela senza RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario e il valore massimo di 195 MPa nella miscela con RAP confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking;

- il *modulo vetroso* E_{∞} viene stimato nel *piano di Black* estendendo le relative curve fino ad intersecare l'asse delle ordinate. I valori del modulo vetroso di ogni provino sono molto simili tra di loro, variano nell'intervallo 42 ÷ 48 GPa.

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle curve relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.1 nel *piano di Black* ($|E^*|-\phi$), si osserva che:

- le miscele contenenti RAP, rispetto alle tradizionali senza RAP, presentano un aumento del modulo dinamico e una diminuzione dell'angolo di fase; le miscele contenenti gli additivi rigeneranti di bitume assumono un comportamento intermedio, ma sempre più vicino a quello della miscela con RAP;
- il modulo dinamico assume per tutti i provini valori sempre più differenti all'aumentare sia dell'angolo di fase che della temperatura di prova, soprattutto a 50 °C;
- alla frequenza di carico di 0,1 Hz e alla temperatura di prova di 5 °C, il modulo dinamico assume un valore molto simile per tutti i provini;
- l'impiego di bitume Primario e l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione per entrambi i tipi di bitume evidenziano il differente comportamento reologico delle miscele con e senza RAP, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale. Questo distanziamento è molto evidente nelle miscele confezionate a 170 °C con bitume Primario, dove si nota un distacco anche delle miscele con gli additivi rigeneranti di bitume;
- la miscela tradizionale senza RAP con bitume Primario presenta i valori più elevati dell'angolo di fase.

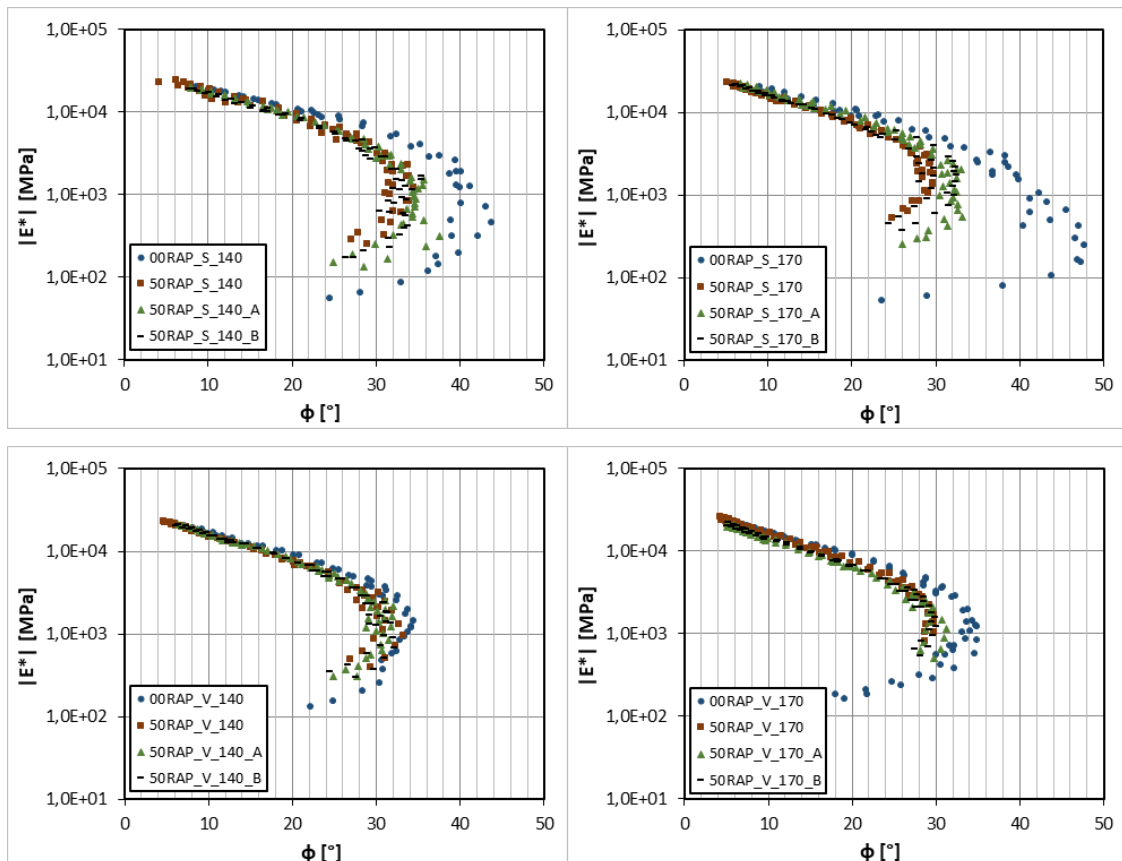


Figura 3.1 - Rappresentazione grafica nel *piano di Black* ($|E^*|$ - ϕ) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle curve relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.2 nel *piano di Cole-Cole* (E_2 - E_1), si osserva che:

- a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione e di bitume impiegato, le miscele senza RAP sono graficamente posizionate più in alto e hanno i valori più elevati della componente viscosa del modulo complesso;
- le miscele confezionate a 140 °C con bitume Visbreaking manifestano un andamento simile tra di loro;
- le miscele confezionate con bitume Primario contenenti l'additivo A, rispetto alle analoghe contenenti l'additivo B, risultano possedere valori leggermente superiori della componente viscosa del modulo complesso;
- aumentando la componente elastica del modulo complesso aumenta il distanziamento tra i valori delle miscele, presentando anche una leggera dispersione di valori;

- l'impiego di bitume Primario e l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione per entrambi i tipi di bitume evidenziano il differente comportamento reologico di tutte le miscele, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale e la dispersione dei valori delle componenti del modulo complesso.

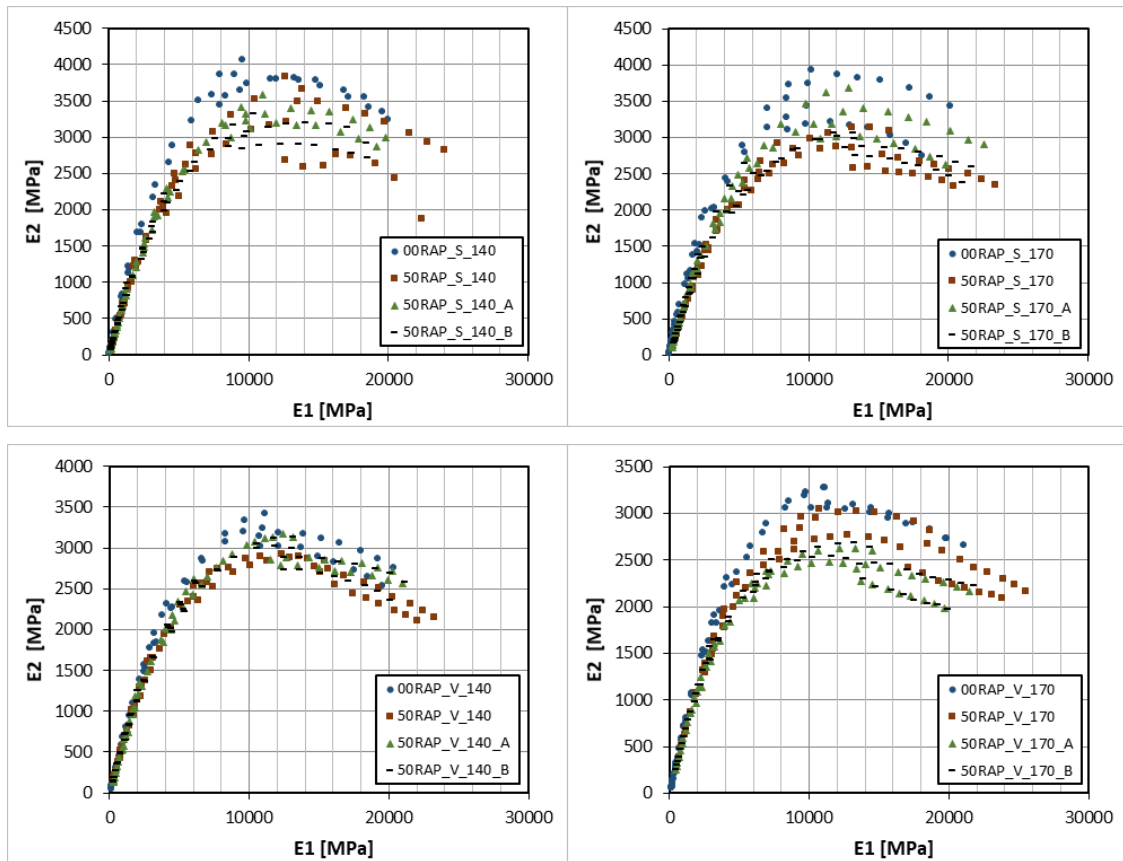


Figura 3.2 - Rappresentazione grafica nel piano di Cole-Cole (E_2 - E_1) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).

3.3 Rappresentazione nel piano di Black e nel piano di Cole-Cole al variare della temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine

Si rappresenta graficamente il comportamento viscoelastico lineare di tutte le miscele di progetto mediante le relative curve nel piano di *piano di Black* ($|E^*|-\phi$) (Figura 3.3) che rappresenta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ espresso in MPa al variare dell'angolo di fase ϕ espresso in gradi angolari e nel *piano di Cole-Cole* (E_2-E_1) (Figura 3.4) relativo all'andamento delle componenti del modulo complesso E^* (modulo di restituzione elastica E_1 e modulo di dissipazione viscosa E_2) espresse in MPa. In questo paragrafo, per entrambi i piani, si confronta in un unico grafico l'andamento delle curve delle miscele aventi lo stesso quantitativo di RAP (00RAP e 50RAP) e quelle aventi la stessa tipologia di additivo rigenerante di bitume (A e B) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S e V).

