



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
(Indirizzo Trasporti)

**COMPORTAMENTO REOLOGICO DI LEGANTI
BITUMINOSI A RIDOTTO IMPATTO AMBIENTALE:
CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI BITUMI
E MASTICI PER CONGLOMERATI BITUMINOSI
TIEPIDI CONTENENTI SCORIE DI ACCIAIERIA**

Relatore: Prof. Ing. Marco Pasetto

Correlatore: Ing. Emiliano Pasquini

Correlatore: Ing. Giovanni Giacomello

Laureando: ANDREA BALIELLO

ANNO ACCADEMICO 2014 - 2015

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 – La tradizione empirica.....	5
1.1. IL PROTOCOLLO MARSHALL	5
1.1.1. L’analisi granulometrica.....	6
1.1.2. La prova Marshall.....	8
1.2. IL NUOVO APPROCCIO PRESTAZIONALE.....	11
CAPITOLO 2 – Il protocollo Superpave.....	13
2.1. INQUADRAMENTO.....	14
2.2. I CAMPIONI.....	16
2.2.1. La procedura R.T.F.O.T.....	16
2.2.2. La procedura P.A.V.....	17
2.3. CARATTERISTICHE DEL METODO.....	18
2.3.1. Specifiche sui bitumi.....	18
2.3.2. Il mix-design.....	18
2.3.3. Il trattamento dei campioni.....	20
2.4. IL PROTOCOLLO.....	22
2.4.1. Addensamento e vuoti.....	22
2.4.2. Definizioni e parametri.....	23
2.4.3. Analisi volumetrica.....	26
2.4.3.1. Curva granulometrica.....	28
2.4.4. Prescrizioni e indicazioni.....	30
CAPITOLO 3 – Generalità sui materiali	31
3.1. GLI AGGREGATI.....	31
3.1.1. Gli aggregati calcarei.....	41
3.1.2. Le scorie di acciaieria.....	42
3.2. LEGANTE: IL BITUME.....	47
3.2.1. Le prove sui bitumi.....	49
3.3. I CONGLOMERATI BITUMINOSI.....	54
3.3.1. Conglomerati tradizionali.....	56
3.3.2. Conglomerati tiepidi.....	59
3.3.2.1. La produzione.....	61
3.3.2.2. Studi e standard normativi.....	62
3.3.2.3. L’utilizzo dei W.M.A.....	65
CAPITOLO 4 – Teoria reologica.....	69
4.1. LA TEORIA VISCO-ELASTICA.....	69
4.1.1. Il solido elastico.....	70
4.1.2. Il fluido viscoso.....	71
4.1.2.1. Fluido newtoniano, non-newtoniano.....	74
4.1.2.1.1. Fluido pseudoplastico (shear thinning).....	75
4.1.2.1.2. Fluido dilatante (shear thickening).....	75

4.1.2.1.3. Fluido visco-plastico	76
4.1.2.1.4. Fluido tissotropico	76
4.2. GRANDEZZE REOLOGICHE DEL LEGANTE BITUMINOSO	78
4.2.1. Controllo di tensione	78
4.2.2. Controllo di deformazione	80
4.3. RAPPRESENTAZIONE DELLE GRANDEZZE REOLOGICHE	83
4.3.1. Piano di Black	83
4.3.2. Piano di Cole-Cole	84
4.3.3. Master curve	85
4.3.3.1. Principio di sovrapposizione tempo-temperatura	85
4.3.3.2. Sviluppo delle master curves	88
4.3.3.3. Modello di Christensen and Anderson	90
4.3.3.4. Modello di Christensen and Anderson modificato	94
CAPITOLO 5 – Stato dell’arte	97
5.1. ARTICOLI E PUBBLICAZIONI	97
5.1.1. L’utilizzo degli aggregati	99
5.1.2. I conglomerati W.M.A.	105
5.1.3. Studi reologici con D.S.R.	112
5.1.4. Sperimentazione con D.S.R. applicata a bitumi modificati	122
CAPITOLO 6 – Il reometro D.S.R.	127
6.1. D.S.R. ANTON PAAR M.C.R. 302	127
6.1.1. Le componenti	128
6.1.2. Configurazioni e pre-settaggi	133
6.1.3. Predisposizione dei campioni	141
CAPITOLO 7 – Il protocollo sperimentale	147
7.1. MATERIALI UTILIZZATI IN LABORATORIO	147
7.1.1. Legante bituminoso	147
7.1.2. Additivo W.M.A.	149
7.1.3. I filler	152
7.1.3.1. Particle grading	153
7.1.3.2. Particle density	156
7.1.3.3. Void rigden	157
7.1.3.4. Delta ring and ball	160
7.2. CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI	160
7.3. PROGRAMMA SPERIMENTALE	163
7.3.1. Caratterizzazione dei bitumi e dei mastici	164
7.4. I TEST	165
7.4.1. Prova di “amplitude sweep”	165
7.4.2. Prova di “frequency sweep”	168
7.4.3. Prova “creep recovery test” (M.S.C.R.)	170
CAPITOLO 8 – Analisi dei dati	177
8.1. RISULTATI DEI TEST	177
8.1.1. Serie 5070H	177
8.1.2. Serie 5070H_L100	198
8.1.3. Serie 5070H_S100	200

8.1.4. Serie 5070H_PAV	202
8.1.5. Serie 5070H_PAV_L100	203
8.1.6. Serie 5070H_PAV_S100.....	205
8.1.7. Serie 5070W.....	206
8.1.8. Serie 5070W_L100	208
8.1.9. Serie 5070W_S100	210
8.1.10. Serie 5070W_PAV.....	212
8.1.11. Serie 5070W_PAV_L100.....	214
8.1.12. Serie 5070W_PAV_S100.....	215
8.2. ELABORAZIONE DATI.....	217
8.2.1. Test “amplitude sweep”	217
8.2.2. Test “frequency sweep”	221
8.2.3. Test “creep recovery” (M.S.C.R.).....	231
CONCLUSIONI.....	245
BIBLIOGRAFIA	251
NORMATIVA.....	255

Lista Figure

Figura 1.1. <i>Esempio di setacciatore elettromagnetico</i>	7
Figura 1.2. <i>Dispositivo di test Marshall</i>	8
Figura 1.3. <i>Compattatore Marshall</i>	8
Figura 1.4. <i>Provini Marshall</i>	9
Figura 1.5. <i>Dettaglio schiacciamento</i>	9
Tabella 1.1. <i>Valori Marshall prescritti da capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a.</i>	9
Grafico 2.1. <i>Esempio: curve di addensamento per miscele con caratteristiche diverse</i>	25
Grafico 2.2. <i>Piano grafico della curva</i>	29
Grafico 2.3. <i>Esempio di curva granulometrica</i>	29
Tabella 2.1. <i>Differenze tra le diverse normative attualmente in vigore</i>	21
Tabella 2.2. <i>Elenco delle variabili</i>	23
Tabella 2.3. <i>Definizione di N_{desig} in funzione della temperature massima di progetto</i>	24
Tabella 2.4. <i>Misure dei setacci standard S.H.R.P., espresse in mm</i>	28
Tabella 2.5. <i>Prescrizioni protocollo e indicazioni</i>	30
Figura 3.1. <i>Determinazione del valore del blu di metilene</i>	35
Figura 3.2. <i>Determinazione della forma dell'aggregato</i>	35
Figura 3.3. <i>Apparecchiatura per prova L.A. – Sfere utilizzate nel test</i>	36
Figura 3.4. <i>Apparecchiatura per prova C.L.A.</i>	36
Figura 3.5. <i>Strumento utilizzato per il test all'usura "Micro-Deval"</i>	37
Figura 3.6. <i>Pietrisco calcareo 40/70</i>	42
Figura 3.7. <i>Pietrisco calcareo 0/25</i>	42
Figura 3.8. <i>Dispositivo per test di penetrazione</i>	50
Figura 3.9. <i>Dispositivo per la prova del punto di rammollimento</i>	51
Figura 3.10. <i>Dispositivo per la prova del punto di rottura</i>	53
Figura 3.11. <i>Tipici ammaloramenti: basse temperatura; fatica; ormaiamento</i>	56
Figura 3.12. <i>Scarificatore in azione</i>	58
Figura 3.13. <i>Modello di vibrofinitrice</i>	58
Figura 3.14. <i>Finitura con rullo</i>	58
Figura 3.15. <i>Sistema di impianti per la miscelazione del conglomerato bituminoso</i>	63
Figura 3.16. <i>Sistema di filtraggio delle emissioni</i>	64
Grafico 3.1. <i>Andamento emissioni/temperature W.M.A.</i>	66
Tabella 3.1. <i>Aggregati per miscele bituminose e trattamenti per strade, aeroporti</i>	33
Tabella 3.2. <i>Tabella di accettazione dei campioni – Esempio di curva granulometrica classica</i>	34
Tabella 3.3. <i>Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di base</i>	38
Tabella 3.4. <i>Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di binder</i>	39
Tabella 3.5. <i>Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di usura</i>	40
Tabella 3.6. <i>Prove classiche e normative di riferimento</i>	49
Tabella 3.7. <i>Bitumi: classi di penetrazione</i>	50
Tabella 3.8. <i>Prescrizioni conglomerati a caldo - capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a.</i>	59
Tabella 3.9. <i>Statistiche sull'utilizzo dei W.M.A.</i>	65
Figura 4.1. <i>Flusso viscoso tra 2 piani posti a distanza z</i>	71
Figura 4.2. <i>Flusso viscoso tra 2 piani posti a distanza z</i>	72
Figura 4.3. <i>Flusso capillare</i>	72
Figura 4.4. <i>Flusso piastra-cono</i>	72
Figura 4.5. <i>Modello di Rouse, 1953 - Schematizzazione della catena polimerica</i>	87
Grafico 4.1. <i>Fluido newtoniano / non-newtoniano</i>	74
Grafico 4.2. <i>Controllo di tensione oscillatoria: onda di tensione - onda di deformazione</i>	79

Grafico 4.3. Modulo elastico / Modulo viscoso – Piano complesso.....	82
Grafico 4.4. Piano di Black: rappresentazione di $G^* - \delta$	83
Grafico 4.5. Piano di Cole-Cole: rappresentazione di $G' - G''$	84
Grafici 4.6. Piano di Cole-Cole: Solido elastico / Liquido viscoso.....	84
Grafico 4.7. Costruzione Master Curve – Principio T.T.S. alla temperatura di riferimento	86
Grafico 4.8. Modello Christensen and Anderson: caratterizzazione master curve.....	90
Grafico 4.9. Estratto – Christensen , Anderson, Rowe – Petersen Conference – Luglio 2008.....	92
Grafico 4.10. Estratto – Christensen , Anderson, Rowe – Petersen Conference – Luglio 2008.....	93
Grafico 4.11. Parametri caratteristici della master curve nel modello C.A.M. modificato	95
Tabella 4.1. Ritardo Δt - Angolo di fase δ [tensione controllata].....	79
Tabella 4.2. Ritardo Δt - Angolo di fase δ [deformazione controllata].....	81
Tabella 4.3. Caratteristiche standard master curves.....	89
Tabella 4.4. Parametri caratteristici modello Christensen and Anderson.....	91
Grafico 5.1. Rappresentazione grafica dei risultati.....	113
Grafico 5.2. Modulo dinamico complesso	116
Grafico 5.3. Angolo di fase	116
Grafico 5.4. Indice della resistenza a fatica	116
Grafico 5.5. Prove di “frequency sweep”: Master Curves.....	120
Grafico 5.6. Risultati dei test “time sweep”	121
Grafico 5.7. Schema di carico ciclico “amplitude sweep”	121
Grafico 5.8. Risultati test “amplitude sweep” – Tensione vs. Deformazione.....	121
Tabella 5.1. Elenco delle pubblicazioni analizzate.....	97
Tabella 5.2. Caratteristiche fisiche – Estratto dall’articolo.....	101
Tabella 5.3. Risultati dei test D.S.R.	113
Tabella 5.4. Risultati dei test D.S.R. in funzione di temperatura e periodi di invecchiamento.....	115
Tabella 5.5. Bitumi modificati: polimeri utilizzati.....	120
Figura 6.1. Reometro D.S.R. Anton Paar M.C.R. 302	127
Figura 6.2. Piatto inferiore di riscaldamento	128
Figura 6.3. Cella Peltier.....	129
Figura 6.4. Retro della testa di carico	130
Figura 6.5. Attacco testa-appendice superiore	130
Figura 6.6. Sezione longitudinale	131
Figura 6.7. Reometro Anton Paar M.C.R. 302.....	132
Figura 6.8. Procedura di inizializzazione.....	133
Figura 6.9. Settaggio del “Zero Gap”	134
Figura 6.10. “Lift Position” – Regolazione verticale	135
Figura 6.11. Procedura “Measuring System”	136
Figura 6.12. Procedura di “Motor Adjustment”	137
Figura 6.13. Parametri di configurazione “Motor Adjustment”	137
Figura 6.14. Procedura di verifica “Air Check” pre/post “Motor Adjustment”	139
Figura 6.15. Procedura “Drive”	139
Figura 6.16. Procedura “Measuring Position”	142
Figura 6.17. Controllo della temperatura	142
Figura 6.18. Avviso di “Trimming”	143
Figura 6.19. Maschera di prova - interazione col pannello di controllo del reometro	144
Tabella 6.1. Accuratezze - A.A.S.H.T.O. T 315-10	132
Tabella 6.2. Sequenza procedure pre-test	140
Tabella 6.3. Teste di carico utilizzate	140
Tabella 6.4. Teste di carico - gap suggeriti.....	141
Tabella 6.5. Lista “Status” istantanei di test.....	145
Figura 7.1. Porzione di filler calcareo – 40 g.....	152
Figura 7.2. Porzione di filler di scoria E.A.F. – 40 g.....	153
Figura 7.3. Apparecchiatura Rigden.....	159

Figura 7.4. <i>RHODORSIL® RTV 3527 A - RHODORSIL® RTV 3527 B</i>	162
Figura 7.5. <i>Forme alluminio per creazione stampi siliconici</i>	163
Figura 7.6. <i>Stampi siliconici a solidificazione avvenuta</i>	163
Figura 7.7. <i>Stampo siliconico - confezionamento campioni</i>	164
Figura 7.8. <i>Parametri di impostazione software “RheoPlus”</i>	167
Figura 7.9. <i>Parametri di impostazione software “RheoPlus”</i>	170
Figura 7.10. <i>Prova “frequency sweep” - impostazioni delle temperature</i>	170
Figura 7.11. <i>Monitoraggio temperatura pre-test</i>	171
Figura 7.12. <i>Configurazioni prova M.S.C.R. software “RheoPlus”</i>	173
Grafico 7.1. <i>Assortimento granulometrico porzione fine – Filler calcareo</i>	156
Grafico 7.2. <i>Assortimento granulometrico porzione fine – Filler scoria E.A.F.</i>	156
Grafico 7.3. <i>Esempio “amplitude sweep”: curva modulo - deformazione</i>	168
Grafico 7.4. <i>Test anomalo – errore nella fase iniziale</i>	168
Grafico 7.5. <i>Tipica deformazione: bitume 50/70 (tensioni $\tau = 0.1\text{kPa}$ e $\tau = 3.2\text{kPa}$)</i>	173
Grafico 7.6. <i>Tipica deformazione: mastice 50/70 con aggiunta di filler calcareo</i>	174
Grafico 7.7. <i>Dettaglio: deformazione ciclica in fase di test</i>	174
Grafici 7.8. <i>Deformazione recuperabile. non recuperabile</i>	175
Grafico 7.9. <i>Legame Recovery R - Compliance J_m</i>	175
Tabella 7.1. <i>Bitume: specifiche tecniche – ENI</i>	147
Tabella 7.2. <i>Dati - confronto bitume non modificato / modificato</i>	149
Tabella 7.3. <i>Diverse metodologie di approvvigionamento</i>	150
Tabella 7.4. <i>Specifiche tecniche da fornitore</i>	151
Tabella 7.5. <i>Confronto R.A.P. tradizionali / warm</i>	152
Tabella 7.6. <i>Risultati particle grading – Filler calcareo</i>	155
Tabella 7.7. <i>Risultati particle grading – Filler scoria E.A.F.</i>	155
Tabella 7.8. <i>Void Rigden – Determinazione della porosità intergranulare (E.N. 1097-4)</i>	160
Tabella 7.9. <i>Scheda tecnica RHODORSIL® RTV 3527 A e B</i>	162
Tabella 7.10. <i>Legenda nomenclatura campioni e prove</i>	164
Tabella 7.11. <i>Elenco test svolti in laboratorio</i>	165
Tabella 7.12. <i>Caratterizzazione bitumi e mastici: penetrazione (EN 1426)</i>	165
Tabella 7.13. <i>Caratterizzazione bitumi e mastici: rammollimento (EN 1427)</i>	166
Grafico 8.1. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	179
Grafico 8.2. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	185
Grafico 8.3. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	192
Grafico 8.4. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test - Alte temperature</i>	197
Grafico 8.5. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	198
Grafico 8.6. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	198
Grafico 8.7. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	199
Grafico 8.8. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature</i>	199
Grafico 8.9. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	200
Grafico 8.10. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	200
Grafico 8.11. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	201
Grafico 8.12. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature</i>	201
Grafico 8.13. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	202
Grafico 8.14. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	202
Grafico 8.15. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	203
Grafico 8.16. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	203
Grafico 8.17. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	204
Grafico 8.18. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	204
Grafico 8.19. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	205
Grafico 8.20. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	205
Grafico 8.21. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	206
Grafico 8.22. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	206
Grafico 8.23. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	207
Grafico 8.24. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	207