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle curve relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.3 nel *piano di Black* ($|E^*|-\phi$), si osserva che:

- a parità di miscela, le miscele confezionate a 140 °C con bitume Primario graficamente sono spostate verso destra e hanno i valori più elevati dell'angolo di fase, mentre le miscele confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking sono sul margine sinistro con i valori dell'angolo di fase minori;
- le miscele 00RAP confezionate con lo stesso tipo di bitume a temperature differenti risultano graficamente molto simili tra di loro, quasi sovrapposte. Perciò, il comportamento reologico delle miscele tradizionali è influenzato molto dal tipo di bitume impiegato e poco dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione;
- le miscele 50RAP sono influenzate sia dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione che dal tipo di bitume impiegato; aumentando la temperatura diminuisce il valore dell'angolo di fase e le miscele confezionate a 170 °C con bitumi differenti risultano graficamente molto simili, quasi sovrapposte;
- le miscele con gli additivi rigeneranti di bitume presentano un andamento abbastanza simile, l'additivo A presenta valori leggermente superiori dell'angolo di fase ed è più influenzato dal tipo di bitume, viceversa per l'additivo B.

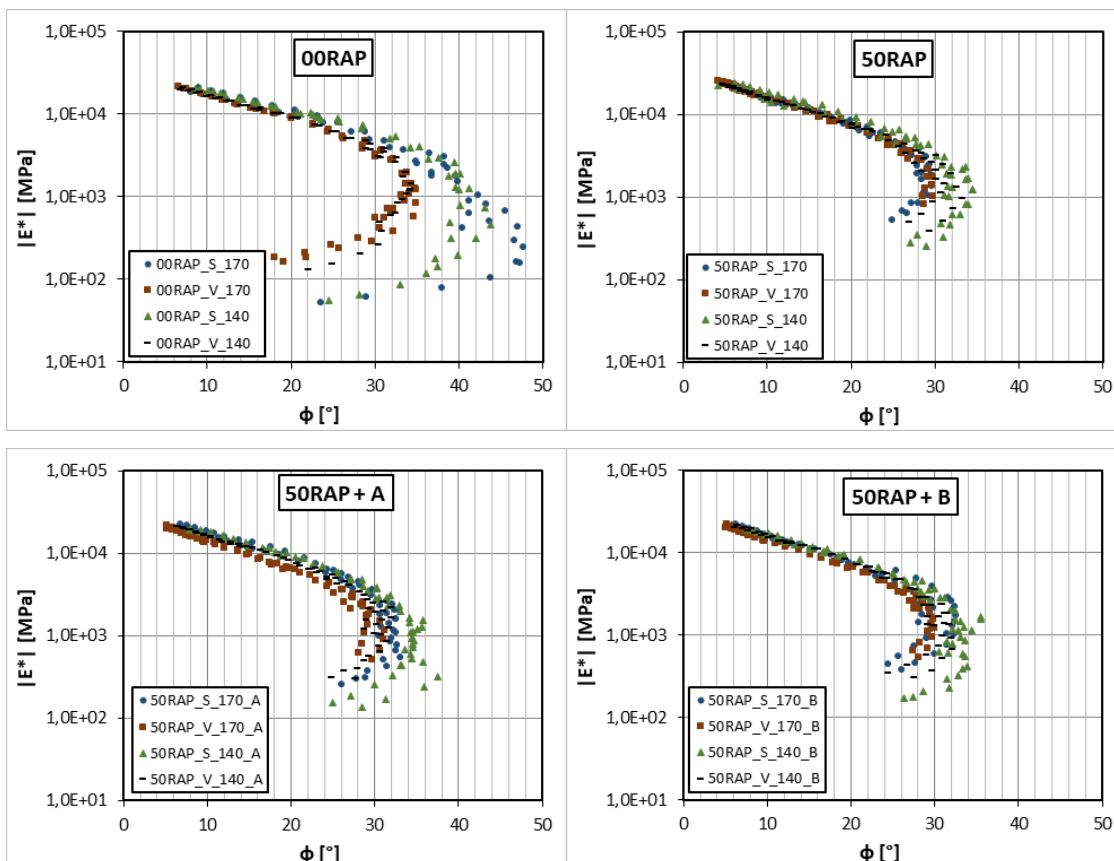


Figura 3.3 - Rappresentazione grafica nel *piano di Black* ($|E^*|$ - ϕ) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle curve relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.4 nel *piano di Cole-Cole* (E_2 - E_1), si osserva che:

- a parità di miscela, le miscele confezionate a 140 °C con bitume Primario graficamente sono le più alte e hanno i valori più elevati della componente viscosa del modulo complesso, mentre le miscele confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking sono le più basse;
- le miscele 00RAP confezionate con lo stesso tipo di bitume a temperature differenti risultano graficamente molto simili tra di loro. Perciò, il comportamento reologico delle miscele tradizionali è influenzato molto dal tipo di bitume impiegato e poco dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione;
- le miscele 50RAP sono influenzate sia dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione che dal tipo di bitume impiegato;

- le miscele con gli additivi rigeneranti di bitume presentano un andamento abbastanza simile.

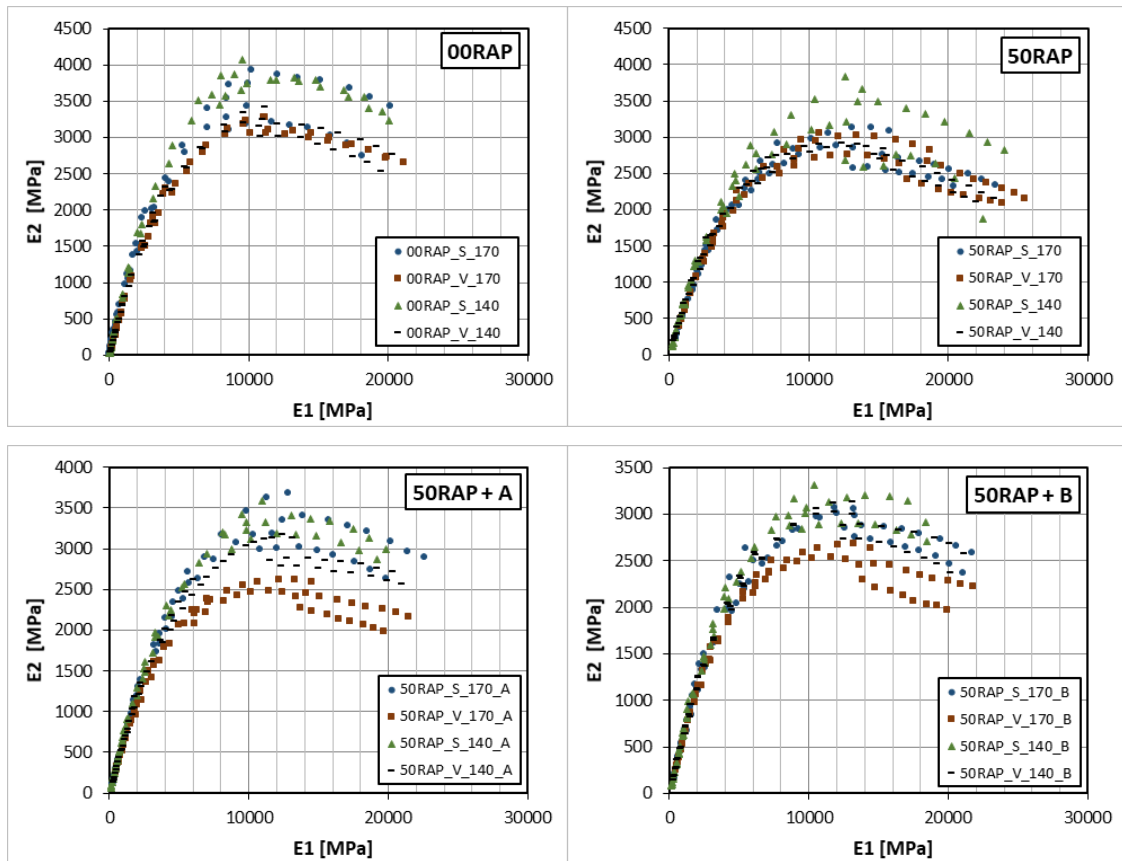


Figura 3.4 - Rappresentazione grafica nel *piano di Cole-Cole* (E_2 - E_1) del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.

3.4 Valutazione dell'andamento delle curve maestre delle miscele a parità di temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine

Si rappresenta graficamente il comportamento viscoelastico lineare di tutte le miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* sovrapposte al *modello 2S2PID*. In questo paragrafo, si confronta in un unico grafico l'andamento delle curve maestre delle miscele aventi la stessa temperatura di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C) e lo stesso tipo di bitume vergine impiegato (S e V). Queste curve maestre si identificano sia nel piano ($|E^*|$ - f_r) che rappresenta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ espresso in MPa al variare della frequenza relativa f_r espressa in Hz (Figura 3.5), sia

nel piano $(\phi-f_r)$ relativo all'andamento dell'angolo di fase ϕ espresso in gradi angolari al variare della frequenza relativa f_r espressa in Hz (Figura 3.6). Si ricorda che il modulo dinamico $|E^*|$ è un parametro che rappresenta il legame tra tensione e deformazione, quindi, è un modulo di rigidità; mentre l'angolo di fase ϕ è un parametro dinamico che rappresenta la viscosità del materiale, è nullo per un solido elastico e massimo $(\pi/2)$ per un liquido viscoso di tipo Newtoniano. Aumentando la rigidità e diminuendo la viscosità si ha un incremento della fragilità della miscela.