Grafico 8.25. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature</i>	208
Grafico 8.26. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	208
Grafico 8.26. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	209
Grafico 8.27. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	209
Grafico 8.28. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature</i>	210
Grafico 8.29. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	210
Grafico 8.30. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	211
Grafico 8.31. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	211
Grafico 8.32. <i>Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature</i>	212
Grafico 8.33. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	212
Grafico 8.34. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	213
Grafico 8.35. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	213
Grafico 8.36. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	214
Grafico 8.37. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	214
Grafico 8.38. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	215
Grafico 8.39. <i>Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test</i>	215
Grafico 8.40. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	216
Grafico 8.41. <i>Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	216
Grafico 8.42. <i>Tensione / deformazione – Materiali per miscele “a caldo</i>	218
Grafico 8.42. <i>Tensione / deformazione – Materiali per miscele “tiepide – warm”</i>	218
Grafico 8.43. <i>Modulo complesso / deformazione – Materiali per miscele “a caldo”</i>	219
Grafico 8.44. <i>Modulo complesso / deformazione – Materiali per miscele “tiepide - warm”</i>	219
Grafico 8.45. <i>Esempio: 5070H – Andamento degli shift factor $a(T)$</i>	222
Grafico 8.46. <i>Esempio: 5070H_L100 – Master curve sperimentale / teorica</i>	224
Grafico 8.47. <i>Esempio: 5070H_L100 – Piano di Black</i>	224
Grafico 8.48. <i>Esempio: 5070H_L100 – Piano Cole-Cole</i>	225
Grafico 8.49. <i>Master curves – influenza dell’additivo warm sui bitumi</i>	225
Grafico 8.50. <i>Master curves – influenza dell’additivo warm sui mastici calcarei</i>	226
Grafico 8.51. <i>Master curves – influenza dell’additivo warm sui mastici a base di scoria</i>	227
Grafico 8.52. <i>Master curves – bitumi e mastici “hot”</i>	228
Grafico 8.53. <i>Master curves – bitumi e mastici “warm”</i>	228
Grafico 8.54. <i>Master curves – bitumi e mastici “hot” invecchiati (P.A.V.)</i>	229
Grafico 8.55. <i>Master curves – bitumi e mastici “warm” invecchiati (P.A.V.)</i>	230
Grafico 8.56. <i>Prova M.S.C.R. – Esempio: campione 5070H – $\tau = 0.1$ kPa</i>	232
Grafico 8.57. <i>“Compliance” non recuperabile alla tensione di 0.1 kPa – Bitumi e mastici</i>	235
Grafico 8.58. <i>“Compliance” non recuperabile alla tensione di 3.2 kPa – Bitumi e mastici</i>	236
Grafico 8.59. <i>J_{nr} – Suscettibilità alla tensione $\tau = [0.10 \div 3.2]$ kPa – Bitumi</i>	237
Grafico 8.60. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della temperatura – τ costante: 0.10 kPa – Bitumi e mastici</i>	240
Grafico 8.61. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della temperatura – τ costante: 3.2 kPa – Bitumi e mastici</i>	240
Grafico 8.62. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della temperatura – τ costante: 10.0 kPa – Mastici</i>	240
Grafico 8.63. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della tensione – T costante: 58 °C – Bitumi e mastici</i>	241
Grafico 8.64. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della tensione – T costante: 64 °C – Bitumi e mastici</i>	241
Grafico 8.65. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della tensione – T costante: 70 °C – Bitumi e mastici</i>	242
Grafico 8.66. <i>“J_{nr}/J_{TOT}” – Influenza della tensione – T costante: 76 °C – Bitumi e mastici</i>	242
Tabella 8.1. <i>Risultati Amplitude Sweep Test</i>	177
Tabella 8.2. <i>Risultati Frequency Sweep Test - Basse temperature</i>	179
Tabella 8.3. <i>Risultati Frequency Sweep Test - Alte temperature</i>	185
Tabella 8.4a. <i>Risultati M.S.C.R. Test - $[T = 58$ °C] - Parte 1 $[\tau = 0.1$ kPa]</i>	192
Tabella 8.4b. <i>Risultati M.S.C.R. Test - $[T = 58$ °C] – Parte 2 $[\tau = 3.2$ kPa]</i>	194
Tabella 8.5. <i>Estratto elaborazioni “Amplitude sweep”</i>	217
Tabella 8.6. <i>Deformazioni limite per elasticità lineare</i>	220
Tabella 8.7. <i>Elaborazione master curve – Passo 1: determinazione degli shift factor $a(T)$</i>	222
Tabella 8.8. <i>Elaborazione master curve – Passo 2: determinazione parametri modello C.A.M.</i>	223
Tabella 8.9. <i>Elaborazione M.S.C.R. – Esempio: campione 5070H, $T = 76$ °C</i>	231
Tabella 8.10. <i>Elaborazione M.S.C.R. – Sintesi parametri – Esempio: campione 5070H</i>	232
Tabella 8.11. <i>Elaborazione M.S.C.R. – Sintesi finale</i>	233

Tabella 8.12. <i>Influenza dei filler – Rapporto J_r: J_{nr} mastice vs. J_{nr} bitume</i>	236
Tabella 8.13. Rapporto “ J_{nr}/J_{TOT} ” di tutti i campioni.....	239

Introduzione

Le sovrastrutture che costituiscono le opere stradali ed aeroportuali risultano inevitabilmente sottoposte alle continue azioni ammalorative causate principalmente dal transito veicolare ripetuto nel tempo, e dagli agenti atmosferici a cui sono soggette. Il forte incremento dei volumi di traffico a cui si è assistito negli ultimi decenni, come per altro il progresso tecnologico delle componenti veicolari, hanno determinato un notevole incremento delle reali sollecitazioni, enfatizzando l'importanza delle tecniche di realizzazione delle pavimentazioni. Negli ultimi anni si è quindi assistito allo sviluppo di nuove tecnologie di costituzione e confezionamento dei conglomerati da pavimentazione, con lo scopo di garantire adeguati standard prestazionali, di durabilità e di prevenzione dei tipici fenomeni di degrado in esercizio. Unitamente alle esigenze sopra citate, lo sviluppo di nuove tecniche costruttive può trovare incentivo anche in ambiti diversi: la crescente considerazione di tematiche come la salvaguardia ambientale (per ciò che riguarda la limitazione degli inquinanti e il risparmio di risorse energetiche mediante il riciclo), e la non marginale attenzione a considerazioni di tipo economico risultano sicuramente ulteriori spinte in tale direzione. Lo studio effettuato nella seguente Tesi pone quindi le sue basi sulla ricerca di materiali stradali che combinino ad elevati standard prestazionali, la riduzione dell'impatto ambientale in fase realizzativa e manutentiva.

Lo studio si pone l'obiettivo di analizzare le caratteristiche di miscele confezionate mediante l'utilizzo di materiali cosiddetti "innovativi", generalmente non impiegati per la costituzione dei tradizionali conglomerati bituminosi miscelati a caldo: in particolare si propone uno studio comparativo tra bitumi tradizionali e "modificati", e mastici realizzati con inerte tradizionale e di riciclo; si andranno a confrontare bitumi vergini e bitumi modificati con additivo tiepido (warm), e mastici costituiti con comune filler calcareo e mastici di filler riciclato da scorie di acciaieria.

L'aggiunta di additivi warm (tiepidi) al legante bituminoso, consente di ottenere un conglomerato denominato tiepido (W.M.A. - Warm Mix Asphalt) con la principale peculiarità di possedere minori temperature di produzione e applicazione in opera, anche di 20÷40 °C inferiori alle temperature necessarie a tali operazioni per un conglomerato bituminoso tradizionale (H.M.A. - Hot Mix Asphalt).

La scoria d'acciaieria risulta essere un materiale di scarto disponibile in grandi quantità ad un costo relativamente basso: di conseguenza il riutilizzo del semplice "rifiuto industriale" come "risorsa" può garantire notevoli vantaggi dal punto di vista economico.

Lo scopo principale dello studio è quindi la verifica dell'idoneità dei materiali innovativi per la garanzia di standard prestazionali paragonabili a quelli tipici dei materiali tradizionalmente impiegati. La verifica prestazionale si esegue mediante un protocollo sperimentale che prevede uno studio reologico con reometro dinamico a taglio (D.S.R.).

La reologia è una scienza relativamente giovane, che sostituisce le osservazioni di carattere filosofico e letterario sviluppate nei secoli più remoti: nasce dall'esigenza di descrivere scientificamente il comportamento meccanico di quei materiali non obbedienti alle classiche leggi della viscosità e dell'elasticità introdotte nel Diciottesimo secolo. I bitumi impiegati nella realizzazione di sovrastrutture stradali ed aeroportuali, estremamente sensibili alle azioni esterne e alle temperature, rientrano pienamente nell'ambito di studio di tali materiali: di conseguenza, l'approccio reologico risulta ormai parte integrante del patrimonio scientifico dell'ingegneria stradale.

L'utilizzo del reometro D.S.R. consente agevolmente lo studio delle proprietà visco-elastiche di materiali diversi, ed è ormai comunemente impiegato per l'analisi dei bitumi: in particolare, permette lo sviluppo di test su diversi scenari, per quanto riguarda le temperature e le modalità di sollecitazione dei campioni. Il protocollo prevede quindi una serie di test con scopi diversi, che possono simulare i differenti meccanismi di degrado tipici delle pavimentazioni, in particolare sia alle basse sia alle alte temperature. In aggiunta, noto come le caratteristiche meccaniche delle pavimentazioni siano fortemente influenzate dal grado di ossidazione delle componenti organiche dei bitumi, il protocollo prevede l'ulteriore studio del fenomeno di *aging* (invecchiamento).

Il seguente elaborato è concettualmente suddiviso in tre diverse parti. Inizialmente, si presentano tutti gli aspetti generali che inquadrano e definiscono l'ambito di sviluppo dello studio: si descrivono, in linea teorica, i materiali e le tecnologie di interesse, i protocolli normativi di riferimento e i principali fondamenti della reologia applicata ai materiali visco-elastici, quali il bitume. In questa fase viene anche riportata un'ampia bibliografia sullo Stato dell'Arte riguardante studi concettualmente simili, o che implicano l'impiego di materiali affini a quelli utilizzati in sede di test. La sezione centrale illustra invece, nel dettaglio, il protocollo sperimentale sviluppato in laboratorio: si approfondiscono svariati temi quali la caratterizzazione dei materiali direttamente impiegati, il funzionamento dell'apparecchiatura di prova e la definizione dei test previsti dal protocollo. Nell'ultima parte, si riportano i risultati di laboratorio e l'elaborazione dei dati secondo i modelli descritti nella sezione riguardante la teoria reologica: si tenta infine di dare un'interpretazione degli elaborati con l'obiettivo di analisi degli scopi inizialmente prefissati.

Capitolo 1

La tradizione empirica

I conglomerati bituminosi impiegati nella realizzazione delle pavimentazioni stradali sono generalmente soggetti alla progressiva variazione delle caratteristiche meccaniche e funzionali, a causa dell'azione degradante indotta sia dal traffico, sia dagli agenti atmosferici. Le principali conseguenze di tali fenomeni sono, di norma, i numerosi ammaloramenti che si possono riscontrare durante la vita utile della pavimentazione, quali fessurazioni, ormaie, avvallamenti e sgranamenti superficiali, levigazione degli aggregati o, ancora, risalita del bitume per lo strato di usura. Al verificarsi del degrado, contribuiscono anche le caratteristiche degli aggregati, poiché coinvolti nei fenomeni di frammentazione, abrasione e levigazione, in funzione delle loro caratteristiche intrinseche e delle caratteristiche meccaniche della miscela, ossia in funzione dell'assortimento granulometrico proprio del conglomerato.

Nell'ottica attuale, il progetto delle miscele bituminose utilizzabili nel campo dei trasporti, si pone l'obiettivo di determinare i materiali più adatti in funzione delle condizioni di esercizio in cui andrà a lavorare la pavimentazione. L'approccio classico, ancora largamente usato e consolidato, è basato su test di tipo empirico, con lo scopo di verificare il soddisfacimento di alcuni parametri, comunque non direttamente correlati con la realtà. Per altro, è ancora richiesto come requisito nei capitolati, ed è costituito essenzialmente dal protocollo Marshall; per la semplicità di sviluppo dei test, le cui strumentazioni necessarie sono di facile reperibilità e utilizzo; in secondo luogo, grazie alle modeste dimensioni delle apparecchiature, che possono essere persino trasportabili, qualora ve ne fosse la necessità.

1.1. Il protocollo Marshall

Il primo passo per la progettazione della miscela bituminosa è il design degli inerti; la scelta della tipologia di aggregati e, non meno importante, la progettazione dell'assortimento granulometrico (ciò che comunemente viene denominato "scheletro della miscela"). Con l'obiettivo di progettare

pavimentazioni stabili e durevoli nel tempo, risulta importante garantire il corretto bilanciamento tra parti grosse e parti fine, e, in secondo luogo, una percentuale di vuoti controllata.

Il protocollo Marshall, di norma richiesto dai capitolati, consiste nello sviluppo di una serie di prove Marshall, al fine di determinare il contenuto ottimo di bitume (O.B.C. - Optimum Bitumen Content) tipico di un determinato “scheletro di miscela”: una volta scelto il tipo di aggregato, e progettandone l'assortimento granulometrico, vengono eseguite diverse prove Marshall variando la percentuale di bitume presente (suggerita generalmente nel range tra il 5,0% e il 6,5%, con scarto di 0,5%, al fine di ottenere risultati con apprezzabili differenze). Campionati i dati, si va a determinare la percentuale più corretta per garantire i migliori parametri in termini di stabilità, propri della miscela in esame.

1.1.1.L'analisi granulometrica

L'analisi delle dimensioni dell'aggregato e la costruzione della curva granulometrica si effettuano secondo le procedure classiche, standardizzate nella norma A.S.T.M. D-422. La caratterizzazione dettagliata sarà descritta all'interno del capitolo che tratta il protocollo Superpave. Tuttavia, si riportano ora, sommariamente, le modalità di esecuzione dell'analisi e di calcolo delle distribuzioni dei pesi.

L'analisi granulometrica per setacciatura si effettua utilizzando un'apposita serie di setacci disposti in serie, ognuno dei quali trattiene la frazione di solido i cui granuli hanno dimensioni maggiori dei fori del setaccio. Dopo avere impilato i setacci, un campione pesato di inerte viene adagiato sul piatto superiore, ovvero il setaccio a maglia più larga. I piatti inferiori sono costituiti da setacci a maglia via via più fine: quello alla base della colonna è costituito da una scodella piana, in cui vengono raccolti tutti i granuli con diametro minore dell'apertura della maglia del setaccio inferiore. Alla colonna di setacci viene impresso un movimento di scuotimento, mediante un'apposita apparecchiatura che agisce per un determinato lasso di tempo, passato il quale si procede alla pesatura delle frazioni di solido trattenute in ciascun piatto. Il peso di ciascuna frazione solida viene quindi rapportato al peso del solido totale, per ottenere la percentuale (in massa) di solido trattenuto in ciascun piatto. Le dimensioni delle maglie sono riportate all'interno del capitolo riguardante il protocollo.