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle *curve maestre* relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.5 nel piano $(|E^*|-f_r)$, si osserva che:

- le curve maestre $(|E^*|-f_r)$ delle miscele tradizionali senza RAP sono sempre graficamente posizionate più in basso rispetto a tutte le altre curve maestre delle miscele con RAP. Perciò, la presenza di RAP aumenta sempre la rigidità della miscela;
- le curve maestre $(|E^*|-f_r)$ delle miscele contenenti gli additivi rigeneranti di bitume (A e B) risultano graficamente molto simili tra di loro e sempre posizionate ad un livello intermedio dalle altre due curve delle miscele con e senza RAP. Perciò, l'impiego degli additivi rigeneranti riduce sempre la rigidità della miscela contenente RAP, ma l'andamento non è mai vicino a quello della miscela tradizionale senza RAP;
- l'efficacia, in termini di rigidità, di entrambi gli additivi rigeneranti di bitume impiegati (A e B) è quasi sempre molto simile, anche se l'additivo A risulta leggermente più efficace; soprattutto nelle miscele confezionate a 170 °C con bitume Primario si nota un marcato distanziamento delle curve maestre $(|E^*|-f_r)$ alle basse frequenze relative;
- la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata influisce sempre sull'andamento delle curve maestre $(|E^*|-f_r)$ di tutte le miscele, maggiormente su quelle contenenti RAP. Infatti, le curve maestre delle miscele confezionate ad una temperatura più alta (170 °C) risultano graficamente sempre posizionate più in alto rispetto alle curve maestre delle stesse miscele confezionate ad una temperatura più bassa (140 °C), aumentando il valore del modulo dinamico e incrementando la rigidità del materiale. Inoltre, l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione, per entrambi i tipi di bitume, evidenzia

ancora di più il differente comportamento reologico delle miscele con e senza RAP, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale;

- il differente tipo di bitume vergine impiegato influisce sempre sull'andamento delle curve maestre ($|E^*|_f$) di tutte le miscele. Infatti, le curve maestre delle miscele con bitume Visbreaking risultano graficamente posizionate più in alto rispetto alle curve maestre delle stesse miscele con bitume Primario, aumentando il valore del modulo dinamico e incrementando la rigidità del materiale. Inoltre, le curve delle miscele con bitume Primario evidenziano, per entrambe le temperature di preriscaldamento e di miscelazione, un aumento della differenza di comportamento reologico delle miscele con e senza RAP, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale; invece, per le curve maestre delle miscele con bitume Visbreaking questo distanziamento si nota di più a 170 °C.

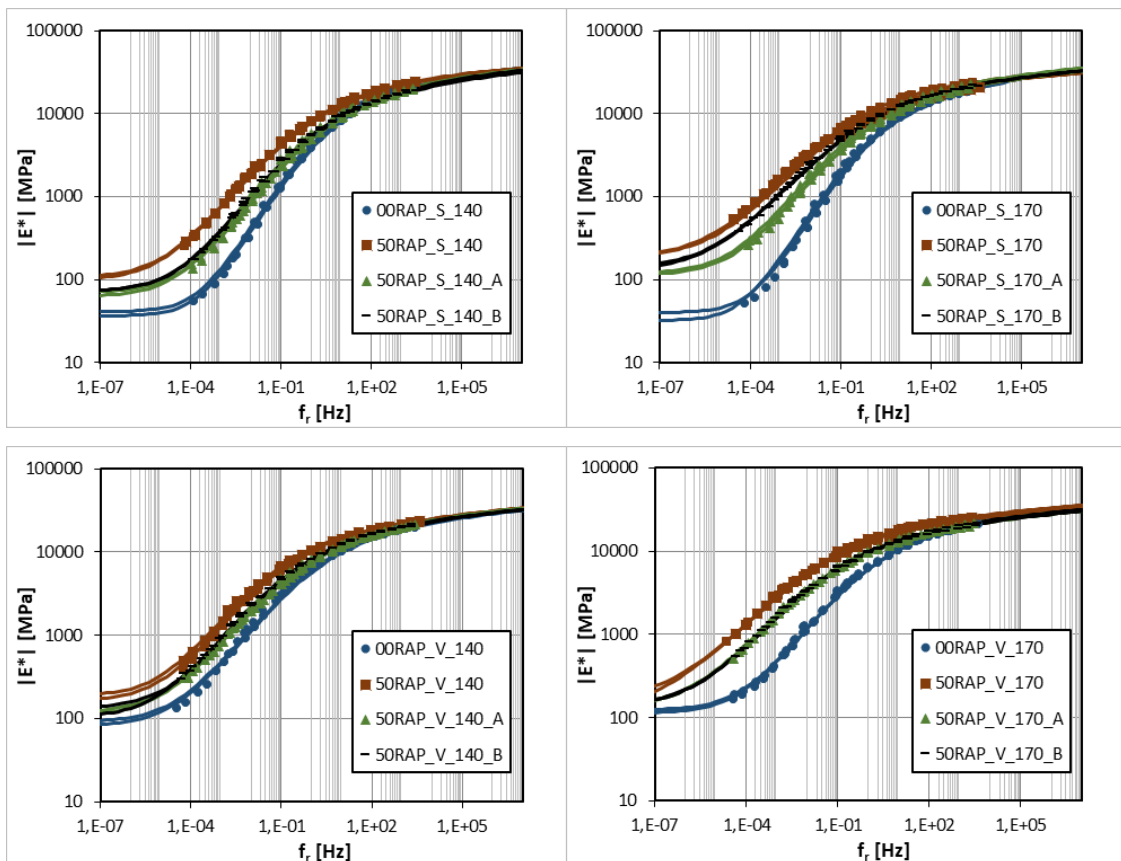


Figura 3.5 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* del modulo dinamico al variare della frequenza relativa ($|E^*|_f$) a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).

Invece, confrontando l'andamento delle *curve maestre* relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.6 nel piano $(\phi-f_r)$, si osserva che:

- le curve maestre $(\phi-f_r)$ delle miscele senza RAP possiedono sempre i valori più elevati dell'angolo di fase; mentre quelle di tutte le miscele contenenti RAP risultano graficamente più basse e spostate verso sinistra, manifestando un comportamento meno viscoso rispetto alle miscele tradizionali;
- le curve maestre $(\phi-f_r)$ delle miscele contenenti gli additivi rigeneranti di bitume risultano graficamente quasi sovrapposte tra di loro e posizionate di pochissimo più in alto delle curve con solo RAP. Perciò, si osserva che l'impiego di entrambi gli additivi rigeneranti di bitume non ripristina tutte le caratteristiche reologiche perse, riduce solo la rigidità della miscela con RAP, influenzando molto poco sulla risposta viscosa del materiale;
- la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata influisce sempre sull'andamento delle curve maestre $(\phi-f_r)$ di tutte le miscele, maggiormente su quelle contenenti RAP. Infatti, le curve maestre delle miscele confezionate ad una temperatura più alta (170 °C) risultano graficamente posizionate più in basso e a sinistra rispetto alle curve maestre delle stesse miscele confezionate ad una temperatura più bassa (140 °C). Inoltre, l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione, per entrambi i tipi di bitume, evidenzia ancora di più il differente comportamento reologico delle miscele con e senza RAP, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale. Questa traslazione grafica verso sinistra, presentando più alti valori dell'angolo di fase alle basse frequenze relative, è molto evidente nelle miscele con RAP confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking rispetto alle analoghe miscele confezionate a 140 °C;
- il differente tipo di bitume vergine impiegato influisce sempre l'andamento delle curve maestre $(\phi-f_r)$ di tutte le miscele. Per entrambe le temperature di preriscaldamento e di miscelazione, le miscele senza RAP contenenti bitume Primario presentano sempre i valori maggiori dell'angolo di fase rispetto a tutte le altre miscele contenenti RAP e rispetto a tutte le miscele contenenti il bitume Visbreaking. Perciò, l'impiego di bitume Primario evidenzia maggiormente la differenza di comportamento reologico delle miscele con e senza RAP, aumentandone graficamente il distanziamento spaziale; distanziamento quasi

nullo nelle miscele confezionate a 140 °C con bitume Visbreaking, mentre è molto marcato nelle miscele confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking dove quelle con RAP risultano posizionate più a sinistra di quella senza RAP.

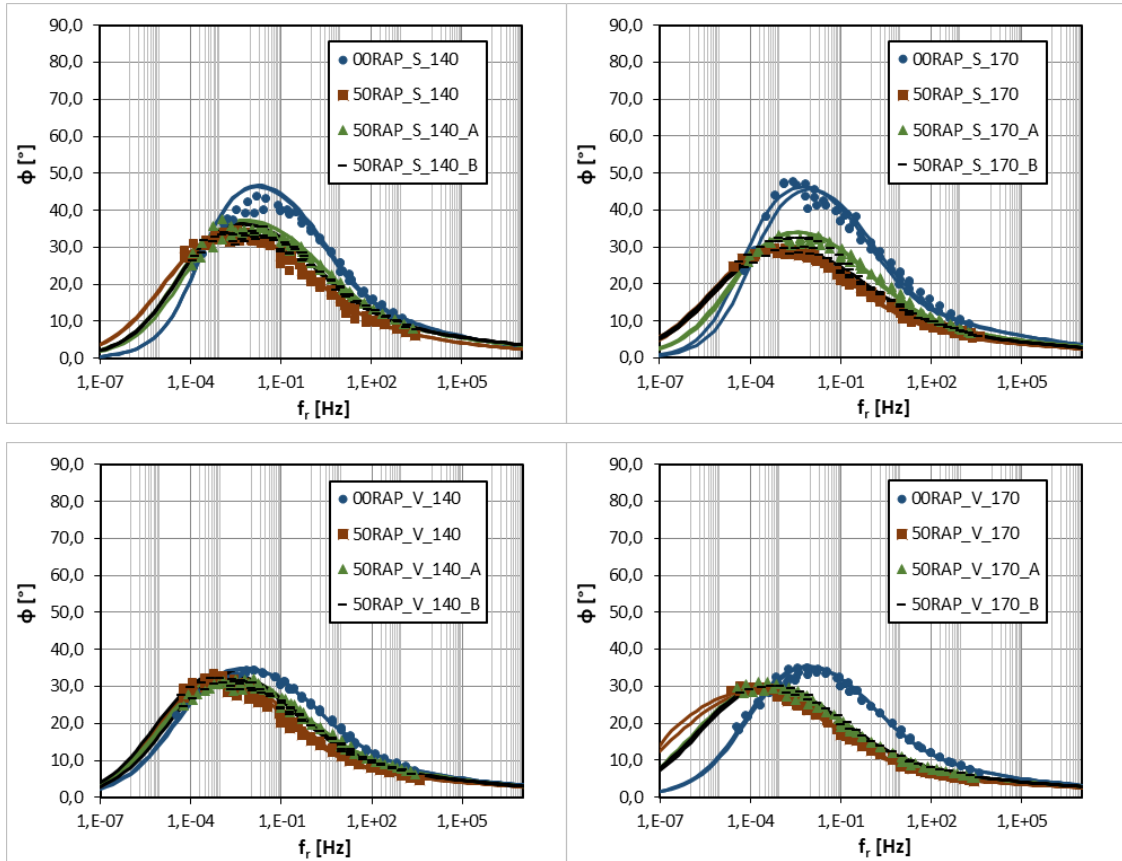


Figura 3.6 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* dell'angolo di fase al variare della frequenza relativa (ϕ - f_r) a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e di tipo di bitume vergine impiegato (S o V).

In definitiva, aggiungendo RAP, aumentano i valori del modulo dinamico $|E^*|$, incrementando la rigidità e la fragilità del materiale. Tale incremento si nota anche aumentando la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata e impiegando bitume vergine del tipo Visbreaking; aggiungendo gli additivi rigeneranti di bitume si riscontra, nelle miscele riciclate a caldo, un riavvicinamento del comportamento reologico in termini di rigidità alle relative miscele confezionate a caldo senza RAP, ma senza mai uguagliarsi. Invece, aggiungendo RAP, i valori dell'angolo di fase ϕ diminuiscono e si riscontra anche uno spostamento grafico delle relative curve maestre verso sinistra, identificando un aumento dei valori dell'angolo di fase alle basse

frequenze relative; questo comportamento risulta più evidente aumentando la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata.

3.5 Valutazione dell'andamento delle curve maestre delle miscele al variare della temperatura di miscelazione e tipo di bitume vergine

Si rappresenta graficamente il comportamento viscoelastico lineare di tutte le miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* sovrapposte al *modello 2S2PID*. In questo paragrafo, si confronta in un unico grafico l'andamento delle curve maestre delle miscele aventi lo stesso quantitativo di RAP (00RAP e 50RAP) e quelle aventi la stessa tipologia di additivo rigenerante di bitume (A e B) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione (140 °C e 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S e V). Queste curve maestre si identificano sia nel piano ($|E^*|$ - f_r) che rappresenta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ espresso in MPa al variare della frequenza relativa f_r espressa in Hz (Figura 3.7), sia nel piano (ϕ - f_r) relativo all'andamento dell'angolo di fase ϕ espresso in gradi angolari al variare della frequenza relativa f_r espressa in Hz (Figura 3.8).

Nel dettaglio, confrontando l'andamento delle *curve maestre* relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.7 nel piano ($|E^*|$ - f_r), si osserva che:

- le curve maestre ($|E^*|$ - f_r) graficamente posizionate sempre più in basso sono quelle delle miscele confezionate a 140 °C con bitume Primario, mentre le più alte sono quelle delle miscele confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking;
- le curve maestre ($|E^*|$ - f_r) delle miscele 00RAP confezionate con lo stesso tipo di bitume a temperature differenti risultano graficamente molto simili tra di loro, quasi sovrapposte. Perciò, il comportamento reologico delle miscele tradizionali è influenzato molto dal tipo di bitume impiegato e poco dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione;
- le curve maestre ($|E^*|$ - f_r) delle miscele 50RAP sono influenzate sia dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione che dal tipo di bitume impiegato. Quella della miscela confezionate a 170 °C con bitume Primario e quella della miscela 50RAP confezionate a 140 °C con bitume Visbreaking

risultano graficamente molto simili, quasi sovrapposte tra di loro e posizionate ad un livello intermedio dalle altre due miscele 50RAP;

- le curve maestre ($|E^*|$ - f_r) delle miscele contenenti gli additivi rigeneranti di bitume presentano un andamento abbastanza simile, sono influenzate sia dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione che dal tipo di bitume impiegato. L'additivo A risulta più influenzato dalla diversa temperatura di preriscaldamento e di miscelazione e dal tipo di bitume impiegato, mentre le miscele con l'additivo B sono quasi sovrapposte ad eccezione di quella confezionata a 140 °C con bitume Primario.

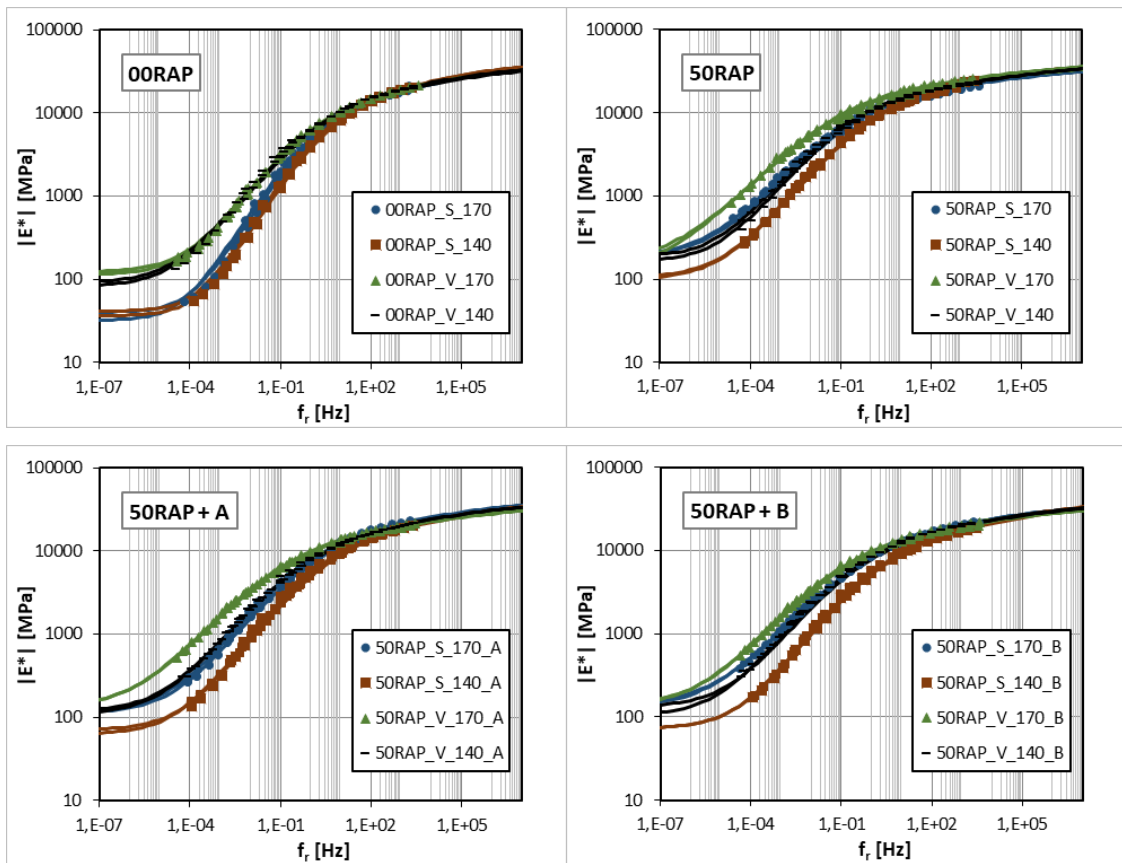


Figura 3.7 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* del modulo dinamico al variare della frequenza relativa ($|E^*|$ - f_r) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.

Invece, confrontando l'andamento delle *curve maestre* relative ad ogni singola miscela di progetto riportate in Figura 3.8 nel piano $(\phi-f_r)$, si osserva che:

- le curve maestre $(\phi-f_r)$ graficamente posizionate più in alto sono quelle delle miscele confezionate a 140 °C con bitume Primario, mentre quelle delle miscele confezionate a 170 °C con bitume Visbreaking risultano le più basse e spostate verso sinistra;
- le curve maestre $(\phi-f_r)$ delle miscele 00RAP confezionate con lo stesso tipo di bitume a temperature differenti risultano graficamente simili tra di loro. Perciò, il comportamento reologico delle miscele tradizionali è influenzato molto dal tipo di bitume impiegato e poco dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione;
- le curve maestre $(\phi-f_r)$ delle miscele 50RAP sono influenzate sia dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione che dal tipo di bitume impiegato. Quella della miscela confezionata a 170 °C con bitume Primario e quella della miscela confezionata a 140 °C con bitume Visbreaking risultano graficamente molto simili, quasi sovrapposte tra di loro e posizionate ad un livello intermedio dalle altre due miscele 50RAP;
- le curve maestre $(\phi-f_r)$ delle miscele contenenti gli additivi rigeneranti di bitume presentano un andamento abbastanza simile. Le curve delle miscele con l'additivo A sono quasi sovrapposte ad eccezione di quella confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking che risulta più bassa e spostata verso sinistra; mentre quelle con l'additivo B si presentano quasi tutte leggermente più spostate verso sinistra.