Indicando con:

P : peso totale dell'aggregato;

P_1 : peso del materiale trattenuto nel primo setaccio a maglie più grandi;

P_i : peso del materiale depositatosi nella i -esimo setaccio S_i ;

T_i : passante percentuale;

si possono determinare le percentuali trattenute come:

$$T_1(\%) = \frac{P_1}{P} \cdot 100 \quad (1.1)$$

$$T_i(\%) = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i}{P} \cdot 100 \quad (1.2)$$

Una volta determinate tutte le percentuali passanti, per ogni setaccio, la curva granulometrica sarà costruita nel piano con ascissa riportante le misure delle maglie dei setacci, in mm, e con ordinata riportante le percentuali di trattenuto in corrispondenza di ogni piatto, compresa la scodella piana inferiore.

Figura 1.1. Esempio di setacciatore elettromagnetico



1.1.2. La prova Marshall

La prova Marshall (riferimento normativo: UNI EN 12697-34) prevede l'utilizzo di provini cilindrici, del diametro di 101.6 mm e dell'altezza di 63.5 mm, costituiti miscelando legante bituminoso e aggregato ad una temperatura variabile tra i 150 e 180°C, mediante la compattazione Marshall. La compattazione Marshall viene eseguita mediante l'utilizzo di uno strumento in cui un pestello del peso di 4.536 kg compatta il campione con la sola forza gravitazionale di caduta, da un'altezza di 457mm, imprimendo 75 colpi sulla prima faccia piana, e, capovolto, 75 colpi sull'altra. Successivamente, il provino viene immerso in un bagno d'acqua alla temperatura di 60°C per la durata di 30 minuti. La prova Marshall consiste in un test di tipo empirico, durante il quale si effettua lo schiacciamento del campione, mediante due ganasce curve che vanno a comprimere due segmenti assiali opposti sulla superficie curva del provino. La prova avviene in controllo di velocità di deformazione, ovvero garantendo una velocità di avvicinamento delle ganasce costante, pari ad 85.0 mm/s. Si porta il campione a rottura, per cui si tratta di una prova distruttiva.

Figura 1.2. Dispositivo di test Marshall **Figura 1.3.** Compattatore Marshall



A prova avvenuta, si rilevano 2 parametri: la stabilità Marshall, che corrisponde al carico di rottura espresso in daN, e lo scorrimento Marshall, che corrisponde alla deformazione massima subita dal provino al momento della rottura, espressa in mm. Si può quindi determinare la rigidità Marshall, come rapporto tra stabilità e scorrimento [daN/mm].

- S_m : *Stabilità* = carico ultimo di rottura [daN]
- S_r : *Scorrimento* = deformazione in condizione ultima [mm]

$$R_m: \text{Rigidezza} = \frac{\text{Stabilità}}{\text{Scorrimento}} = \frac{S_m \left[\frac{\text{daN}}{\text{mm}} \right]}{S_r} \quad (1.3)$$

Tabella 1.1. Valori Marshall prescritti da capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a.

STRATI	CAPITOLATO A.N.A.S.		CAPITOLATO Autostrade S.p.a.	
	Stabilità [daN]	Rigidezza [daN/mm]	Stabilità [daN]	Rigidezza [daN/mm]
Base	> 700	R > 250	> 800 (≥ 1000)	R > 250 (≤ 400)
Collegamento	> 900	R > 300	> 1000 (≥ 1200)	300 < R < 400 (R > 250 (≤ 500))
Usura	> 1000	R > 300	> 1100 (≥ 1200)	300 < R < 450 (R > 250 (≤ 500))

Figura 1.4. Provini Marshall **Figura 1.5.** Dettaglio schiacciamento



Mediante l'ottimizzazione Marshall, una volta riportati i valori di tutte le prove, si stabilisce il contenuto di bitume ottimale per il conglomerato. La curva O.B.C. riporta i valori di stabilità, o di rigidezza, in funzione delle percentuali di bitume utilizzate: il contenuto ottimale si ottiene in corrispondenza della percentuale che individua il picco di massimizzazione delle stabilità o delle rigidezze Marshall.

Il metodo Marshall è basato su test di tipo empirico: per i seguenti motivi, l'analisi può quindi risultare non del tutto adeguata alla simulazione delle reali condizioni di esercizio:

- la prova Marshall è distruttiva;
- la temperatura di condizionamento del provino è pari a 60°C, per cui simula, solo le condizioni di esercizio ad alte temperature (che possono essere responsabili di fenomeni di ormaiamento);
- la modalità di compattazione a colpi non sembra garantire uno scenario veritiero: oltretutto, i 75 colpi previsti dal protocollo, possono risultare insufficienti a simulare scenari più gravosi, come ad esempio un campione che rappresenti un conglomerato utilizzabile in ambiti caratterizzati dal traffico cosiddetto “pesante”, quali ad esempio le autostrade.
- tale effetto, può oltretutto risultare amplificato qualora si prendano in considerazione conglomerati bituminosi con aggiunta di additivi modificatori che vadano ad incrementarne le prestazioni;
- le modalità di prova con schiacciamento delle ganasce curve non simulano alcun fenomeno reale che si possa verificare in esercizio.

1.2. Il nuovo approccio prestazionale

Negli anni recenti, si è assistito ad un marcato incremento dei volumi di traffico veicolare, per cui le pavimentazioni sono state via via maggiormente sollecitate, a causa dell'incremento dei carichi per asse e del numero di mezzi circolanti lungo la rete viaria. Una presa di coscienza nei confronti di temi quali la sicurezza stradale, il comfort di guida, l'inquinamento e la rumorosità prodotti dal traffico, hanno quindi orientato i progettisti alla ricerca di soluzioni finalizzate all'aumento della resistenza e della vita utile delle sovrastrutture. In questo contesto grande attenzione è stata rivolta alla qualificazione prestazionale delle miscele bituminose, largamente utilizzate nelle pavimentazioni flessibili e semirigide, mediante l'adozione di prove di laboratorio più attendibili nella previsione delle prestazioni attese in sito. Come evidenziato, infatti, le modalità di costituzione dei campioni e di svolgimento dei tradizionali test empirici, come per altro le caratteristiche analizzate, non risultano direttamente correlabili alla realtà, lasciando nette lacune per quanto riguarda la simulazione delle prestazioni e dei requisiti necessari a garantire una progettazione funzionale in esercizio. Le prove empiriche non sviluppano nei provini lo stato tensionale-deformativo dei conglomerati in sito, e determinano quindi in modo grossolano le caratteristiche prestazionali delle miscele: in aggiunta, tali test, presi singolarmente, non danno indicazione completa delle qualità che la miscela deve possedere in sito soprattutto per quanto concerne la sua durabilità. La progettazione attuale, quindi, non può soffermarsi ad un approccio di tipo empirico: lo studio deve essere corredato da una trattazione di tipo prestazionale, che riesca a simulare in modo veritiero il comportamento dei materiali che andranno a costituire le pavimentazioni. Per altro, i capitolati nazionali già richiedono, oltre alle prove empiriche tradizionali, integrazioni aggiuntive per lo studio dei materiali con test di tipo simulativo, in grado di riprodurre in laboratorio i diversi processi che le miscele subiscono in sito, nelle fasi di preparazione, stesa, compattazione e nel corso della vita utile della sovrastruttura.

In tale ottica, negli ultimi anni, è diventato via via sempre più importante lo sviluppo di nuovi protocolli, che standardizzino le procedure operative, le analisi teoriche e i requisiti prestazionali per il design di conglomerati e materiali da utilizzare nell'ambito delle costruzioni stradali o comunque legate ai trasporti. In tale contesto si inserisce il protocollo Superpave, che sarà utilizzato per l'analisi dei materiali nella nostra trattazione.

Capitolo 2

Il protocollo Superpave

A causa dei motivi appena analizzati, si è diffusa l'esigenza di superare il metodo Marshall. In questo ambito si inserisce il nuovo metodo di progettazione volumetrico delle miscele SU.PER.PAVE (SUpeerior PERforming PAVement), che si propone l'obiettivo di verificare, in laboratorio, caratteristiche del materiale commisurate alle reali condizioni di impiego ed alla risposta della pavimentazione. Con il termine Superpave si identifica il risultato finale del più vasto programma di ricerca S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program) per quello che concerne i leganti e i conglomerati bituminosi.

- Il metodo è, di fatto, un sistema per la progettazione dei conglomerati bituminosi finalizzato al raggiungimento delle prestazioni desiderate in relazione al livello di traffico e alle condizioni climatiche di progetto: garantisce le prestazioni della pavimentazione attraverso un'accurata selezione dell'aggregato, del legante e, se necessario, di eventuali additivi.
- E' frutto dell'integrazione, in un unico sistema, dei risultati di più di venticinque gruppi di lavoro del programma di ricerca S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program), per l'analisi e la progettazione dei bitumi e dei conglomerati. Comprende approcci innovativi sulle specifiche, sui materiali, sui test e le apparecchiature di prova e sul metodo di design della miscela.
- Il metodo è inoltre stato sintetizzato in un software che integra tutte le componenti del sistema.

Sviluppato negli U.S.A., si pone l'obiettivo di uniformare l'eterogeneità che caratterizza le prescrizioni normative sui materiali nei cinquanta stati americani: intende unificare le procedure per il mix-design dei conglomerati, basandosi su criteri prestazionali. Il sistema presenta una grande "duttilità" concettuale; può essere infatti applicato a conglomerati bituminosi costituiti da legante tradizionale o modificato/additivato, in presenza di aggregato tradizionale o di riciclo, da utilizzarsi in strati di usura, di collegamento o di base.

2.1. Inquadramento

L'obiettivo del sistema Superpave è la messa a punto di conglomerati ottimali, mediante un'accurata selezione dei materiali ed un attento studio della miscela bitume/aggregati.

Il conglomerato deve garantire contemporaneamente:

- durabilità (garantita da una sufficiente quantità di matrice legante);
- percentuale ottimale di vuoti (sia nella miscela, che nel conglomerato messo in opera);
- adeguata lavorabilità;
- prestazioni ottimali per tutta la vita utile dell'opera.

Andranno valutate le prestazioni dei conglomerati nei confronti di fenomeni di:

- deformazioni permanenti;
- rotture per fatica;
- fratture a bassa temperatura.

Il metodo si articola in 3 livelli:

- Livello 1: classificazione del legante e specifiche sugli aggregati, correlate empiricamente alle caratteristiche finali del conglomerato, allo scopo di garantire la sicurezza di utilizzo dei materiali adeguati alle esigenze di esercizio.

- Livello 2 – Livello 3: prevedono una serie di test prestazionali sui materiali.

Lo sviluppo del protocollo prevede l'utilizzo del reometro D.S.R., un particolare strumento in grado di testare un campione di legante inserito tra due piatti, uno fisso e uno oscillante, che ruota attorno ad un asse. La rotazione, che avviene secondo particolari modalità, riesce ad imprimere al provino uno sforzo di taglio: l'apparecchiatura misura il comportamento del materiale in termini di deformazione di taglio e, mediante il ritardo di deformazione, riesce a determinare la risposta del materiale, in termini di viscosità. Tale tecnologia, messa a punto negli anni '30 in Texas, è stata riproposta in Francia dal "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées", che, fin dai primi anni '60, ha studiato i parametri significativi mettendo a punto, a partire dal 1972, un'apposita normativa. Sempre in Francia, il reometro D.S.R. è utilizzato nella progettazione delle miscele con buoni risultati in termini di ripetibilità; ha inoltre trovato la massima diffusione negli Stati Uniti nell'ambito del livello 1 del sistema di progettazione Superpave, risultato di un progetto di ricerca

durato 7 anni, sviluppato da 8 enti diversi.

Il design dei conglomerati attualmente utilizzato nella progettazione, non risulta del tutto esaustivo al fine di classificare il legante dal punto di vista prestazionale, nell'ottica dell'utilizzo dei materiali in fase di esercizio. Ed un nuovo tipo di classificazione finalmente esaustiva è sicuramente legato allo sviluppo di sperimentazioni in laboratorio che utilizzano nuove apparecchiature, che migliorino le prove tradizionali: consentendo ad esempio la misura diretta delle proprietà reologiche e del comportamento a frattura dei leganti, come per altro indagini di durabilità dei materiali una volta messi in opera a costituzione delle pavimentazioni stradali.

Il progetto S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program) ha quindi portato all'utilizzo di nuove strumentazioni, alla definizione di nuovi di protocolli di prova e all'individuazione di criteri di selezione dei leganti bituminosi basati sulle loro prestazioni. Il protocollo Superpave prevede l'esecuzione di prove a sollecitazione controllata e di prove a deformazione controllata: le prove a tensione controllata si sviluppano con applicazione al piatto mobile di una coppia fissa; la corrispondente rotazione del piatto misurata, è funzione della rigidità del bitume. Nelle prove a deformazione controllata, invece, viene imposta una deformazione costante e si misura lo sforzo necessario per compierla. Il reometro D.S.R. consente di caratterizzare il comportamento viscoelastico dei leganti, misurando sia il modulo complesso (G^*) sia l'angolo di fase (δ). Questi due parametri sono fortemente influenzati dalla temperatura e dalla frequenza di carico: generalmente, alle alte temperature, i leganti si comportano come materiali viscosi, alle basse temperature, il bitume si comporta elasticamente, restituendo completamente le deformazioni imposte.

L'apparecchiatura, di fatto, valuta la viscosità dei leganti bituminosi, definita come il rapporto tra la sollecitazione tangenziale τ ed il corrispondente gradiente di deformazione. La viscosità viene calcolata misurando la coppia necessaria a mantenere costante la velocità di rotazione di un piccolo cilindro metallico all'interno di un campione di legante, mantenuto a temperatura costante: si ha la possibilità di sviluppare diagrammi che correlano la viscosità del legante alla temperatura di prova, così da poter individuare le temperature di miscelazione e di compattazione nel sistema Superpave di mix-design. Le misure di viscosità, alle alte temperature, hanno lo scopo di determinare le diverse temperature che intervengono nelle fasi di confezionamento del conglomerato (di pompaggio e di miscelazione del bitume), e nelle fasi di posa in opera. La temperatura di pompaggio è quella necessaria affinché il bitume raggiunga una viscosità compatibile con

l'impianto di sollevamento e trasferimento dal serbatoio all'impianto di miscelazione, mentre, la temperatura di miscelazione è quella necessaria affinché il bitume abbia una viscosità sufficiente per ricoprire adeguatamente gli aggregati.

2.2. I campioni

Come già accennato, il protocollo Superpave si prefigge lo scopo di analizzare le prestazioni dei conglomerati in funzione del loro utilizzo in esercizio; non può quindi trascurare uno dei fenomeni più importanti che, sin dagli inizi, e per tutta la vita utile dell'opera, interessa le pavimentazioni: l'invecchiamento. Con il termine invecchiamento, si intende il fenomeno che interessa il bitume per il quale, a causa dell'ossigeno contenuto nell'aria, si verificano processi di ossidazione dei componenti organici propri del legante (malteni e asfalteni), che possono essere responsabili di modificazioni della struttura e della composizione del bitume, con conseguente compromissione delle prestazioni del conglomerato. Il processo di ossidazione rende il bitume più duro, dando luogo al fenomeno comunemente denominato "age hardening", o "oxidative hardening": il legante diventa quindi maggiormente suscettibile alla rottura. In linea generale, il fenomeno è piuttosto lento all'interno dei conglomerati posti in opera; può però essere accelerato da un elevato tenore di vuoti, dovuto a una compattazione inadeguata oppure alla particolare formulazione della miscela. In aggiunta, esistono altri fenomeni che concorrono ad accelerare il processo di invecchiamento del legante, tra cui la volatilizzazione degli oli leggeri contenuti nel bitume, l'esposizione continuata a temperature stabilmente sotto lo zero, e, maggiormente, le elevate temperature. A tale proposito, risulta comprensibile come le fasi di vita iniziali del conglomerato, che vedono il confezionamento con il legante riscaldato sino ad avere sufficiente lavorabilità, siano le più critiche dal punto di vista dell'invecchiamento. Il protocollo Superpave tratta il problema tentando di simularne sui campioni gli effetti dell'invecchiamento mediante 2 procedure: la R.T.F.O.T. e la P.A.V..