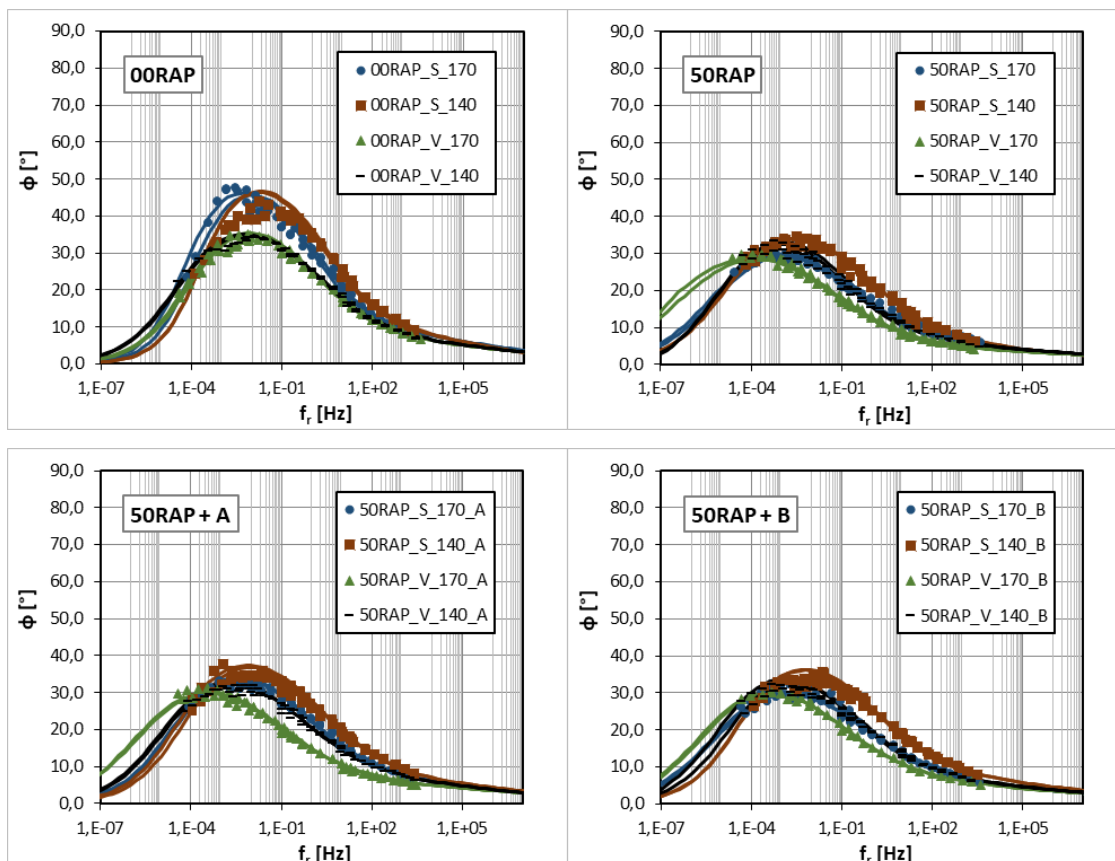


Figura 3.8 - Rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare delle miscele di progetto mediante le relative *curve maestre* dell'angolo di fase al variare della frequenza relativa ($\phi-f_r$) al variare della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C o 170 °C) e del tipo di bitume vergine impiegato (S o V), quindi, a parità di miscela.

In definitiva, si intuisce che il valore del modulo dinamico $|E^*|$ e dell'angolo di fase ϕ nelle miscele contenenti la stessa ricetta di aggregati e in quelle contenenti la stessa tipologia di additivi rigeneranti di bitume è direttamente influenzato dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata e dal tipo di bitume vergine impiegato. Le miscele senza RAP risultano più influenzate dal tipo di bitume vergine e meno dalla temperatura di miscelazione, riscontrando un aumento di rigidità e fragilità impiegando bitume Visbreaking. Le miscele riciclate a caldo risultano influenzate sia dal tipo di bitume vergine impiegato che dalla temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata; infatti, portandola da 140 °C a 170 °C si osserva un aumento del modulo dinamico e una riduzione dell'angolo di fase, rendendo così la miscela più rigida, meno viscosa e più fragile. Si potrebbe ipotizzare che a 170 °C si riattivi un quantitativo maggiore di bitume invecchiato contenuto nel RAP, portando così ad una maggiore partecipazione del bitume invecchiato alla fase legante con il bitume vergine,

rendendo la miscela più rigida, più fragile e meno viscosa rispetto a quella confezionata a 140 °C.

3.6 Analisi dei parametri del modello analitico

Come già detto, per definire e confrontare il comportamento viscoelastico lineare delle miscele di conglomerato bituminoso di progetto si utilizza il *modello 2S2PID* che si descrive analiticamente mediante 7 parametri [21]. Il materiale è termoreologicamente semplice e si soddisfa il *principio di TTS*, perciò, solo il parametro tempo caratteristico τ risulta dipendente dalla temperatura. Gli *shift factor* si determinano con l'*equazione empirica di Williams-Landel-Ferry* che adopera due costanti (C1 e C2) [19]. Perciò, in totale, il comportamento reologico delle miscele viene descritto mediante 9 parametri. In supporto, si impiega il *parametro di Glover-Rowe* relativo alle miscele di conglomerato bituminoso come suggerito da *Ogbo et al.* [26]. Di seguito, si riporta l'andamento dei parametri relativi ad ogni miscela di progetto.

Il *parametro di Glover-Rowe*, espresso in MPa, presenta il seguente andamento (Figura 3.9):

- il *parametro di G-R* varia tra 11000 MPa e 90000 MPa, risultando di cinque ordini superiore rispetto ai valori rappresentativi dei leganti bituminosi;
- a parità di miscela, aumentando la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione si riscontra un incremento del valore del *parametro di G-R*, soprattutto nelle miscele contenenti RAP;
- a parità di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione, per entrambi i tipi di bitume, il *parametro di G-R* assume sempre i valori più bassi nelle miscele tradizionali 00RAP, i valori più elevati nelle miscele 50RAP e i valori intermedi nelle miscele contenenti entrambi gli additivi rigeneranti di bitume;
- per la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione di 140 °C, il *parametro di G-R* assume valori più bassi impiegando l'additivo A rispetto all'additivo B; mentre per i 170 °C non si riscontrano differenze pronunciate tra gli additivi;
- le miscele con bitume Primario rispetto alle identiche miscele con bitume Visbreaking possiedono sempre un valore inferiore del *parametro di G-R*;

- il *parametro di G-R* assume il valore più basso nella miscela senza RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario e il valore più elevato nella miscela con RAP confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking.

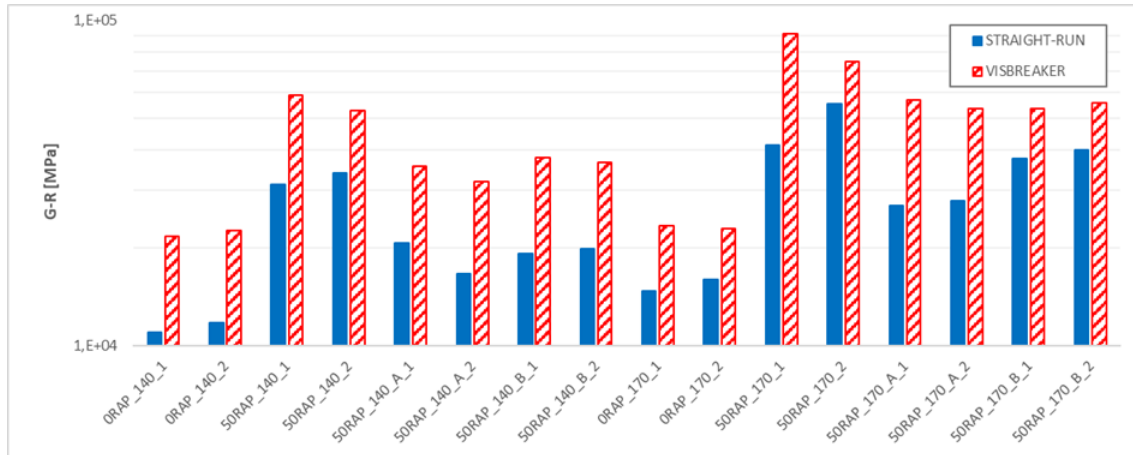


Figura 3.9 - Valori del *parametro di Glover-Rowe* dei provini delle miscele di progetto.

Il parametro *modulo statico* E_0 , espresso in MPa, del *modello 2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.10):

- a parità sia di bitume impiegato che di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata, il modulo statico E_0 assume i valori più bassi nelle miscele senza RAP, i più elevati nelle miscele con RAP e i valori intermedi nelle miscele con gli additivi rigeneranti di bitume;
- non si riscontrano differenze tra le tipologie di additivi rigeneranti impiegati;
- nelle miscele confezionate a 140 °C, impiegando bitume Visbreaking si evidenziano sempre valori più elevati del modulo statico E_0 rispetto all'impiego di bitume Primario, tale differenza si riduce notevolmente in tutte le miscele 50RAP confezionate a 170 °C;
- il modulo statico E_0 assume il valore più basso nelle miscele senza RAP con bitume Primario e il valore più elevato nelle miscele 50RAP con bitume Visbreaking, sottolineando che le miscele 50RAP confezionate a 170 °C con bitume Primario presentano valori superiori delle analoghe miscele con bitume Visbreaking.

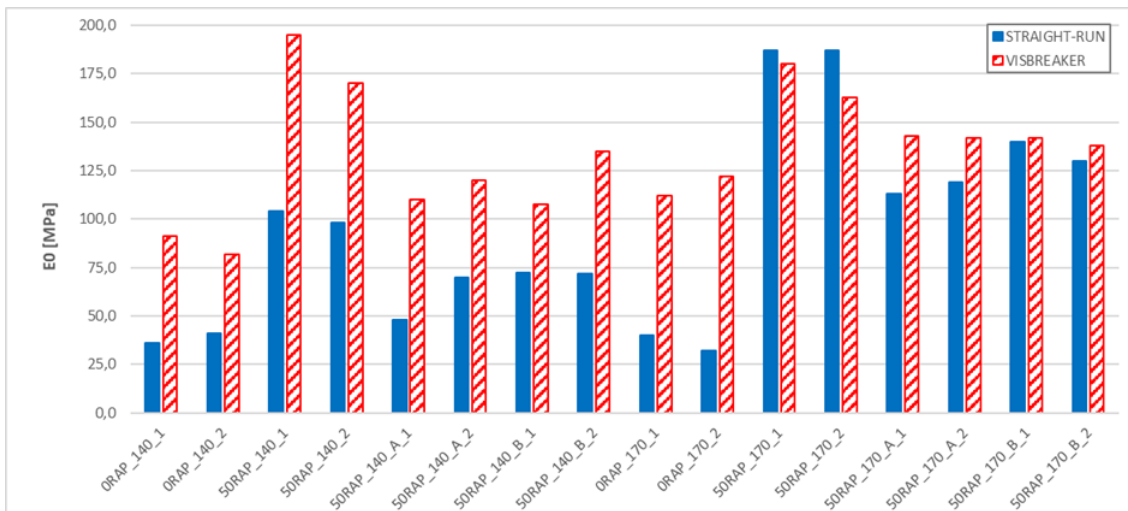


Figura 3.10 - Valori del *modulo statico* E_0 dei provini delle miscele di progetto.