2.2.1 La procedura R.T.F.O.T.

La procedura R.T.F.O.T. (Rolling Thin Film Oven Test) tenta di simulare il fenomeno dell'invecchiamento che il bitume subisce nella fase di confezionamento, in particolare per la volatilizzazione degli oli leggeri e per il raggiungimento di temperature elevate. Tale procedura ha essenzialmente lo scopo di produrre campioni di bitume invecchiato, da poter sottoporre a test di

rilevazione delle proprietà fisiche; inoltre consente di determinare la quantità di oli leggeri volatilizzati durante il processo di invecchiamento. Il test prevede l'utilizzo di un forno elettrico, contenente un dispositivo circolare in grado di trattenere 8 particolari bottiglie: all'interno del forno viene fornita una rotazione utile a disporre il bitume in uno strato sottile all'interno delle bottiglie, che vengono investite da un getto d'aria di 4000 millilitri al minuto, riscaldate a 163 °C e agitate per 85 minuti. Successivamente, il contenuto di 2 bottiglie viene pesato per stabilirne la perdita in peso dovuta alla volatilizzazione degli oli leggeri: gli altri 6 campioni vengono riuniti per ottenere un sufficiente quantitativo di legante, da utilizzarsi nelle successive prove di caratterizzazione.

2.2.2. La procedura P.A.V.

La procedura P.A.V. (Pressure Aging Vessel) tenta di riprodurre l'invecchiamento che il legante subisce una volta steso in opera, fase in cui prevale nettamente il meccanismo di ossidazione rispetto a quello di volatilizzazione. I campioni di bitume utilizzati nel test P.A.V. devono preventivamente essere stati invecchiati tramite procedura R.T.F.O.T.; di conseguenza i campioni sottoposti al test P.A.V. rispecchiano le caratteristiche del legante esposto a tutte le condizioni ambientali cui i bitumi sono soggetti, dalla produzione all'esercizio. La procedura consiste nel disporre in piatti piani metallici il bitume proveniente dal test R.T.F.O.T., e nell'inserire i campioni nella camera principale in cui il legante viene sottoposto ad una pressione di 2100 ± 100 kPa, per 20 ore a temperature di 90, 100, o 110 °C, in funzione della massima temperatura di progetto della sovrastruttura. Il legante sottoposto a test fornirà indicazioni utili per determinarne il comportamento per quanto riguarda l'invecchiamento a 5 - 10 anni di esercizio.

2.3. Caratteristiche del metodo

2.3.1. Specifiche sui bitumi

Lo studio delle proprietà reologiche di un legante modificato può essere impiegato per la risoluzione di problematiche legate alla manutenzione e al rafforzamento di una pavimentazione flessibile. Una volta analizzati i fenomeni di degrado propri della struttura, si possono determinare quali siano le caratteristiche che il materiale deve soddisfare, al fine di prevenire, evitare, o ritardare, i problemi precedentemente verificatisi. La procedura S.H.R.P. definisce quindi un sistema di accettazione del materiale: in particolare utilizza come riferimento la variabile temperatura. Di fatto si determina l'intervallo di temperature entro cui può essere previsto l'impiego di un legante bituminoso: diventa quindi possibile valutare, in termini pratici, i vantaggi derivanti dall'uso di bitumi modificati, che allargano l'intervallo d'impiego garantendo determinate prestazioni in opera.

L'innovazione nella caratterizzazione dei leganti bituminosi si traduce in una nuova classificazione: il Performance Grade (P.G.). E' un metodo di caratterizzazione prestazionale, in quanto consiste nel determinare il range di temperature entro cui il bitume avrà prestazioni meccaniche adeguate alle sollecitazioni a cui verrà sottoposto il conglomerato nella pavimentazione in esercizio: in particolare il P.G. viene espresso da due valori, una temperatura massima e una minima, dipendenti da condizioni in esercizio quali il volume di traffico previsto e il clima.

2.3.2. Il mix-design

Il protocollo Superpave comprende sia test tradizionali di analisi volumetrica, sia l'integrazione di test prestazionali sui materiali, principalmente in funzione dei livelli di traffico previsti. In particolare, l'aggiunta di test prestazionali si pone l'obiettivo di selezionare aggregati e leganti che compongano conglomerati particolarmente efficaci, anche nei confronti di fenomeni complessi, quali il degrado da fatica o causato dalle temperature più basse. Di conseguenza, saranno richiesti parametri aggiuntivi, quali i livelli di traffico previsto, il tipo di clima, e in generale le caratteristiche che solleciteranno la pavimentazione durante la vita utile.

Il livello 1 del protocollo prevede il solo sviluppo del design volumetrico, ovvero la scelta di una miscela con specifiche caratteristiche. Vengono determinati adeguati parametri volumetrici, in particolare: vuoti residui, vuoti nell'aggregato, vuoti riempiti di bitume. In altri termini, si garantisce la realizzazione di un materiale adeguato al soddisfacimento di determinate esigenze, senza caratterizzazione di parametri quali deformazioni permanenti, rotture per fatica, o temperature, ossia senza reali previsioni sull'evoluzione della struttura in funzione. Tali considerazioni vengono invece incluse nei livelli 2 e 3, con lo sviluppo di ulteriori test per lo studio dei possibili ammaloramenti della pavimentazione: sono test prestazionali accelerati, eseguiti su provini con un contenuto di bitume variabile attorno a quello ottimale, determinato con il design di livello 1. Le previsioni sui reali comportamenti sono determinate, sulla base dei risultati di laboratorio, mediante il software Superpave (modello bidimensionale agli elementi finiti del multistrato elastico). La principale differenza tra i livelli del protocollo 2 e 3 consiste nel fatto che il livello 2 prevede un numero minore di test, eseguiti in un intervallo di temperature molto più ristretto: in particolare, nel livello 2 si fa unicamente riferimento alla "temperatura effettiva", ovvero quella alla quale si dovrebbe sviluppare l'ammaloramento equivalente a quello ottenibile considerando separatamente le varie stagioni dell'anno. Il livello 3, invece, simula l'andamento dei fattori climatici dell'intero anno, suddividendolo in stagioni rappresentative. L'utilizzo di questi ulteriori 2 livelli consente, a fronte di una maggiore complessità del metodo, di ottimizzare la progettazione in funzione dei tipi di ammaloramento. La complessità del protocollo, quindi, aumenta sensibilmente con l'avanzare dei livelli: sovente, non si assisterà allo sviluppo di tutti i 3 livelli, che saranno eseguiti solamente per strutture maggiormente problematiche (con elevate previsioni di traffico o che si trovino ad operare in zone contraddistinte da climi aggressivi). I test prestazionali dei livelli 2 e 3, influiranno anch'essi sulla determinazione dell'ottimo contenuto di bitume nel conglomerato, che nell'approccio tradizionale si ottiene solamente dalle analisi volumetriche di livello 1; per quanto detto, il contenuto ottimo diventa funzione delle prestazioni della pavimentazione.

Come sempre dovrebbe avvenire, ma in particolare in presenza di protocolli complessi, che garantiscano materiali di qualità, assume cruciale importanza il monitoraggio durante la realizzazione dell'opera, per constatare la conformità al progetto dei conglomerati effettivamente prodotti.

2.3.3. *Il trattamento dei campioni*

Il diverso approccio, proposto nei livelli 2 e 3, non può prescindere dallo sviluppo di nuove modalità operative di trattamento dei campioni oggetto di studio. L'approccio classico, la cui definizione si deve a Bruce Marshall, prevede la compattazione dei provini di tipo impulsivo. E' il metodo più conosciuto e diffuso, e risale agli anni '20 quando Hubbard e Field utilizzarono un apparecchio Proctor, mutuato dal campo geotecnico, per compattare conglomerati bituminosi: in origine, il pestello, a completo azionamento manuale, aveva una superficie piatta e circolare, ma di diametro inferiore a quello della fustella in cui era contenuto il conglomerato. Ciò costringeva l'utilizzatore non solo ad alzare manualmente il martello, ma anche a distribuire il numero prefissato di colpi sulla superficie del provino. Quando, negli anni '30, Bruce Marshall iniziò a sviluppare l'omonimo metodo di progettazione delle miscele, scelse la compattazione ad impatto propria del metodo Hubbard-Field, modificando però il diametro del pestello per renderlo uguale a quello delle fustelle contenenti i provini. Il metodo Marshall, ripreso dagli ingegneri dell'esercito americano durante la seconda guerra mondiale per adattarlo alle esigenze delle piste aeroportuali, è poi stato adottato per la progettazione delle comuni sovrastrutture stradali. Il numero di colpi applicato ad ogni faccia del provino, cresciuto negli anni da 35 a 50 e a 75, è sempre stato scelto in relazione al carico esercitato sulle sovrastrutture dai normali livelli di traffico.

Il nuovo approccio prevede invece l'utilizzo della compattazione mediante pressa giratoria a taglio Superpave: durante il processo di addensamento, il conglomerato bituminoso subisce una continua riorganizzazione interna dei grani lapidei, cosicché lo scheletro formato dall'aggregato via via si addensa all'aumentare del numero di giri del compattatore. La tecnica prevede un'azione "impastante" di una fustella per mezzo di una rotazione fuori asse, e l'azione di tensioni principali su assi variabili, così da ottenere dei provini in grado di ben simulare le proprietà fisico-meccaniche delle pavimentazioni in opera.

Come già accennato, la metodologia di compattazione giratoria venne introdotta negli anni '30 nello stato americano del Texas; il primo modello di compattatore a taglio giratorio, il Texas Gyrotory Shear Compactor, venne messo a punto dai tecnici dell'U.S. Army Corps of Engineers e successivamente riproposto dall'American Society for Testing and Materials in sede normativa (A.S.T.M.). L'introduzione della pressa giratoria in ambito europeo, invece, si deve ai ricercatori francesi del Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées, che, in seguito ai contatti avuti con studiosi americani alla fine degli anni '50, promossero una serie di ricerche sperimentali riguardanti

l'addensamento dei conglomerati bituminosi. In seguito a lunghe sperimentazioni sull'influenza dei parametri significativi sul livello di compattazione raggiunto dai provini, nel 1972, i ricercatori del Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées misero a punto la prima normativa specifica su questo argomento. Dopo la loro introduzione nel settore stradale, le presse giratorie hanno avuto, sia in Europa sia negli Stati Uniti, un'evoluzione progressiva che ha portato ad una notevole differenziazione delle relative specifiche tecniche e procedure di prova. Tuttavia, con la recente diffusione della pressa giratoria in ambito internazionale, favorita dalla sua inclusione tra le apparecchiature del programma S.H.R.P., si sono ridotte le differenze esistenti tra le apparecchiature e le procedure utilizzate nei vari paesi (essenzialmente grazie all'attività di normalizzazione svolta nell'ambito del C.E.N. - Comité Européen de Normalisation). Ciò nonostante, esistono ancora alcune differenze sui parametri stabiliti dalle diverse normative: la tabella sottostante riporta le principali differenze.

Tabella 2.1. *Differenze tra le diverse normative attualmente in vigore*

Parametri	A.S.T.M. D4013	C.E.N. TC 227	S.H.R.P. M-002	A.S.T.M. Draft 95	A.S./N.Z. 2891.2.2
Diametro [mm]	100	100 150 160	100 150	150	100 150
Angolo [°]	6	1,25 (± 0.02)	1,25 (± 0.02)	1,25 (± 0.02)	2±0.1(φ100) 3±0.1(φ150)
Pressione [kPa]	var.	600 (±10)	600 (±10)	600 (±18)	240
Rotazione [giri/min]	60	6-32 (±10%)	30 (±0.5%)	30 (±0.5%)	60

A prescindere dalle diversità normative dei vari casi, è stato ampiamente dimostrato come la compattazione giratoria sia qualitativamente superiore a tutte le altre tecniche di compattazione in laboratorio, ovvero come fornisca risultati molto più simili alle reali modalità di compattazione a rulli che avvengono durante le fasi di stesura delle pavimentazioni flessibili. Il motivo è dovuto proprio alle modalità di prova: il moto di rotazione impresso e la sollecitazione continua aumentano l'effetto di "intersezione" tra i grani che compongono la miscela, cosa che invece non avviene con la modalità di compattazione a colpi, nella quale l'addensamento, una volta avvicinati i grani, subisce un brusco rallentamento e ne risulta mitigato. In aggiunta, gli studi nell'ambito del programma S.H.R.P. hanno dimostrato come i provini che subiscono compattazione giratoria siano ben più sensibili al tipo e alla qualità del legante che permea la miscela.

2.4. Il protocollo

2.4.1. Addensamento e vuoti

Uno dei parametri fondamentali da tenere in considerazione risulta essere la stima sull'indice dei vuoti finale che caratterizza la miscela, in quanto andrà direttamente ad influenzare le risposte della pavimentazione sotto l'azione del traffico.

In generale, ad un basso valore di indice dei vuoti coincidono un modulo complesso alto e buone caratteristiche di impermeabilità e resistenza a fatica; tuttavia è necessario, affinché non peggiori la resistenza all'ormaiamento, che un basso tenore di vuoti non sia ottenuto aumentando oltre misura il contenuto di sabbia o di bitume della miscela, bensì sia raggiunto compattando e addensando lo scheletro minerale dei conglomerati. Di conseguenza è fondamentale predisporre una trattazione accurata della volumetria di miscela, che passa anche dall'utilizzo di strumentazioni con adatte sensibilità e precisioni: nella tecnica di compattazione giratoria viene data una notevole rilevanza non solo allo stato di addensamento finale raggiunto dal conglomerato al termine del processo di compattazione, ma anche alla modalità con le quali tale stato viene raggiunto.

Le curve di addensamento sono ottenute dai dati registrati dalla pressa durante il graduale addensamento del materiale: sono solitamente rappresentate riportando in ascissa, in scala logaritmica, il numero di giri effettuati dal campione, e in ordinata la percentuale raggiunta della massima densità teorica. Tra i parametri che intervengono nella compattazione si ipotizza una relazione lineare del tipo:

$$G_{mm}(\%) = G_1(\%) + k \log(N) \quad (2.1)$$

dove:

- G_{mm} : massima densità teorica percentuale raggiunta;
- N : numero di giri a cui è stato sottoposto il campione;
- G_1, k : parametri determinati dai dati sperimentali.

L'obiettivo del mix-design con compattazione giratoria è di ottenere, all'atto dell'apertura al traffico della sovrastruttura, una percentuale di vuoti residui pari al 4% (escludendo i casi particolari dei conglomerati drenanti).

2.4.2. Definizione dei parametri

Il compattatore Superpave presenta le seguenti caratteristiche:

- inclinazione rispetto all'asse verticale $1.25 \pm 0.02^\circ$;
- velocità di rotazione pari a 30 giri al minuto;
- pressione verticale durante la compattazione costante, pari a 600 kPa;
- possibilità di realizzare provini cilindrici di 150 mm di diametro.

La tolleranza sul valore dell'angolo di inclinazione è molto bassa, poiché questo parametro è tra i più influenti nel processo di compattazione. La compattazione può fornire provini rappresentativi del materiale in diverse situazioni: agli antipodi, per esempio, un conglomerato appena posto in opera, oppure, uno ormai giunto alla fase finale della vita utile, in cui i livelli di addensamento prodotti dal ripetersi del traffico negli anni siano massimi. Si utilizzano quindi 3 diverse energie di compattazione standardizzate, rappresentate dal numero di giri a cui è sottoposto il provino, alle quali corrispondono 3 pesi specifici di riferimento.

Tabella 2.2. *Elenco delle variabili*

N_{init}	N_{design}	N_{max}
7 - 10	68 - 172	104 - 288
Energia di compattazione iniziale	Energia di compattazione di progetto	Energia di compattazione massima
Utile per stimare addensabilità e lavorabilità miscela	Utile per stimare il contenuto ottimale di bitume	Utile per stimare addensabilità e lavorabilità miscela
vedi equazione	Funzione della temperatura massima dell'aria e del livello di traffico di progetto (E.S.A.L. 80 kN)	vedi equazione
G_{init}	G_{design}	G_{max}

$$\log(N_{int}) = 0.45 \log(N_{design}) \quad (2.2)$$

$$\log(N_{max}) = 1.10 \log(N_{design}) \quad (2.3)$$

$$G_{mm} = \frac{\text{massa aggregato+bitume}}{\text{volume aggregato+bitume}} \quad (2.4)$$

con: *T.M.D.* : theoretical maximum density (a provino non compattato)

G_{mm} : massima densità teorica percentuale raggiunta (equivalente a T.M.D.);

Tabella 2.3. Definizione di N_{desig} in funzione della temperatura massima di progetto e dei livelli di traffico

Traffico Di progetto (ESALs) 80 kN	Temperatura massima di progetto dell'aria (° C)			
	< 39 °C	39-40 °C	41-42 °C	43-44 °C
< 3 10 ⁵	Min 68	74	78	82
<1 10 ⁶	76	83	88	93
<3 10 ⁶	86	95	100	105
<1 10 ⁷	96	106	113	119
<3 10 ⁷	109	121	128	135
<1 10 ⁸	126	139	146	153
>1 10 ⁸	143	158	165	Max 172

L'attenzione rivolta alle fasi di addensamento (e di determinazione dei vuoti) è giustificata, in quanto determina direttamente il contenuto di bitume ottimale da utilizzare nelle fasi di progettazione della miscela. Esso, infatti, dipende principalmente da condizioni specifiche di:

- percentuale dei vuoti della miscela di conglomerato (V.A. - Air Voids);
- percentuale dei vuoti presenti nell'aggregato minerale (V.M.A. - Voids in Mineral Aggregate);
- percentuale dei vuoti riempiti di bitume (V.F.A. - Voids Filled with Asphalt).

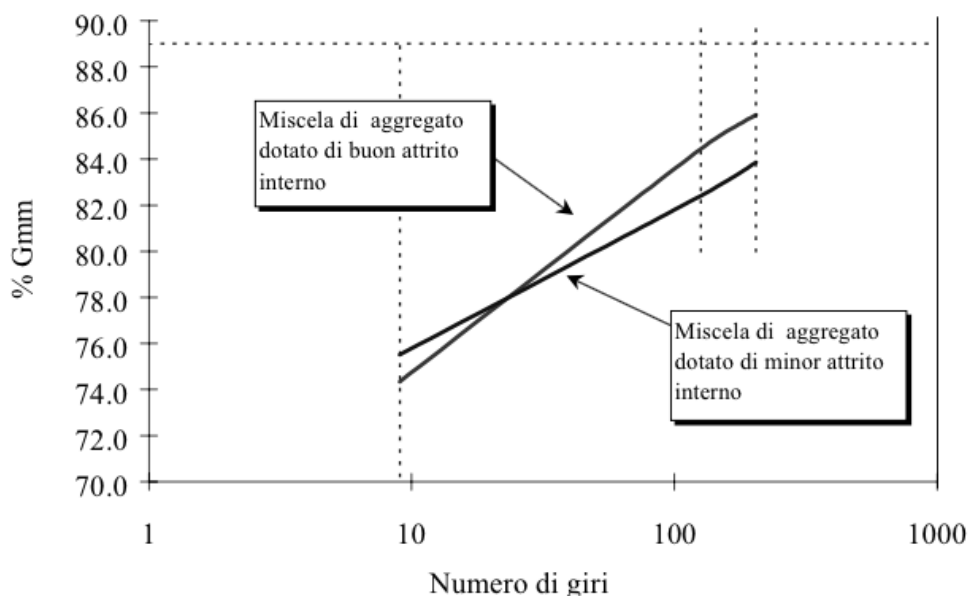
Di fondamentale importanza, quindi, diventano le modalità di laboratorio, al fine di ottenere provini che rappresentino veramente le reali caratteristiche di addensamento proprie delle pavimentazioni in esercizio. Il numero di giri imposti dal protocollo è stato determinato sulla base di ricerche approfondite, che hanno tenuto conto del legame lineare tra l'addensamento e il logaritmo dei giri impressi con compattazione giratoria: allo stesso modo, è stato riscontrato un legame lineare tra l'addensamento e il logaritmo dei numeri di passaggi di assi standard equivalenti. Utilizzando le due relazioni, si è potuto stabilire quindi il legame lineare tra il logaritmo del numero di assi

standard e il logaritmo del numero di giri effettuati dalla pressa in laboratorio. La ricerca è stata condotta su campioni di conglomerati prelevati da pavimentazioni soggette ad un traffico di intensità nota (principalmente di tipo pesante), aperte al traffico per un periodo superiore ai 12 anni, di conseguenza in uno stato caratterizzato dal massimo addensamento raggiungibile. Si sono determinate le curve di sviluppo dell'addensamento nel tempo, in opera, noti i valori volumetrici (essenzialmente dei vuoti) all'atto del prelievo, e supposta un densità di costruzione iniziale pari al 92%. Successivamente, si è ripulito l'aggregato mediante solventi, e si è riutilizzato per la costituzione di nuovi conglomerati aventi le stesse caratteristiche volumetriche, che, una volta sottoposti a compattazione giratoria in laboratorio, hanno fornito le curve di addensamento in laboratorio, utili a definire le correlazioni lineari sopra citate. La variabile temperatura è stata poi introdotta ripetendo lo stesso studio a diverse latitudini, caratterizzate da temperature di progetto diverse.

Le curve di addensamento consentono di:

- verificare il rispetto dei limiti sui pesi specifici (G_{int} , G_{desig} , G_{max}), che corrispondono alle energie di compattazione, espresse in numero di giri (N_{int} , N_{desig} , N_{max});
- trarre indicazioni sulla struttura dell'aggregato, valutandone la pendenza.

Grafico 2.1. Esempio: curve di addensamento per miscele con caratteristiche diverse



2.4.3. Analisi volumetrica

Si riportano di seguito alcune informazioni per lo svolgimento dell'analisi volumetrica dei conglomerati, che costituiscono di fatto il contenuto del livello 1 del protocollo.

- *V.M.A.*: vuoti nell'aggregato minerale (*Voids in the Mineral Aggregate*); rappresentano il volume dei vuoti intergranulari in un conglomerato bituminoso compattato, compreso il volume occupato dal bitume, espresso come percentuale del volume complessivo della miscela. Non comprendono il volume assorbito dagli aggregati.
- *P_{be}*: contenuto di bitume effettivo (*Effective Asphalt Content*); rappresenta la quantità globale di bitume contenuta in una miscela, esclusa la parte di legante assorbita dall'aggregato.
- *V.A.*: vuoti riempiti d'aria (*Air Voids*); rappresentano il volume totale delle piccole sacche d'aria racchiuse tra le particelle di aggregato rivestite di bitume, espresso come percentuale del volume della miscela compattata:

$$V_a(\%) = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100 \quad (2.5)$$

- *V.F.A.*: vuoti riempiti di bitume (*Voids Filled with Asphalt*); rappresentano la percentuale di volume dei vuoti intergranulari che è occupata dal bitume non assorbito. E' simile al grado di saturazione di una terra:

$$V.F.A. = \frac{V.M.A. - V.A.}{V.M.A.} \cdot 100 \quad (2.6)$$

- *G_{mb}*: densità del conglomerato compattato:

$$G_{mb} = \frac{\text{massa aggregato+bitume}}{\text{volume aggregato+bitume+vuoti}} \quad (2.7)$$

- *G_{mm}*: peso specifico massimo teorico della miscela (*Maximum theoretical specific Gravity of Mixture*); è valutato mediante la seguente espressione (note la curva granulometrica dell'aggregato e la percentuale di bitume utilizzata):

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.8)$$

- con:
- P_s : percentuale dell'aggregato sulla massa totale della miscela;
 - P_b : percentuale di legante sulla massa totale della miscela;
 - P_b : peso specifico effettivo dell'aggregato;
 - G_b : peso specifico del legante.

- Si può quindi determinare il rapporto:

$$\frac{G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{\frac{\text{massa agg.+bitume}}{\text{volume agg.+bit.+vuoti}}}{\frac{\text{massa agg.+bit.}}{\text{volume agg.+bit.}}} = \frac{\text{volume agg.+bit.}}{\text{volume agg.+bit.+vuoti}} \quad (2.9)$$

- G_{sa} : peso specifico apparente dell'aggregato (*Apparent Specific Gravity*); rappresenta il rapporto tra il peso dell'aggregato e il suo volume, nel quale non siano considerati i vuoti permeabili all'acqua, diviso per il peso specifico dell'acqua.
- G_{sb} : peso di volume "bulk" dell'aggregato (*Bulk Specific Gravity*); rappresenta il rapporto tra il peso dell'aggregato e il suo volume, nel quale siano considerati anche i vuoti permeabili all'acqua, diviso per il peso specifico dell'acqua. I vuoti riempibili d'acqua fanno parte del volume per il calcolo di G_{sb} , mentre non fanno parte del volume dell'aggregato per il calcolo di G_{sa} : quindi risulta sempre $G_{sa} > G_{sb}$
- G_{se} : peso specifico effettivo dell'aggregato (*Effective Specific Gravity*); rappresenta il rapporto tra il peso dell'aggregato e il suo volume, nel quale non siano considerati i vuoti permeabili al bitume, diviso per il peso specifico dell'acqua. Può essere determinato partendo da G_{sa} e G_{sb} risolvendo l'equazione seguente. Il coefficiente 0.8 può essere modificato a discrezione del progettista (aggregati a elevata tendenza ad assorbire il legante possono richiedere valori prossimi a 0.6 o 0.5):

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 \cdot (G_{sa} - G_{sb}) \quad (2.10)$$

L'analisi volumetrica è utile a definire la scelta dei materiali, determinando la curva granulometrica propria dello scheletro inerte, e il contenuto ottimale di legante bituminoso: il protocollo Superpave propone la definizione di curva granulometrica modificando il precedente approccio statunitense della carta di gradazione della potenza 0.45 della F.H.W.A. (Federal HighWays Administration).

2.4.3.1. Curva granulometrica

I setacci standard previsti dal sistema S.H.R.P. hanno le dimensioni espresse in tabella:

Tabella 2.4. *Misure dei setacci standard S.H.R.P., espresse in mm*

50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
----	------	----	----	------	-----	------	------	------	-----	-----	------	-------

Secondo il protocollo, la curva granulometrica consiste nella rappresentazione grafica della distribuzione cumulativa delle dimensioni dei grani della miscela di aggregato: in ordinata è rappresentata la percentuale di passante (0 a 100%), mentre in ascissa è posta la dimensione dei setacci in millimetri, elevata alla potenza di 0.45 (carta di gradazione della potenza 0.45). Per prima cosa, si rappresenta nel piano la cosiddetta “linea di massima densità”, ossia il segmento che congiunge l’origine con il punto che si ottiene dall’intersezione tra la dimensione massima raggiunta dall’aggregato e il 100% di passante: tale linea rappresenta la miscela ideale, in cui i grani di inerte si dispongono nella configurazione più densa possibile. Oltre alla linea di massima densità, il piano comprende i “punti di controllo”, utili a definire l’area di accettabilità entro cui dovrà situarsi la curva granulometrica: rappresentano di fatto la dimensione massima, intermedia e minima dei setacci. Infine, è presente la “zona vietata”, ovvero un’area posta lungo la linea di massima densità, tra i setacci di 0.3 mm e quelli di dimensione media; la zona individua una piccola porzione di piano entro la quale non deve passare la curva granulometrica, al fine di escludere l’utilizzo di miscele con eccessivo contenuto di sabbia, o con eccessiva sabbia fine in rapporto al contenuto totale, che presenterebbero scarse attitudini alla compattazione e resistenze alle deformazione. La zona vietata impedisce inoltre che la curva granulometrica sia troppo adiacente alla linea di massima densità, in modo da prevenire problemi per quanto riguarda le deformazioni plastiche in presenza di piccole variazioni del contenuto di legante rispetto al valore ottimale. Una curva che soddisfa i requisiti previsti dal protocollo Superpave, quindi, si colloca entro i punti di

controllo, evitando contemporaneamente la zona vietata.

E' utile anche definire 2 grandezze ulteriori:

- *N.M.S.*: massima dimensione nominale (*Nominal Maximum aggregate Size*); è la dimensione del setaccio immediatamente superiore a quella del primo con trattenuto maggiore del 10%;
- *M.S.*: massima dimensione (*Maximum aggregate Size*); è la dimensione del setaccio immediatamente superiore a quella corrispondente alla massima dimensione nominale.

Grafico 2.2. Piano grafico della curva

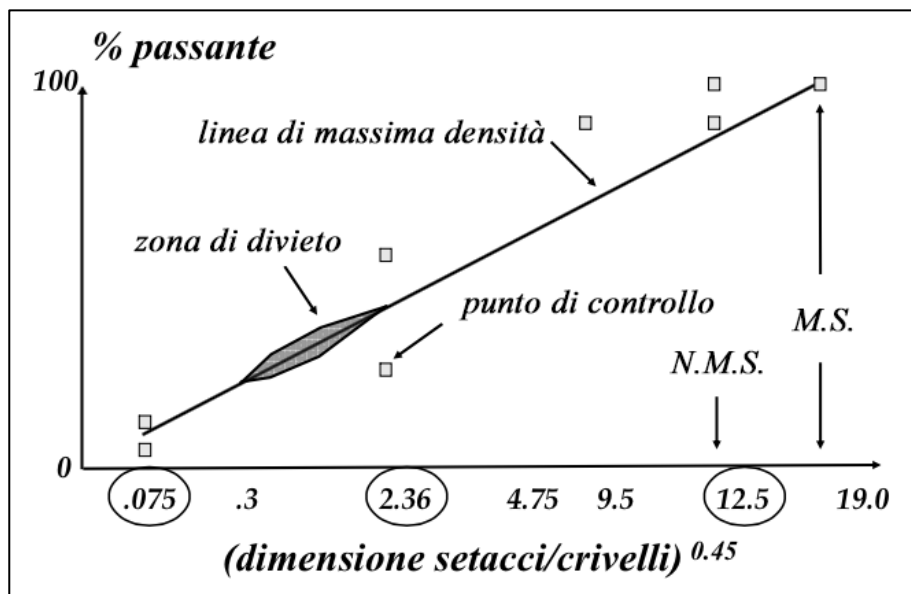
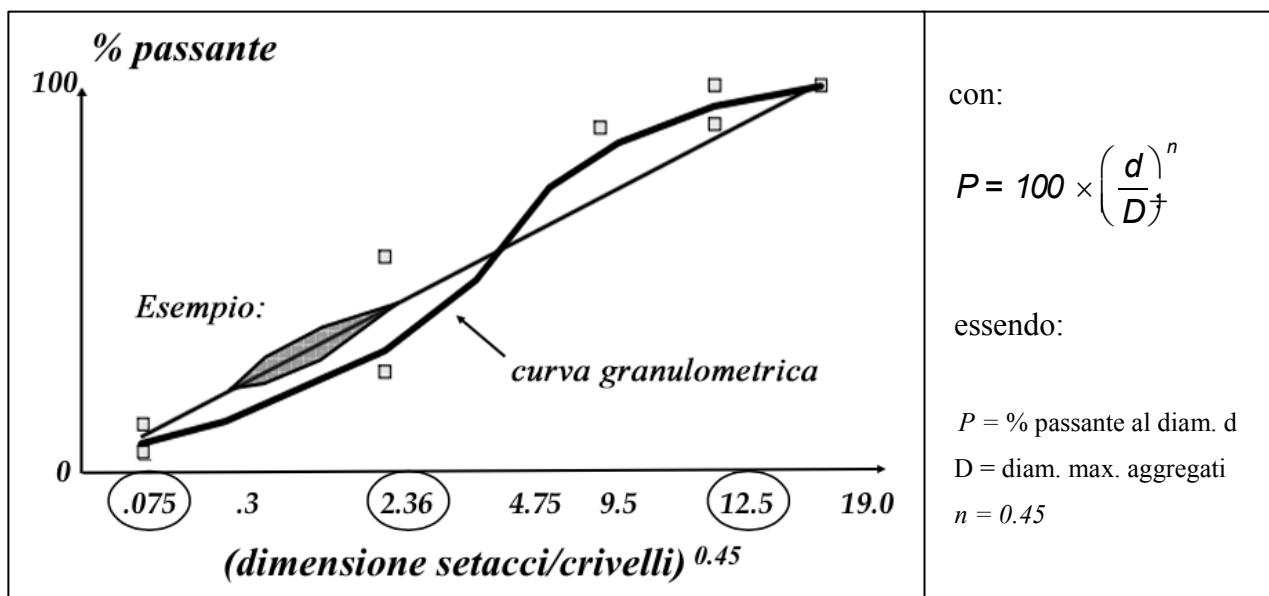



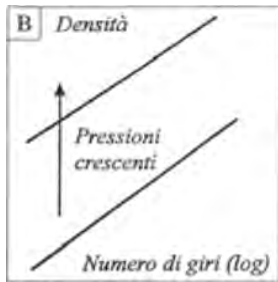
Grafico 2.3. Esempio di curva granulometrica



2.4.4. Prescrizioni e indicazioni

Il paragrafo espone un elenco delle variabili da tenere in considerazione nello svolgimento della compattazione di laboratorio, riportando indicazioni e requisiti di accettabilità da protocollo.