Il parametro *modulo vetroso* E_∞ , espresso in MPa, del *modello 2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.11):

- si evidenzia per tutte le miscele un andamento del valore del modulo vetroso E_∞ molto simile e dell'ordine di circa 45000 MPa, eccetto per la miscela 50RAP_V_170 che ha un valore di circa 50000 MPa;
- il modulo vetroso E_∞ non risulta influenzato dalla temperatura di preriscaldamento adottata e dal tipo di bitume impiegato;
- la miscela 50RAP confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking presenta il valore più elevato del modulo vetroso E_∞ .

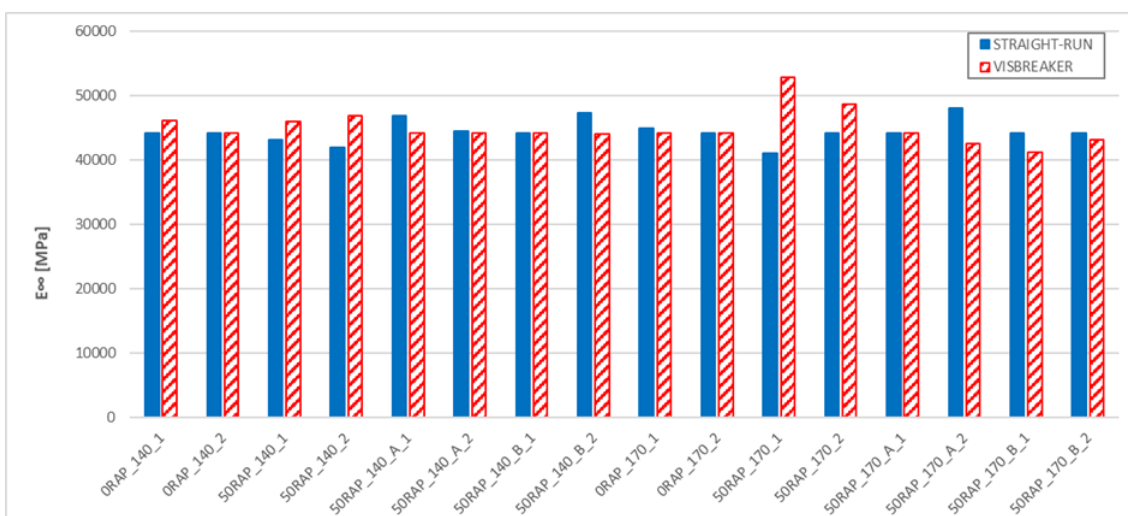


Figura 3.11 - Valori del *modulo vetroso* E_∞ dei provini delle miscele di progetto.

Il parametro adimensionale k del modello *2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.12):

- nelle miscele contenenti RAP, per entrambi i tipi di bitume, aumentando la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione si riscontra una diminuzione del valore del parametro k , evidenziando maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP;
- il parametro k assume generalmente i valori più bassi nelle miscele con RAP;
- l'uso degli additivi rigeneranti di bitume non influenza molto il parametro k e non si riscontrano valori troppo differenti tra una tipologia e l'altra;
- le miscele con bitume Primario rispetto alle identiche miscele con bitume Visbreaking presentano quasi sempre valori più elevati del parametro k ed evidenziano maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP;
- il parametro k assume il valore più basso nella miscela con RAP confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking e il valore più elevato nelle miscele senza RAP contenenti bitume Primario.

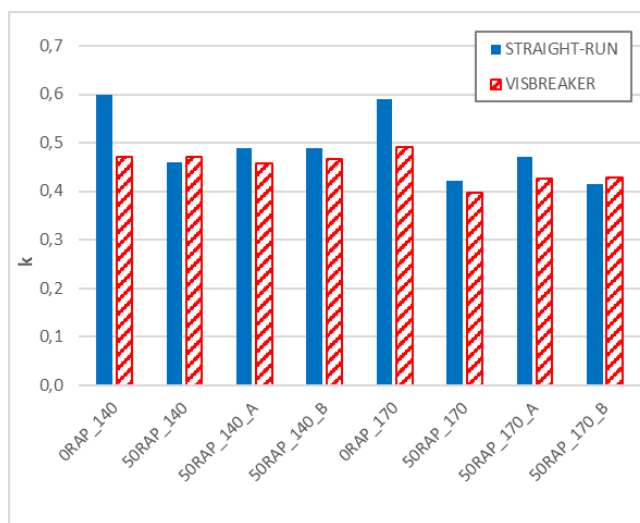


Figura 3.12 - Valori del parametro k delle miscele di progetto.

Il parametro adimensionale h del *modello 2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.13):

- nelle miscele contenenti RAP, per entrambi i tipi di bitume, aumentando la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione si riscontra una diminuzione del valore del parametro h , evidenziando maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP e l'impiego degli additivi rigeneranti di bitume;
- il parametro h assume generalmente i valori più bassi nelle miscele con RAP;
- l'uso degli additivi rigeneranti di bitume aumenta il parametro h , ma non si riscontrano valori troppo differenti tra una tipologia e l'altra;
- le miscele con bitume Primario rispetto alle identiche miscele con bitume Visbreaking presentano valori più elevati del parametro h ed evidenziano maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP;
- il parametro h assume il valore più basso nella miscela con RAP confezionata a 170 °C con bitume Visbreaking e il valore più elevato nella miscela senza RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario.

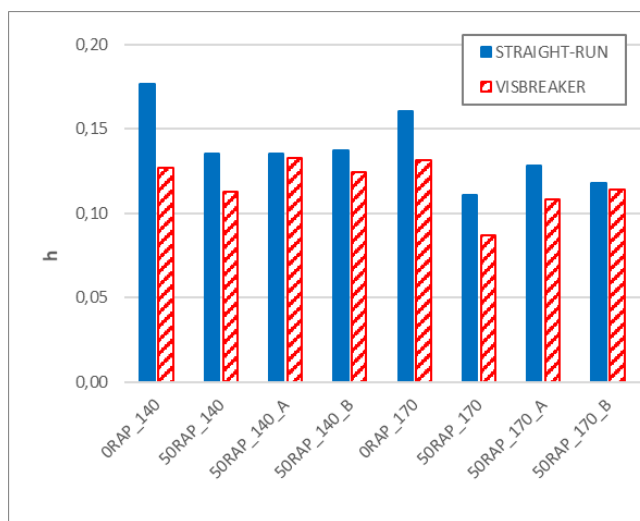


Figura 3.13 - Valori del parametro h delle miscele di progetto.

Il parametro δ del *modello 2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.14):

- il parametro δ assume generalmente valori più bassi e simili nelle miscele con bitume Visbreaking dell'ordine di circa 0,05; mentre nelle miscele con bitume Primario si evidenziano valori differenti con picchi più elevati nelle miscele 50RAP e nella miscela 50RAP confezionata a 170 °C con additivo B.

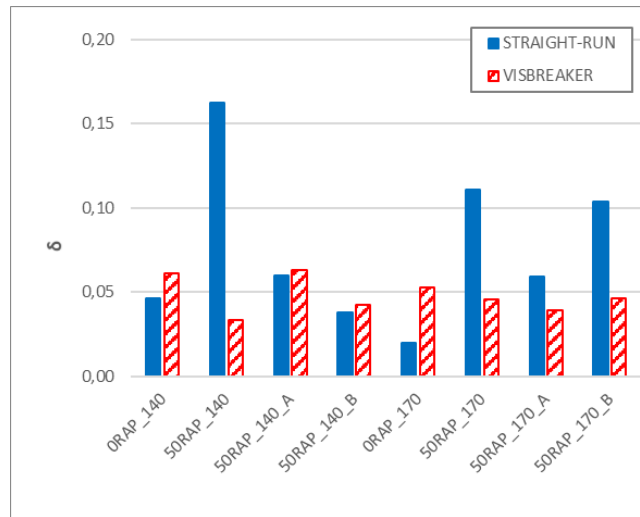


Figura 3.14 - Valori del parametro δ delle miscele di progetto.

Il parametro $\log(\beta)$ del *modello 2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.15):

- si evidenzia per tutte le miscele un valore del parametro $\log(\beta)$ elevato ($\beta > 106$); perciò, il *dashpot* risulta molto viscoso. Aumentandolo ulteriormente non si riscontra una modifica della curva maestra e dello scarto di errore tra il modulo dinamico misurato e quello calcolato, questo permette di ipotizzare che il *dashpot* è talmente viscoso da poterlo assimilare a un elemento rigido e il *modello 2S2PID* diviene il *modello di Huet-Sayegh* [29] (da cui deriva [22]);
- le miscele contenenti RAP confezionate con bitume Primario rispetto alle identiche miscele con bitume Visbreaking presentano valori più elevati del parametro $\log(\beta)$ ed evidenziano maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP e l'impiego degli additivi rigeneranti di bitume;
- il parametro $\log(\beta)$ nelle miscele con bitume Visbreaking assume valori simili;

- l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione, a parità di miscela, generalmente aumenta di poco il valore del parametro $\log(\beta)$, ma si riscontra un dimezzamento del valore nella miscela con l'additivo A;
- il parametro $\log(\beta)$ assume il valore più basso nella miscela senza RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario e il valore più elevato nella miscela con RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario e additivo A.

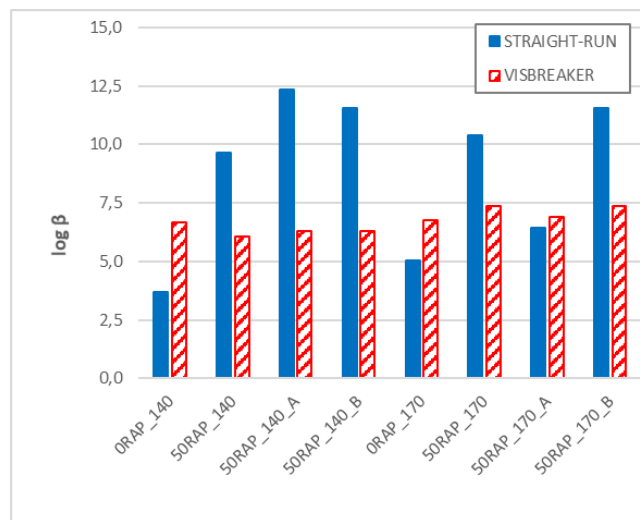


Figura 3.15 - Valori del parametro $\log(\beta)$ delle miscele di progetto.