Tabella 2.5. Prescrizioni protocollo e indicazioni

<i>Pendenza curva addensamento</i>	Alto	Elevato attrito interno	Legato alla lavorabilità (principale parametro di confronto tra miscele)
G_{int}	< 89%	Limitare l'addensabilità	Legato all'addensabilità (assicurare adeguata struttura dell'aggregato)
	Basso	Elevato attrito interno	
G_{max}	< 98%	Evitare la plasticizzazione permanente sotto l'azione dei carichi dovuti al traffico	
<i>%-uale vuoti</i>	>2% per tutta la vita utile	Evitare la plasticizzazione permanente sotto l'azione dei carichi dovuti al traffico	
<i>Viscosità cinematica del legante</i>	< 0.28±0.03 Pa•s alla T di compattazione [S.H.R.P. M-002]		
	< 0.17±0.02 Pa•s alla T di miscelazione [C.E.N. TC227/WG1]		
<i>Temperatura</i>	$\Delta T < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (inizio-fine compattazione)	Si ottiene limitando il tempo di prova (aumentando i giri N diminuisce la dissipazione termica)	
<i>Angolo inclinazione fustella</i>	0.1° ÷ 1.0°	Forte variazione del comportamento	
	1.0° ÷ 3.0°	Scarsa variazione del comportamento	
	> 3°	Parametro pressoché influente	
<i>Pressione di compattazione</i>	400 kPa (o alto N di giri)	Aumenta con i giri (per simulare correttamente la compattazione reale a rulli)	

Capitolo 3

Generalità sui materiali

Nel seguente capitolo si andranno ad esporre, in via generale, le principali caratteristiche che riguardano i materiali comunemente utilizzati nella realizzazione delle pavimentazioni stradali.

Si tratteranno dapprima gli aggregati di tipo tradizionale, e, in seguito, gli aggregati di riciclo, che saranno utilizzati nel protocollo sperimentale di laboratorio. Si andranno poi ad elencare le principali caratteristiche e proprietà del legante bitume. Infine, si analizzeranno i conglomerati bituminosi, ed in particolare quelli di tipo tiepido, il cui studio è uno degli scopi di questa Tesi.

3.1. Gli aggregati

Gli aggregati costituiscono la parte principale del conglomerato bituminoso: devono essere accuratamente commisurati, dalla dimensione massima fino al filler, allo scopo di ottenere una miscela con una percentuale di vuoti controllata. La quantità di bitume è infatti correlata alla percentuale dei vuoti disponibili: risulta quindi intuitivo come il “progetto” dell’aggregato sia fondamentale, e direttamente correlato alle prestazioni finali del conglomerato bituminoso.

La prima caratteristica importante è l’origine e la natura degli aggregati; ne esistono principalmente tre tipologie:

- gli aggregati di tipo tradizionale sono ottenuti da rocce con particolari caratteristiche di resistenza, mediante un processo di frantumazione artificiale con frantoi, ed una successiva vagliatura. Il materiale risultante è un prodotto con un prestabilito assortimento granulometrico. Gli aggregati tradizionali vengono impiegati principalmente negli strati più superficiali della sovrastruttura (quindi i più sollecitati).

- Gli aggregati di tipo riciclato sono sottoprodotti dell'industria, costituiti principalmente da scorie di altoforno o ceneri volanti, il cui utilizzo mitiga, in parte, il problema dello smaltimento.
- Gli aggregati artificiali sono prodotti industrialmente, ad esempio, mediante fusione ad alte temperature di particolari minerali o rocce (bauxite, alcuni tipi di argilla). Presentano ottime caratteristiche, per cui, generalmente, sono impiegati solo localmente, dove le prestazioni richieste siano particolari, e non ottenibili dall'utilizzo di altri tipi di aggregato.

Dal Gennaio 2004, in sostituzione delle precedenti normative, in vigore la norma UNI EN 13043, dal titolo "Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico", nella quale si trovano i riferimenti alle caratteristiche prestazionali che riguardano gli aggregati, a prescindere dalla loro origine. La UNI EN 13043, definisce e standardizza i metodi di prova per la caratterizzazione e classificazione geometrica, fisica e chimica dell'aggregato, grosso e fine.

Dall'1 Giugno 2004 inoltre obbligatoria la marcatura C.E. per la commercializzazione di ogni prodotto relativo alla suddetta norma. Il produttore deve effettuare i test e rendere disponibili le specifiche dichiarazioni per l'identificazione dell'aggregato: a tale proposito, si riporta, a titolo d'esempio, un estratto tratto dal Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 16 Novembre 2009, dal titolo "Applicazione della direttiva n. 89/106/CE sui prodotti da costruzione", recepita con D.P.R. 21/04/1993, n. 246, relativa alla individuazione dei prodotti e dei relativi metodi di controllo della conformità di aggregati, pubblicato nella G.U. n. 40 del 18/02/2010. In particolare, il documento recepisce le direttive europee imposte dalla UNI EN 13043: la seguente tabella rappresenta lo schema tipo per la dichiarazione delle caratteristiche degli aggregati.

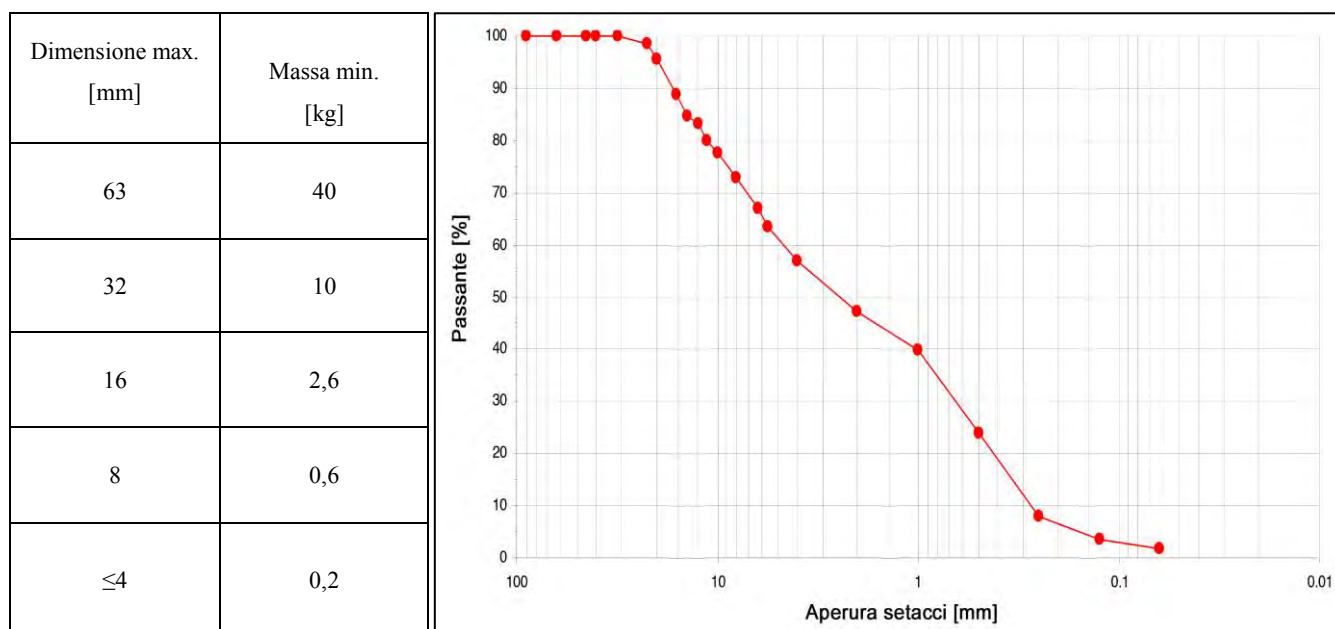
Tabella 3.1. *Aggregati per miscele bituminose e trattamenti per strade, aeroporti, e aree soggette a traffico – UNI EN 13043*

Caratteristiche armonizzate (secondo appendice ZA)	Punti della Norma, relativi alle caratteristiche armonizzate	Dichiarazione (*NPD = non obblig.)
Forma dei granuli Dimensione dei granuli Massa volumica delle particelle	4.1.2 Dimensioni dell'aggregato	Si
	4.1.3 Granulometria	Si
	4.1.6 Forma dell'aggregato grosso	Si
	4.2.7.1 Massa volumica delle particelle	Si
Pulizia	4.1.5 Qualità dei fini	Si
Percentuale di superfici frantumate	4.1.7 Percentuale di superfici frantumate negli aggregati grossi	Si
Affinità ai leganti bituminosi	4.2.11 Affinità degli aggregati grossi ai leganti bituminosi	Si
Resistenza alla frammentazione/frantumazione	4.2.12 Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	Si
Resistenza alla levigazione/abrasione/usura/attrito	4.2.3 Resistenza alla levigazione dell'aggregato per strati superficiali	Si
	4.2.4 Resistenza all'abrasione superficiale	Si
	4.2.5 Resistenza all'usura dell'aggregato grosso	Si
Resistenza allo shock termico	4.2.10 Resistenza allo shock termico	Si
Stabilità di volume	4.3.4.1 Disintegrazione di silicato dicalcico delle scorie d'altoforno raffreddate a aria	Si/NPD
	4.3.4.2. Disintegrazione ferrosa delle scorie d'altoforno raffreddate a aria	Si/NPD
	4.3.4.3 Stabilità di volume degli aggregati di scorie d'acciaio	Si/NPD
Composizione/contenuto	4.3.2 Composizione chimica	Si
Durabilità al gelo/disgelo	4.2.9.2 Resistenza al gelo e disgelo	Si
Durabilità agli agenti atmosferici	4.2.12 "Sonnenbrand" del basalto	Si/NPD
Durabilità ai pneumatici chiodati	4.2.6 Resistenza all'abrasione da pneumatici chiodati degli aggregati grossi da utilizzare per strati superficiali	Si/NPD
Durabilità allo shock termico	Vedere 4.2.10 Resistenza allo shock termico sopra	Si

Per motivi di brevità, in questa sede, si tralasciano comunque le descrizioni dettagliate delle modalità operative di prova: si riportano solamente alcune indicazioni su caratteristiche e requisiti minimi di accettabilità. Per qualunque approfondimento si rimanda alla normativa.

Granulometria: l'obiettivo è quello di ottenere una miscela avente la massima densità, impiegando quindi la maggior quantità possibile di aggregato: a tal fine, è necessario garantire granuli a dimensioni assortite, di modo che i più piccoli possano penetrare all'interno dei vuoti. La procedura di controllo prevede la costruzione della curva granulometrica mediante classica vagliatura a setacci e misura delle percentuali di passante. Di seguito si riportano un esempio di curva granulometrica e la tabella con i criteri di accettazione dei campioni da sottoporre a setacciatura.

Tabella 3.2. *Tabella di accettazione dei campioni – Esempio di curva granulometrica classica*



Contenuto e qualità dei fini: la determinazione del contenuto dei fini è normato nella direttiva UNI EN 993-1. E' espresso mediante la percentuale di passante al setaccio 0.063 mm e può essere calcolato sia su aggregati grossi che fini; viene espresso mediante categorie denominate "f" (es: la categoria f4 , indica un aggregato con passante al setaccio 0.063 mm inferiore o uguale al 4%).

Valore del blu di metilene: prova normata nella direttiva UNI EN 933-9, che va effettuata quando il contenuto di fini è maggiore del 3%, in modo da definire il carattere più o meno argilloso della frazione finissima. La procedura prevede l'utilizzo del blu di metilene, e la progressiva verifica della colorazione del campione su carta da filtro.

Figura 3.1. *Determinazione del valore del blu di metilene*

Forma/appiattimento aggregato grosso: normativa di riferimento, UNI EN 933-3-4. Verifica il rapporto tra le diverse dimensioni dell'aggregato grosso. L'indice di appiattimento deve essere contenuto, in modo da ottenere il maggior grado di compattezza con il minimo indice dei vuoti. I granuli vengono classificati in base al rapporto tra il diametro massimo (lunghezza L) e quello medio (spessore E) tramite uno speciale calibro; l'indice di forma SI dato dal rapporto SI tra la massa totale dei grani e quelli "piatti".

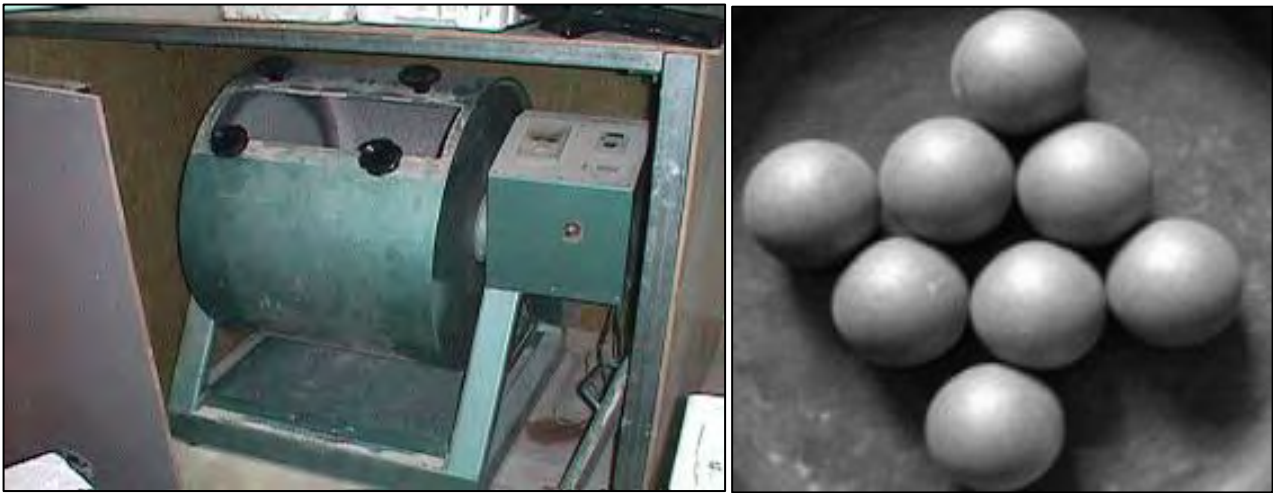
Figura 3.2. *Determinazione della forma dell'aggregato*

Percentuale delle superfici frantumate: la prova consiste nella determinazione visiva, per ogni frazione granulometrica esaminata, della massa dei granuli frantumati/spezzati o arrotondati (anche parzialmente). La normativa di riferimento è la UNI EN 933-5.

Spigolosità degli aggregati: la prova consiste nel passaggio di un prestabilito quantitativo di aggregato grosso, attraverso un cilindro dotato di una bocca calibrata laterale fornita di otturatore, e nella misurazione del tempo di efflusso. Per gli aggregati fini il principio rimane lo stesso ma si utilizzano imbuti con fori più piccoli. La normativa di riferimento è la UNI EN 933-6.

Prova "Los Angeles": determinazione della resistenza all'abrasione e alla frammentazione degli aggregati grossi (normativa UNI EN 1097-2). Il calcolo della perdita in peso, a prova avvenuta, esprime la performance dell'aggregato; l'indice *L.A.* deve risultare sempre inferiore (o uguale) al valore di 30 (*LA30*).

Figura 3.3. *Apparecchiatura per prova L.A. – Sfere utilizzate nel test*



Coefficiente C.L.A.: il coefficiente di levigabilità accelerata tenta di misurare l'attitudine al consumo superficiale per perdita della micro rugosità, dovuto all'azione del traffico stradale. Gli aggregati in esame vengono testati da una vera e propria ruota con pneumatico, secondo particolari modalità; il coefficiente si determina sottoponendo il campione ad una serie di prove di attrito radente con apposito apparecchio a pendolo "Skid Tester Resistance", normalizzato per le prove di scivolosità. La normativa di riferimento è la UNI EN 1097-8.

Figura 3.4. *Apparecchiatura per prova C.L.A.*



Resistenza all'usura "Micro-Deval": il coefficiente è definito come la percentuale di materiale fino prodotto dall'azione esercitata da sfere di acciaio standardizzate entro l'apparecchio Micro-Deval. Gli aggregati vengono sollecitati entro un cilindro rotante da sfere di acciaio libere di muoversi: la prova può essere anche eseguita su aggregato umido. In generale, minore è il valore Micro-Deval, migliore risulta la resistenza all'usura riferita alla macro tessitura degli aggregati. La normativa di riferimento è la UNI EN 1097-1.

Figura 3.5. Strumento utilizzato per il test all'usura "Micro-Deval"



Massa volumica dei granuli: si può considerare quella reale (massa per unità di volume senza vuoti né porosità), quella saturata a superficie asciutta (con pori superficiali imbibiti), o quella in mucchio (compresi la porosità superficiale e i vuoti intergranulari). La normativa di riferimento è la UNI EN 1097-6.

Assorbimento d'acqua: la quantità d'acqua che un aggregato assorbe nei pori superficiali, per portarsi dalla condizione "essiccato", a quella "saturo a superficie asciutta"; viene calcolato come percentuale d'acqua assorbita sulla massa dell'aggregato essiccato. Dipende della natura dell'aggregato, del suo grado di alterazione, dalla forma e delle dimensioni: valori tipici possono essere: da 1.0 a 2.0% per le sabbie, e da 0.5 a 1.5% per gli aggregati grossi.

Resistenza al gelo e disgelo: è una prova che caratterizza la durabilità del materiale. L'aggregato viene esposto a cicli di gelo e disgelo (da 20 °C a -17 °C, per 10 giorni), e successivamente vagliato e pesato (il caso ideale presenta un valore di resistenza al gelo disgelo pari allo 100 %). La normativa di riferimenti è la UNI EN 1367-1.

Si riporta di seguito un estratto delle tabelle riassuntive dei requisiti sugli aggregati, prescritti da C.N.R. e dalle norme tecniche A.N.A.S. e Autostrade S.p.a., distinte per i diversi strati di conglomerato.

Tabella 3.3. Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di base

DETERMINAZIONE	NORMA di riferimento	C.N.R. (1)				ANAS	Autostrade S.p.A.
		PP	P	M	L		
Frazione >4mm							
Contenuto di [%]:	b.u. 104/1984						
- rocce tenere alterate o scistose,		≤1	≤1	≤1	≤1		
- rocce degradabili		≤1	≤1	≤1	≤1		
Coeff. Los Angeles [%]	b.u. 34/1973	≤25	≤25	≤25	≤25		
Micro Deval Umida [%]	b.u. 109/1985	≤20	≤20	≤20	≤20	≤25	≤25
Quantità di frantumato [%] (2)	-	≥90	≥30	≥20	≥0		
		≥90	≥90	≥70	≥50	≥30	≥50
Dim. max [mm]	b.u. 23/1971	40	40	40	40		
Sens. al gelo (3) [%]	b.u. 80/1980	≤30	≤30	≤30	≤30		
Spogliamento in acqua a 40°C [%] (4)	b.u. 138/1992	≤5	≤5	≤5	≤5		
Pass. al setaccio 0.075 (5) [%]	b.u. 75/1980	≤1	≤1	≤1	≤2		
Frazione <4mm							
Contenuto di [%]:	b.u. 104/1984						
- rocce tenere alterate o scistose,		≤1	≤1	≤1	≤1		
- rocce degradabili		≤1	≤1	≤1	≤1		
Ind. plasticità [%]	C.N.R.-UNI 10014	NP	NP	NP	≤6		
Limite liquido [%]	C.N.R.-UNI 10014	≤25	≤25	≤25	≤35		
Equiv. in sabbia [%]	b.u. 27/1972	≥50	≥50	≥50	≥35	≥50	≥70
Granulometria [%]	b.u. 23/1971						
passante al						100	-
crivello 40						80-100	100
crivello 30						70-95	70-95
crivello 25						45-70	45-70
crivello 15						35-60	35-60
crivello 10						25-50	25-50
crivello 5						20-40	18-38
setaccio 2						6-20	6-20
setaccio 0.4						4-14	4-14
setaccio 0.18						4-8	4-8
setaccio 0.075							

Legenda: (1) le sigle M, L, P, PP si riferiscono al traffico, vedi paragrafo 5.3.1; (2) i primi valori si riferiscono ai misti bitumati ed i secondi ai conglomerati bituminosi; (3) in zone soggette al gelo; (4) con eventuale impiego di “dope” di adesione; (5) ad eccezione delle polveri di frantoio.

Tabella 3.4. *Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di binder*

DETERMINAZIONE	NORMA di riferimento	C.N.R. (1)				ANAS	Autostrade S.p.A.
		PP	P	M	L		
Frazione >4mm							
Contenuto di [%]:	b.u. 104/1984						
- rocce tenere alt. o scistose,		≤1	≤1	≤1	≤1		
- rocce degradabili		≤1	≤1	≤1	≤1		
Coeff. Los Angeles [%]	b.u. 34/1973	≤22	≤25	≤30	≤40	≤25	≤25
Porosità	b.u. 65/1978	≤1.5	≤1.5	-	-		
Micro Deval Umida [%]	b.u. 109/1985	≤20	≤20	≤25	≤35		
Quantità di frantumato [%]	-	≥90	≥90	≥80	≥70	100	100
Dim. max [mm]	b.u. 23/1971	30	30	30	30		
(sempre <2/3 spess. strato)							
Sens. al gelo (2) [%]	b.u. 80/1980	≤30	≤30	≤30	≤30		
Passante al setaccio 0.075 (3) [%]	b.u. 75/1980	≥35	≥35	≥25	≥25		
Spogliamento in acqua a 40°C (4)	b.u. 138/1992	≤5	≤5	≤5	≤5		
Indice di appiattimento	b.u. 95/1984	≤20	≤25	≤30	≤35		
Frazione 0.075÷4mm							
Quantità di frantumato [%]	-	≥40	≥40	-	-	-	≥70
Passante al setaccio 0.075 [%] (3)	b.u. 75/1980	≤2	≤2	≤2	≤3		
Equiv. in sabbia [%]	b.u. 27/1972	≥50	≥50	≥40	≥40	≥55	≥70
Filler							
Spogliamento in acqua della roccia di origine [%]	b.u. 138/1992	≤5	≤5	≤5	≤5		
Passante 0.18mm	b.u. 23/1971			100		100	100
Passante 0.075mm	b.u. 75/1980			80		65	65
Indice di plasticità	C.N.R.-UNI 10014			NP			
Vuoti Rigden	b.u. 123/1988			30÷45			
Granulometria [%]	b.u. 23/1971						
passante al crivello 25						100	100
crivello 15						65-100	65-100
crivello 10						50-80	50-80
crivello 5						30-60	30-60
setaccio 2						20-45	20-45
setaccio 0.4						7-25	7-25
setaccio 0.18						5-15	5-15
setaccio 0.075						4-8	4-8

Legenda: (1) le sigle M, L, P, PP si riferiscono al traffico, vedi paragrafo 5.3.1; (2) in zone soggette al gelo; (3) ad eccezione delle polveri di frantoio; (4) con eventuale impiego di “dope” di adesione. N.B.: Le norme C.N.R. (139/1992) non sono state ancora recepite dai capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a..

Tabella 3.5. Requisiti aggregati di misto bitumato e conglomerato bituminoso – Strati di usura

DETERMINAZIONE	NORMA di riferimento	C.N.R. (1)				ANAS	Autostrade S.p.A.
		PP	P	M	L		
Frazione >4mm							
Contenuto di [%]:	b.u. 104/1984						
- rocce tenere alt. o scistose,		≤1	≤1	≤1	≤1		
- rocce degradabili		≤1	≤1	≤1	≤1		
Coeff. Los Angeles [%]	b.u. 34/1973	≤18	≤20	≤20	≤25	≤20	≤20
Porosità	b.u. 65/1978	≤1.5	≤1.5	-	-		
Micro Deval Umida [%]	b.u. 109/1985	≤15	≤15	≤15	≤20		
Coeff. Levig. Accel. (5)	b.u. 140/1992	≥0.45	≥0.42	≥0.40	≥0.37		≥0.43 (≥0.44)
Quantità di frantumato [%]	-	100	100	100	100	100	100
Dim. max [mm]	b.u. 23/1971	20	20	20	20		
(sempre <2/3 spess. strato)							
Sens. al gelo (2) [%]	b.u. 80/1980	≤30	≤30	≤30	≤30		
Passante al setaccio 0.075 (3) [%]	b.u. 75/1980	≤1	≤1	≤1	≤2		
Spogliamento in acqua a 40°C (4)	b.u. 138/1992	≤0	≤0	≤0	≤0		
Indice di appiattimento	b.u. 95/1984	≤20	≤20	≤30	≤30		
Frazione 0.075+4mm							
Quantità di frantumato [%]	-	≥50	≥50	≥50	-	-	≥70 (≥80%)
Passante al setaccio 0.075 [%] (3)	b.u. 75/1980	≤2	≤2	≤2	≤3		
Equiv. in sabbia [%]	b.u. 27/1972	≥80	≥60	≥60	≥40	≥55	≥70 (≥70)
Filler							
Spogliamento in acqua della roccia di origine [%]	b.u. 138/1992	≤5	≤5	≤5	≤5		
Passante 0.18mm	b.u. 23/1971		100			100	100
Passante 0.075mm	b.u. 75/1980		80			65	65
Indice di plasticità	C.N.R.-UNI 10014		NP				
Vuoti Rigden	b.u. 123/1988		30÷45				
Granulometria [%] (5)	b.u. 23/1971						
passante al crivello 20						-	100 (100)
crivello 15						100	90-100 (90-100)
crivello 10						70-100	70-90 (35-50)
crivello 5						43-67	40-55 (10-25)
setaccio 2						25-45	25-38 (0-12)
setaccio 0.4						12-24	11-20 (0-10)
setaccio 0.18						7-15	8-15 (0-8)
setaccio 0.075						6-11	6-10 (0-6)

Legenda: (1) le sigle M, L, P, PP si riferiscono al traffico, vedi paragrafo 5.3.1; (2) in zone soggette al gelo; (3) ad eccezione delle polveri di frantoio; (4) con eventuale impiego di “dope” di adesione; (5) i valori tra parentesi si riferiscono ai conglomerati drenanti: la società Autostrade prescrive 3 fusi granulometrici per il conglomerato bituminoso drenante. Si è riportato quello intermedio, cioè il fuso B. N.B.: Le norme C.N.R. (139/1992) non sono state ancora recepite dai capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a..

Nel capitolo riguardante la sperimentazione di laboratorio, si riportano le caratteristiche dettagliate degli aggregati utilizzati durante i test.

3.1.1. *Gli aggregati calcarei*

Gli aggregati calcarei sono ottenuti, per macinazione di rocce, da depositi naturali di calcare: si prestano all'utilizzo come inerti per via delle loro proprietà chimiche e fisiche, sia per conglomerati bituminosi, sia per il confezionamento del calcestruzzo da costruzione. Trovano largo impiego per via delle alte prestazioni che riescono a garantire, pur mantenendo costi ragionevoli: inoltre forniscono standard adeguati anche per ciò che riguarda la salvaguardia ambientale. Dal punto di vista chimico, sono costituiti essenzialmente da carbonato di calcio ($CaCO_3$).

Esistono svariate ditte che commercializzano tali prodotti, che si possono reperire in un largo assortimento granulometrico: le caratteristiche che rendono possibile il loro impiego nell'ambito delle costruzioni sono molteplici. Principalmente garantiscono:

- ottimo rendimento dal punto di vista della resistenza all'usura, e, di conseguenza, della durabilità in esercizio;
- peso contenuto: gli aggregati calcarei risultano più leggeri di circa il 6% rispetto agli inerti di origine granitica;
- ottima permeabilità, che garantisce il mantenimento del naturale drenaggio dell'acqua (fattore importante soprattutto nelle strutture in cui lo smaltimento delle acque è un fattore cruciale);
- buona disponibilità e versatilità: come accennato, sono reperibili in diverse pezzature, rendendoli ideali per la più svariata serie di utilizzi (dalle dimensioni più grosse, sino al filler);
- ottima efficienza dal punto di vista qualità-prezzo (forse l'aggregato migliore da questo punto di vista).

Esistono alcune varianti di aggregati calcarei: i cosiddetti “calcarei bianchi”, che risultano persino più leggeri dei “calcarei grigi”, principalmente per la struttura molecolare microscopica con percentuale di vuoti maggiore (più leggeri anche del 10%).

Per tutta questa serie di motivi, gli aggregati calcarei trovano largo impiego nel settore delle costruzioni; tuttavia, l'ambito in cui vengono maggiormente utilizzati risulta essere proprio la realizzazione di pavimentazioni stradali, costituendo uno degli inerti maggiormente usati per la miscelazione al bitume e la composizione del conglomerato bituminoso.

Figura 3.6. *Pietrisco calcareo 40/70***Figura 3.7.** *Pietrisco calcareo 0/25*

3.1.2. *Le scorie di acciaieria*

In generale, la richiesta di pavimentazioni stradali sempre più sicure e performanti, e l'attenzione crescente verso tematiche di tipo ambientale, implicano una ricerca continua di nuovi materiali e nuove tecnologie per il miglioramento dei manufatti e la salvaguardia delle risorse naturali: in questa ottica, prende sempre più piede la consuetudine di rivolgere l'attenzione ai materiali di riciclo.

I processi industriali coinvolti nella produzione dell'acciaio comportano diverse tipologie di sottoprodotti, da sempre classificati come semplici "rifiuti". Ad oggi, tuttavia, sono comunemente compiuti svariati lavori di conversione di tali sottoprodotti, che diventano ampiamente

commerciabili: si definisce ormai comunemente il termine "scoria", anche se, popolarmente, viene ancora identificato come rifiuto. Fin da tempi remoti, gli scarti dell'industria siderurgica furono utilizzati con successo per applicazioni differenti: le scorie da altoforno, per esempio, sono a tutt'oggi impiegate per la realizzazione delle pavimentazioni stradali (o nell'ambito della produzione di conglomerati cementizi). Destino diverso riguarda le scorie ottenute dal processo di produzione dell'acciaio al forno elettrico (E.A.F. – Electric Arc Furnace), che tuttora pongono alcuni problemi nello smaltimento e nella gestione, nonostante le loro caratteristiche si prestino per gli stessi campi di applicazione delle scorie da altoforno. Non risultano infatti direttamente utilizzabili nelle condizioni in cui vengono ottenute, ma solo dopo severi e delicati trattamenti: sovente, nonostante manipolazione attenta e scrupolosa, possono ancora essere soggette a rigonfiamenti, o presentare problemi dovuti all'eccessiva lisciviazione. I trattamenti richiedono tempi piuttosto lunghi, e non sempre a favore ambientale; in generale necessitano dell'affinamento tecnologico degli impianti adibiti, dal punto di vista tecnico, della salvaguardia ambientale, e della gestione delle qualità e dei costi.

L'acciaio fabbricato in Italia e in Europa ogni anno è prodotto in larga misura al forno elettrico ad arco (E.A.F.) e, insieme all'altoforno, rappresenta il sistema di produzione prevalentemente utilizzato dalle acciaierie. Secondo quanto riportato nella Relazione Annuale della "Federacciai", la produzione annuale europea al forno elettrico ad arco, nel 2013, è stata approssimativamente di 200 milioni di tonnellate di acciaio grezzo, accompagnate da poco più del 10% di scorie da E.A.F., e da minori quantità di altri rifiuti quali polveri da abbattimento fumi, scorie di metallurgia secondaria e refrattari. Una parte delle scorie prodotte all'E.A.F. viene smaltita nelle discariche: solo una piccola percentuale di questo materiale viene trattata in modo che posseda le caratteristiche ambientali, fisiche e meccaniche, nel rispetto delle vigenti normative ambientali, per un possibile riutilizzo nell'ambito delle infrastrutture. La politica degli ultimi anni si spinge comunque verso la conservazione delle risorse e la prevenzione degli scarti, obiettivi comuni che possono non solo minimizzare l'inquinamento ambientale, ma anche generare occasioni di profitto.