Il parametro $\log(\tau_0)$ del modello *2S2PID* presenta il seguente andamento (Figura 3.16):

- si evidenzia per tutte le miscele un valore del parametro $\log(\tau_0)$ negativo;
- generalmente, il parametro $\log(\tau_0)$ assume valori negativi superiori per le miscele senza RAP e valori negativi inferiori per le miscele con RAP;
- l'uso degli additivi rigeneranti di bitume aumenta il parametro $\log(\tau_0)$, soprattutto nelle miscele confezionate con bitume Primario. Infatti, le miscele confezionate a 140 °C con bitume Primario e additivi presentano valori superiori del parametro $\log(\tau_0)$ a quello della relativa miscela senza RAP;
- l'impiego di bitume Primario rispetto al bitume Visbreaking evidenzia maggiormente le differenze tra le miscele con e senza RAP e l'impiego degli additivi rigeneranti di bitume;
- l'aumento della temperatura di preriscaldamento e di miscelazione influisce maggiormente il parametro $\log(\tau_0)$ delle miscele con bitume Primario;

- il parametro $\log(\tau_0)$ assume il valore più basso nella miscela contenente RAP con bitume Primario e il valore più elevato nella miscela con RAP confezionata a 140 °C con bitume Primario e additivo B.

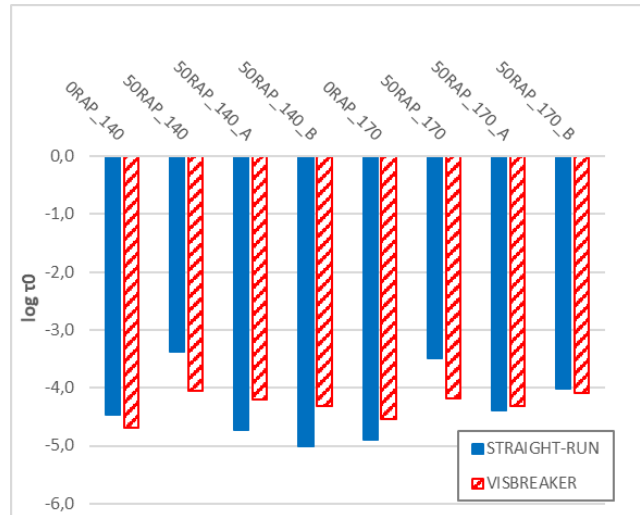


Figura 3.16 - Valori del parametro $\log(\tau_0)$ delle miscele di progetto.

CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questa tesi è di confrontare gli effetti sull'andamento del comportamento reologico di miscele di conglomerato bituminoso di recupero riciclato e confezionato a caldo, provocati dall'impiego di una elevata percentuale di RAP (50% in peso sulla miscela degli aggregati), una differente temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata (140 °C e 170 °C), un differente tipo di bitume vergine tradizionale impiegato ottenuto da due diversi processi di distillazione del petrolio greggio (Primario o Straight-run e Visbreaking) e una differente tipologia di additivo rigenerante di bitume eventualmente aggiunta (additivo A e additivo B).

Analizzando i risultati sperimentali esposti principalmente nel capitolo 3, in conclusione del lavoro svolto, si identificano i seguenti esiti:

- i provini delle miscele di progetto sottoposti alla prova dinamica di modulo complesso sono rappresentativi di un materiale termoreologicamente semplice, convalidando l'applicazione del *principio di sovrapposizione tempo-temperatura*, permettendo di utilizzare l'*equazione analitica di WLF* [19] e il *modello 2S2PID* [21] per rettificare e interpolare tra loro i dati;
- le curve maestre del modulo dinamico delle miscele contenenti RAP sono graficamente sempre più in alto delle curve delle miscele tradizionali senza RAP, evidenziando un aumento della rigidità e della fragilità della miscela; l'aggiunta degli additivi rigeneranti di bitume riesce ad abbassare il valore del modulo dinamico, confermando l'efficacia in termini di rigidità e posizionando le relative curve maestre ad una quota quasi intermedia tra le 00RAP e le 50RAP, ma più vicine alle 50RAP. Non si riscontrano differenze sostanziali di efficacia in termini di rigidità tra le due tipologie di additivi rigeneranti impiegati, eccetto nelle miscele confezionate a 170 °C con bitume Primario dove l'additivo A risulta più efficace;
- le curve maestre dell'angolo di fase delle miscele contenenti RAP tendono graficamente ad abbassarsi e a spostarsi verso sinistra rispetto alle miscele tradizionali senza RAP; l'aggiunta degli additivi rigeneranti di bitume influenza marginalmente l'angolo di fase. Perciò, entrambi gli additivi rigeneranti

impiegati non riescono a ripristinare totalmente le caratteristiche reologiche, risultando efficaci solo in termini di rigidità;

- le curve maestre delle miscele tradizionali senza RAP evidenziano una maggiore sensibilità al fenomeno dell'invecchiamento a breve termine del bitume vergine Visbreaking rispetto al Primario. Inoltre, confrontando le curve maestre delle miscele 50RAP contenenti entrambi gli additivi rigeneranti di bitume, si osserva che impiegando il bitume Vibreaking rispetto al Primario aumentano i valori del modulo dinamico e diminuiscono quelli dell'angolo di fase;
- la differente temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata influisce maggiormente sul comportamento reologico delle miscele contenenti RAP e marginalmente su quello delle miscele senza RAP. Quanto appena detto, conferma l'ipotesi che l'aumento della temperatura di miscelazione influisce marginalmente sul fenomeno dell'invecchiamento a breve termine del bitume vergine; provocando, invece, una maggiore riattivazione e dispersione del quantitativo del bitume invecchiato interno al RAP;
- il differente tipo di bitume vergine influenza sempre il comportamento reologico della miscela, soprattutto in termini di rigidità e fragilità. Impiegando bitume Visbreaking, rispetto al Primario, aumentano i valori del modulo dinamico e diminuiscono leggermente quelli dell'angolo di fase, confermando che un processo più severo di distillazione del petrolio greggio produce bitume più rigido e fragile [12, 13, 14, 15, 16, 17];
- il distanziamento grafico tra le curve evidenzia il diverso comportamento reologico tra le miscele con e senza RAP, questo aumenta impiegando bitume Primario rispetto al Visbreaking e adottando per entrambi i tipi di bitume la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione più elevata (170 °C);
- per il lavoro svolto, si osserva che non tutti i parametri del *modello 2S2PID* risultano efficaci per rappresentare l'andamento reologico delle miscele al variare di tutte le condizioni di produzione e di materiali costitutivi. Nello specifico, il modulo vetroso E_{∞} e i parametri δ e β appaiono poco significativi; mentre il modulo statico E_0 e i parametri k , h e τ_0 rappresentano bene la presenza sia del RAP che degli additivi rigeneranti di bitume, ma molto meno la

differenza di temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata e il tipo di bitume vergine impiegato;

- il *parametro di Glover-Rowe* [25] risulta un valido supporto nel lavoro sperimentale svolto; nonostante inizialmente nella trattazione originale viene introdotto solo per i leganti bituminosi, si adatta bene alle miscele di conglomerato bituminoso di progetto grazie agli studi di *Ogbo et al.* [26].

Valutando quanto esposto, considerando e analizzando i risultati sperimentali ottenuti, si ritiene applicabile l'impiego di una percentuale elevata di RAP (50%), riciclata con la tecnica a caldo, per il successivo confezionamento a caldo di un conglomerato bituminoso indirizzato allo strato di binder di una pavimentazione stradale flessibile.

In definitiva, adottare una temperatura di preriscaldamento e di miscelazione ragionevolmente bassa, sufficiente per garantire la lavorabilità del bitume, unita all'impiego di un additivo rigenerante di bitume e di un bitume vergine di migliori caratteristiche e proprietà, come il bitume Primario, permette di garantire alle miscele di conglomerato bituminoso riciclato a caldo le caratteristiche reologiche e meccaniche ottimali, aumentandone la durata nel tempo senza soffrire di problemi fessurativi. Inoltre, si evidenzia l'importanza di riportare per un bitume vergine la procedura di distillazione del petrolio greggio da cui si ottiene.

Come già detto, il conglomerato bituminoso di recupero è un argomento di attuale importanza per assicurare uno sviluppo *economico di tipo sostenibile*. Quindi, lo studio sperimentale trattato in questa tesi rientra nella tematica esposta; sicuramente è aperto a ulteriori approfondimenti e lavori di ricerca futuri per raggiungere il traguardo di un riciclo totale del RAP con la tecnica a caldo prossimo al 100%; permettendo così un continuo rimpiego del conglomerato bituminoso di recupero anche a fine vita utile della pavimentazione con esso realizzata, riducendo drasticamente l'impiego e lo sfruttamento di materiali vergini.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Libri, monografie, articoli, tesi

- [1] Santagata F.A., et al., *STRADE: Teoria e tecnica delle costruzioni stradali*, Volumi 1 e 2, Milano, Torino, Pearson Italia, 2016.
- [2] *I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture. Volume V, Le pavimentazioni stradali: Prontuario per la progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori sul piano viabile*, Anas S.p.A., 2019.
<https://www.stradeanas.it/it/lazienda/attivita%20documenti-tecnici>
- [3] Lo Presti D., Jiménez del Barco Carrión A., Airey G., Hajj E., *Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies*, Journal of Cleaner Production, Volume 131, 2016, pag. 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093>
- [4] Mamun A.A., Al-Abdul Wahhab H.I., *Comparative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement*, International Journal of Pavement Engineering, Volume 21, Issue 11, 2020, pag. 1297-1308.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1539486>
- [5] *Capitolato Speciale di Appalto. Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto. Parte 2. Pavimentazioni stradali*, Anas S.p.A., coordinamento Territoriale/Direzione, (IT.PRL.05.21 - Rev. 1.0).
- [6] *Direttive tecniche per pavimentazioni bituminose 2017. Binder - TRADIZIONALE 2016*, Provincia Bolzano (BZ), dicembre 2017.
<http://www.provincia.bz.it/costruire-abitare/edilizia-pubblica/servizi/direttive-norme-tecniche.asp>
- [7] *D.M. del 28 marzo 2018, n. 69. Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184 - ter, comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.*
- [8] Frigio F., Pasquini E., Ferrotti G., Canestrari F., *Improved durability of recycled porous asphalt*, Construction and Building Materials, Volume 48, 2013, pag. 755-763. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.044>

- [9] Frigio F., Pasquini E., Canestrari F., *Laboratory Study to Evaluate the Influence of Reclaimed Asphalt Content on Performance of Recycled Porous Asphalt*, Journal of Testing and Evaluation, Volume 43, Issue 6, 2015, 1308-1322. <https://doi.org/10.1520/JTE20140024>
- [10] NCHRP Project 9-12, *Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave System*, 2000.
- [11] Maschietto M., Merlo F., *Alto modulo: un po' di chiarezza*, «Rassegna del bitume», n° 57/2007, SITEB, gennaio 2007. https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/5707_5.pdf
- [12] Petretto F., *Le reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di "aging" in laboratorio*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Bologna, Università degli studi di Bologna, dicembre 2012, tutor: Dondi G., coordinatore del dottorato: Bitelli G.. http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto_Francesco_Tesi.pdf
- [13] Merusi F., *Metodi reologici avanzati per l'analisi del comportamento dei bitumi stradali negli stati critici di esercizio*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Parma, Università degli studi di Parma, gennaio 2009, tutore: Giuliani F., coordinatore del dottorato: Mignosa P.. <https://core.ac.uk/download/pdf/41181153.pdf>
- [14] Bosworth D., *Visbreaking*, in *Enciclopedia degli idrocarburi. Volume II: Raffinazione e petrolchimica*, Roma, Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani S.p.A., Eni, 2006, cap. 5.2, pag. 229-238. https://www.treccani.it/portale/opencvms/handle404?exporturi=/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_2/229-238ITA3.pdf&%5D
- [15] Giavarini C., *Stability of bitumens produced by thermal processes*, Fuel, Volume 60, Issue 5, May 1981, pag. 401-404. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(81\)90277-5](https://doi.org/10.1016/0016-2361(81)90277-5)
- [16] Giavarini C., *Visbreaker and straight-run bitumens*, Fuel, Volume 63, Issue 11, 1984, pag. 1515-1517. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(84\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0016-2361(84)90217-5)
- [17] Giavarini C., Saporito S., *Oxidation of visbreaker bitumens*, Fuel, Volume 68, Issue 7, July 1989, pag. 943-946. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(89\)90136-1](https://doi.org/10.1016/0016-2361(89)90136-1)

- [18] Mondì G., Simone A., Bonini A., *Metodologie di impiego della pressa giratoria (la parte)*, «Rassegna del bitume», n° 34/2000, SITEB, gennaio 2000. https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/3400_3.pdf
- [19] Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D., *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*, Journal of the American Chemical Society, 1955, 77, 14, 3701–3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>
- [20] Santagata F.A., Canestrari F., Pasquini E., *Controllo della Produzione, Verifica delle Prestazioni e Predisposizione di Norme Tecniche di Capitolato per Miscela di Conglomerato Bituminoso Tipo Asphalt Rubber*, Rapporto Finale della Ricerca Sperimentale novembre 2009, CIRS Centro Interuniversitario sperimentale di Ricerca Stradale ed aeroportuale, Asphalt Rubber Italia. <http://www.asphaltrubberitalia.com/wp-content/uploads/2013/05/Rapporto-Finale-CIRS-definitivo1.pdf>
- [21] Olard F., Di Benedetto H., *General “2S2PID” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes*, Road Materials and Pavement Design, Volume 4, Issue 2, 2003, pag. 185-224. <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946>
- [22] Gourdon E., Sauzeat C., Di Benedetto H., Bilodeau K., *Seven-Parameter Linear Viscoelastic Model Applied to Acoustical Damping Materials*, Journal of Vibration and Acoustics Transactions of the ASME, ASME International, 2015, 137 (6), pp.061003. (10.1115/1.4030719). (hal-01829841). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01829841/file/Gourdon2015.pdf>
- [23] Carpani C., Bocci E., Bocci M., *Rheological and performance characterisation of the bitumen recovered from different emulsions for cold mixtures*, Road Mater. Pavement Des. 22 (2021) 214-231. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1906735>
- [24] Graziani A., Mignini C., Bocci E., Bocci M., *Complex Modulus Testing and Rheological Modeling of Cold-Recycled Mixtures*, Journal of Testing and Evaluation 48, no. 1 (2020): 120-133. <https://doi.org/10.1520/JTE20180905>

- [25] Rowe G.M., King G., Anderson M., *The Influence of Binder Rheology on the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects*, Journal of Testing and Evaluation, Volume 42, Issue 5, 2014, 1063-1072. <https://doi.org/10.1520/JTE20130245>
- [26] Ogbo C., Kaseer F., Oshone M., Sias J.E., Martin A.E., *Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements*, Road Materials and Pavement Design, Volume 20, Issue sup1: EATA Granada, 2019, S299-S314. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1592010>
- [27] *Manuale dell'Ingegneria Civile*, a cura di Riva P.A. e Guadagni A., Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., 2018.
- [28] *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Terza edizione, Volume terzo, Bologna, Zanichelli editore S.p.A., E.S.A.C. Edizioni Scientifiche Anna Cremonese, settembre 2006.
- [29] Sayegh G., *Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures*, Second International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, MI, 1967, pag. 743–755.
- [30] Bocci E., Prosperi E., *Analysis of different reclaimed asphalt pavements to assess the potentiality of RILEM cohesion test*, Materials and Structures 53, 117 (2020). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01551-3>
- [31] Bocci E., Prosperi E., Mair V., Bocci M., *Ageing and Cooling of Hot-Mix-Asphalt during Hauling and Paving—A Laboratory and Site Study*, Sustainability, 12(20), 2020, 8612. <https://doi.org/10.3390/su12208612>
- [32] Mazzoni G., Bocci E., Canestrari F., *Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures*, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 5, Issue 3, 2018, pag. 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.001>
- [33] Bocci E., Mazzoni G., Canestrari F., *Ageing of rejuvenated bitumen in hot recycled bituminous mixtures: influence of bitumen origin and additive type*, Road Materials and Pavement Design, Volume 20, Issue sup1: EATA Granada, 2019, pag. S127-S148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1587492>
- [34] Di Benedetto H., Olard F., Sauzéat C., Delaporte B., *Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes*, Road Materials and

- Pavement Design, Volume 5, Issue sup1, 2004, pag. 163-202.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992>
- [35] *Extreme Recycling of Asphalt (ERA)*, progetto di ricerca in collaborazione tra Pavimental S.p.A e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche.
<https://extremerecyclingofasphalt.com>
- [36] Calesso A., *Caratterizzazione prestazionale avanzata della resistenza alla fessurazione per fatica di conglomerati bituminosi per strati di base*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, luglio 2018, Relatori: Santagata E., Riviera P.P., Dalmazzo D.. <https://webthesis.biblio.polito.it/8184/1/tesi.pdf>
- [37] Ghiraldini S., *Studio sperimentale per la caratterizzazione reologica di conglomerati bituminosi tramite prove di flessione su quattro punti*, Tesi di Laurea Specialistica, Università di Bologna, a.a. 2007/2008, Relatore: Dondi G., Correlatori: Sangiorgi C., Picariello F., Cocurullo A..
https://amslaurea.unibo.it/196/1/Tesi_Sara_Ghiraldini.pdf
- [38] Sito internet del macchinario *UTM-30*. <https://www.controls-group.com/eng/universal-testing-machines-utm/servo-hydraulic-universal-testing-machine-utm-30-kn-cap.php>
- [39] UTM systems Brochure, *UTM-30*, pag. 6-7. <https://www.controls-group.com/uploads/media/default/0001/04/a7dceef8183cdbf1e0baccf56a23f2c7b1d93daf.pdf>
- [40] Schede tecniche e manuali delle apparecchiature da laboratorio impiegate nel lavoro sperimentale trattato.
- [41] Schede tecniche degli additivi rigeneranti di bitume impiegati, identificati nel lavoro sperimentale trattato come: *additivo A* e *additivo B*.

Norme UNI EN

- *UNI EN 13108-1:2016, Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo, 21 luglio 2016.*
- *UNI EN 13108-8:2016, Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero, 21 luglio 2016.*
- *UNI EN 13043:2013, Aggregati per miscela bituminosa e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico, 20 giugno 2013 (ritirata senza sostituzione).*
- *UNI EN 12697-1:2020, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 1: Contenuto di legante solubile, 16 aprile 2020.*
- *UNI EN 12697-3:2019, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 3: Recupero del bitume: Evaporatore rotante, 7 marzo 2019.*
- *UNI EN 12697-5:2019, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 5: Determinazione della massa volumica massima, 7 marzo 2019.*
- *UNI EN 12697-6:2020, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi, 7 maggio 2020.*
- *UNI EN 12697-8:2019, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi, 7 marzo 2019.*
- *UNI EN 12697-26:2018, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza, 2 agosto 2018.*
- *UNI EN 12697-31:2019, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria, 23 aprile 2019.*
- *UNI EN 12697-35:2016, Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 35: Miscelazione in laboratorio, 12 maggio 2016.*
- *UNI EN 1426:2015, Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione della penetrazione con ago, 27 agosto 2015.*
- *UNI EN 1427:2015, Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione del punto di rammollimento - Metodo biglia e anello, 27 agosto 2015.*