La composizione chimica delle scorie ottenute dalla produzione dell'acciaio con forno ad arco elettrico è costituita da ossidi di diversi metalli; per circa il 90% del peso della scoria, sono ossidi di calcio, ferro, alluminio, magnesio e silicio. In particolare, alcuni ossidi, come quelli di calcio, silicio ed alluminio, derivano dalle materie prime additanti aggiunte al bagno: l'ossido di ferro deriva principalmente dall'ossidazione del bagno metallico, mentre quello di magnesio può essere intenzionalmente aggiunto, o provenire dall'erosione dei mattoni refrattari del forno da parte della

scoria liquida. I rimanenti risultano essere impurità connesse alla qualità del rottame ferroso (*Cr, Mo, Ti, V, Cu*, ecc.). Di fatto, dal punto di vista mineralogico, le scorie di acciaieria possono essere considerate simili a rocce provenienti da eruzioni vulcaniche: di conseguenza, la valorizzazione della scoria di acciaieria trae origine dalla sua assimilazione alle rocce dure naturali, e quindi dalla possibilità di sostituire materiale inerte in diversi settori, tra cui quello delle costruzioni, anche stradali. La scoria di acciaieria varia a seconda del tipo di acciaio prodotto (scoria E.A.F.-C., dalla produzione di acciaio al carbonio, e scoria E.A.F.-S. dalla produzione di acciaio inossidabile/altolegato) e la sua composizione chimica può presentare differenze legate alla tipologia del rottame utilizzato, alla quantità di ossigeno insufflato nel bagno e alla pratica di conduzione del forno. Il processo di produzione d'origine e quello di trasformazione della scoria influenzano il prodotto finale, e la possibilità di effettivo riutilizzo. Non tutte le scorie prodotte con E.A.F. possono essere riutilizzate: la mancanza di normative comuni e di linee guida di riferimento per quanto riguarda i test, le valutazioni, gli utilizzi e le verifiche nei settori di impiego delle scorie, provoca anche notevoli differenze fra le percentuali di riciclaggio dei differenti tipi di acciaierie; in aggiunta, tale lacuna lascia spazio al comune pregiudizio per cui le scorie potrebbero risultare potenzialmente pericolose e nocive per l'ambiente. Al fine di prevenire il possibile rilascio di elementi nocivi, si possono effettuare trattamenti di raffreddamento veloce sulle scorie E.A.F., come per altro già comunemente avviene per le scorie d'altoforno: si effettuano mediante granulazione in acqua, che porta alla produzione di scorie vetrose amorfe; isolando metalli ed ossidi, si produce un abbassamento della solubilità dei metalli pesanti, rendendo la scoria confrontabile ai materiali naturali inerti comunemente utilizzati per la fabbricazione delle pavimentazioni. Le scorie, così, riescono a soddisfare specifici parametri, garantendo adeguate prestazioni, sia dal punto di vista meccanico, sia da quello di stabilità. Affinché i materiali prodotti possano comunque essere utilizzati nel campo dei conglomerati bituminosi stradali è necessario qualificarli sulla base delle consuete prove granulometriche, geometriche e meccaniche.

Al fine di delineare, anche solo in termini generali, un contesto normativo di riferimento che coinvolga direttamente o indirettamente l'utilizzo delle scorie nell'ambito del settore delle costruzioni, occorre tener presente da un lato la tipologia di scoria a disposizione degli operatori, dall'altro i diversi campi di applicazione. Sicuramente, la concreta possibilità di riutilizzo del materiale deve dipendere dalla sua rispondenza alla normativa tecnica specifica per le diverse applicazioni finali, e dal rigoroso rispetto di tutte le normative in materia di tutela della salute umana e dell'ambiente. Ai sensi della normativa attualmente vigente esiste una classificazione "giuridica" del materiale, secondo la quale si possono presentare le seguenti situazioni:

- il materiale esce dallo stabilimento siderurgico come vero e proprio “prodotto”;
- il materiale esce dallo stabilimento come “sottoprodotto”, in conformità alle condizioni di cui all’art 184-bis del Decreto Legislativo 152/2006;
- il materiale esce dallo stabilimento in quanto “rifiuto”, per essere avviato a operazioni di recuperi autorizzate, finalizzate ad un suo successivo utilizzo, in conformità alle condizioni di cui all’art 184-ter del Decreto Legislativo 152/2006 e del Decreto Ministeriale 05/02/1998.

La Commissione Europea, mediante propria Comunicazione COM(2007)59, ha inteso fornire alcuni criteri di indirizzo, utili a distinguere, nell’ambito dei residui derivanti da un processo di produzione, ciò che è rifiuto da ciò che non lo è. Il recepimento della Direttiva CE 2008/98 (Direttiva quadro sui rifiuti) nell’ordinamento italiano, ha portato ad introdurre nel, D.Lgs. 152/2006, la nuova definizione di “sottoprodotto” (art. 184-bis), che risulta più estensiva rispetto alla precedente. Sono state così specificate le condizioni che un residuo di produzione industriale deve possedere, affinché ad esso si possa applicare lo status di “sottoprodotto”, escludendolo in tal modo dall’ambito dei rifiuti, sin dalla sua generazione, e garantendone un utilizzo nel rispetto della normativa:

“ ...

- la sostanza o l’oggetto originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;
- certo che la sostanza o l’oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;
- la sostanza o l’oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
- l’ulteriore utilizzo legale, ossia la sostanza o l’oggetto soddisfa, per l’utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell’ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull’ambiente o la salute umana.

...”

Inoltre, nel caso in cui un’azienda siderurgica decida di applicare alla propria scoria lo status

iniziale di “rifiuto”, possibile accertare successivamente la rispondenza del materiale a quanto disposto dal nuovo art. 184-ter del D.Lgs. 152/2006 “Cessazione della qualifica di rifiuto” (“End of waste”), per poterlo escludere dal campo di applicazione dei rifiuti, al verificarsi di determinate condizioni.

La valorizzazione delle scorie siderurgiche trova ampio spazio anche all'interno del B.R.E.F. (B.a.t. REference document), il documento tecnico di riferimento a livello comunitario che, ai sensi della normativa per la prevenzione e il controllo integrato dell'inquinamento (I.P.P.C.), individua e descrive, per ogni settore industriale, le migliori tecniche disponibili in campo ambientale (B.A.T. - Best Available Techniques). Il B.R.E.F. viene sottoposto a una revisione periodica, per tenere in considerazione lo sviluppo di nuove tecniche, e rappresenta il risultato finale del lavoro di un gruppo tecnico di livello europeo (T.W.G. - Technical Working Group), coordinato dall'E.I.P.P.C. Bureau della Commissione Europea (European Integrated Prevention Pollution and Control Bureau), a cui partecipano rappresentanti degli stati membri e del settore industriale oggetto di studio. Nel B.R.E.F. è anche descritta la normale pratica industriale e i trattamenti a cui vengono generalmente sottoposte le scorie siderurgiche per poter essere successivamente utilizzate come aggregato nelle opere di ingegneria civile e nella realizzazione delle pavimentazioni stradali.

In conclusione, se da un lato il concetto di “sottoprodotto” si applica a sostanze o materiali che non entrano mai nel regime dei rifiuti, la nozione di “End of waste” prevede un'operazione di recupero autorizzata sul rifiuto atta a “trasformarlo” in prodotto riutilizzabile. In generale, mentre in passato, anche a livello giurisprudenziale, la tendenza era quella di ampliare il più possibile la nozione di “rifiuto”, oggi si è fatta strada la tendenza opposta, che porta ad escludere dal novero dei rifiuti un serie di sostanze o materiali che originano come residui di attività industriali e che possono essere valorizzati e impiegati come veri e propri prodotti. Nel caso delle scorie siderurgiche questa tendenza è testimoniata dall'ampio spazio dedicato alla loro valorizzazione e alle tecniche di trattamento per il loro utilizzo, illustrate nel B.R.E.F..

Nel capitolo 4 “ Stato dell'arte”, sono riportati alcuni dati e risultati di studi che effettuano la comparazione tra aggregati tradizionali e scorie E.A.F. trattate per il riutilizzo.

Già in questo capitolo, si riportano comunque alcune considerazioni generali comunemente assodate. Per ciò che riguarda l'utilizzo di aggregati riciclati da processi di produzione siderurgici, si può affermare che:

- dal punto di vista ambientale si ottiene la minimizzazione della produzione di rifiuti da avviare a smaltimento, la riduzione dello sfruttamento delle risorse naturali e del ricorso a attività impattanti sul territorio (quali le cave per l'estrazione di inerti), il risparmio energetico e la diminuzione di emissioni di CO₂;
- nel campo delle costruzioni stradali dimostrabile l'aumento della durabilità delle pavimentazioni realizzate, e l'aumento della sicurezza di guida dovuta alle migliori caratteristiche di aderenza del manto stradale;
- le scorie riciclate presentano caratteristiche spesso migliori rispetto a inerti pregiati di origine effusiva, quali ad esempio basalto e porfido, usualmente impiegati per il confezionamento di conglomerati bituminosi speciali.

3.2. Legante: il bitume

Il bitume è una miscela estremamente complessa di idrocarburi naturali, o residuati derivanti dalla distillazione o raffinazione del greggio, che da luogo ad un sistema multifasico di natura colloidale. Si presenta come una sostanza bruna o nera, dal comportamento visco-elastico, le cui caratteristiche meccaniche sono molto sensibili alla temperatura e alla velocità di applicazione dei carichi. I bitumi di origine naturale si formano a seguito di fenomeni geologici naturali: la provenienza del greggio petrolifero ne definisce la quantità estraibile, e, marcatamente, ne caratterizza la qualità, dal punto di vista fisico, chimico e reologico.

Secondo quanto proposto dalla CNR 68/78, i bitumi possono essere definiti come "... composti organici costituiti sostanzialmente da miscele di idrocarburi, completamente solubili in solfuro di carbonio (CS₂) e dotati di capacità legante ...". Dal punto di vista chimico, i bitumi presentano percentuali in peso di carbonio e idrogeno variabili rispettivamente intorno all'80 e al 10%. Le percentuali di zolfo, ossigeno e azoto sono assai variabili (dall'1 al 10%). Le due classi chimiche principali presenti nel bitume sono gli asfalteni, che rappresentano il corpo viscoso del bitume, e i malteni, che costituiscono il componente più fluido. Agli asfalteni si attribuiscono le principali caratteristiche meccaniche e di adesione del bitume, mentre i malteni gli conferiscono la capacità di

ricoprimento di estese superfici di altro materiale, alla temperatura di lavorazione. La consistenza e la lavorabilità del bitume sono fortemente influenzate dalla temperatura: a temperatura ambiente la consistenza del bitume è quella di un solido; a temperature elevate avviene un progressivo rammollimento, mentre alle basse temperature si verifica una fragilizzazione.

Il bitume trova impiego nella tecnica stradale in quanto si realizzano pavimentazioni di conglomerati costituiti da legante bituminoso. I conglomerati sono interessati da intervalli di temperatura che, tipicamente, si considerano di $(-15 \div 60 \text{ }^\circ\text{C})$ per le fasi di esercizio su strada, e $(140 \div 180 \text{ }^\circ\text{C})$ per le fasi di confezionamento e posa in opera (per lo meno per quelli di tipo tradizionale, denominati di tipo “a caldo” [H.M.A. – Hot Mix Asphalt]).

I processi che possono interessare il bitume posto in opera sono molteplici: il più importante è quello che si verifica per ossidazione dei malteni e degli asfalti, con conseguenti fenomeni di irrigidimento e fragilizzazione della pavimentazione; è il fenomeno che viene comunemente denominato “invecchiamento”.

Per quanto detto, la forte dipendenza della consistenza dalle temperature provoca fenomeni di degrado assai diversi, che interessano sia il legante sia tutto il conglomerato. Il range di variazione delle temperature di esercizio è piuttosto ampio; sovente quindi si potrà verificare la contemporanea presenza di diversi meccanismi di rottura. La tendenza attuale rivolta all'utilizzo di leganti che consentano prestazioni soddisfacenti e buone caratteristiche di durabilità in tutte le situazioni: ovvero prestazioni adeguate di compromesso, sia alle alte sia alle basse temperature.

3.2.1. Le prove sui bitumi

Le caratteristiche dei bitumi vengono indagate secondo le vigenti normative. Di seguito se ne espone l'elenco:

Tabella 3.6. Prove classiche e normative di riferimento

Penetrazione	C.N.R. n° 24/71
Punto di rammollimento: metodo Palla-Anello	C.N.R. n° 35/73
Punto di rottura: metodo Fraass	C.N.R. n° 43/74
Duttilità	C.N.R. n° 44/74
Solubilità in solventi organici	C.N.R. n° 48/75
Perdita per riscaldamento: volatilità	C.N.R. n° 50/76
Perdita per riscaldamento: volatilità in strato sottile	C.N.R. n° 50/76
Contenuto in paraffina	C.N.R. n° 66/78
Punto di infiammabilità: metodo Cleveland	C.N.R. n° 72/79
Adesione e Coesione	---
Viscosità	---

Si riportano ora le descrizioni e i metodi operativi delle prove più importanti, estratti direttamente dalle normative di riferimento.

Prova di penetrazione: secondo quanto riportato nella vigente normativa C.N.R. – B.U. n° 24-71, la classe di penetrazione di un bitume viene indagata mediante prova empirica di penetrazione, misurando l'affondamento di un ago nel campione in esame. Il provino viene costituito portando a fusione il bitume, sopra la temperatura di rammollimento (determinabile con prova palla-anello), mediante riscaldamento ad aria: in presenza di residui d'acqua, la temperatura va portata sui 110 °C, per favorirne l'eliminazione, per un tempo non superiore ai 15 minuti. Il bitume fuso viene quindi versato nell'apposito stampo di metallo inossidabile, con diametro pari a 55 mm e altezza pari a 35 mm, e lasciato raffreddare, fino a temperatura ambiente, per un tempo di 1.5 - 2 ore. Successivamente, viene riscaldato per mezz'ora, mediante bagno d'acqua termostatico, alla temperatura standard di prova, di $(25 \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C})$, che viene mantenuta per tutta la durata dei test. L'ago costituito da un cilindro di acciaio inossidabile temperato e levigato, del diametro di $1.01 \pm 0.1 \text{ mm}$ e di lunghezza 51 mm, a punta smussata ad angolo retto, ed è montato su di un albero che ne consenta lo spostamento verticale senza apprezzabili valori d'attrito. Esso, ancora in posizione di blocco, viene portato a lieve contatto con la superficie del campione, e, una volta rimosso il blocco, agisce a gravità penetrando nel bitume (peso: $100 \pm 0.15 \text{ g}$). La prova dura

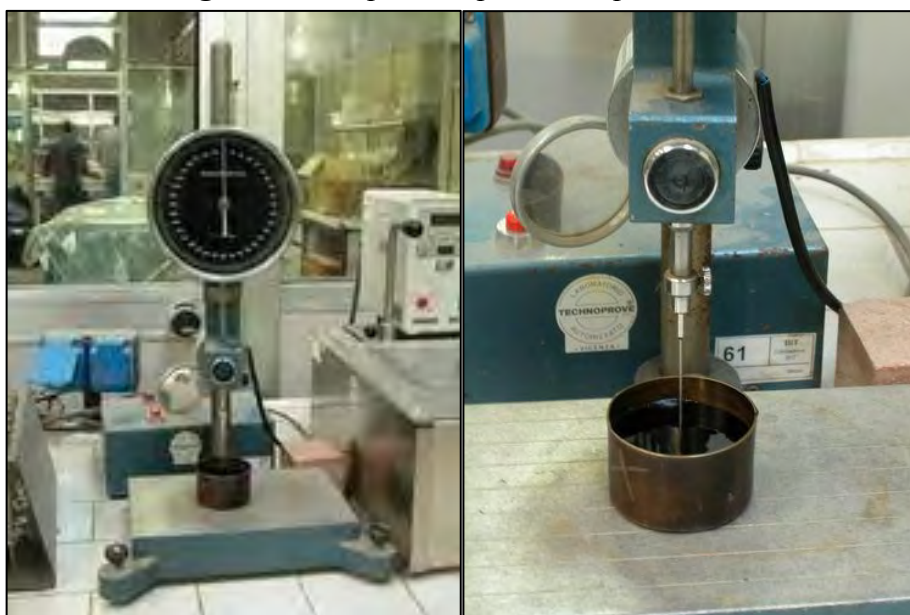
esattamente 5 secondi, dopo i quali si inserisce nuovamente il blocco dell'albero, e si può andare a rilevare la penetrazione avvenuta, espressa in decimillimetri. La prova va ripetuta per almeno 3 volte sullo stesso campione, in punti distanziati almeno 1 cm l'uno dall'altro: il valore di penetrazione finale sarà dato dalla media di tutti i valori ottenuti sullo stesso campione. La classificazione suddivide i tipi di bitume in 5 classi, secondo diversi range del valore di penetrazione in decimillimetri. In particolare:

Tabella 3.7. *Bitumi: classi di penetrazione*

40/50 (duri)	50/70	80/100	130/150	180/200 (molliti)
--------------	-------	--------	---------	-------------------

In particolare, l'A.N.A.S. richiede l'utilizzo di conglomerati bituminosi con legante di classe 50/70 per starti di base e superficiali (dove con classe 50/70 si intende un bitume che fornisce valori di penetrazione a 25 °C compresi tra i 50 e i 70 decimillimetri).

Figura 3.8. *Dispositivo per test di penetrazione*

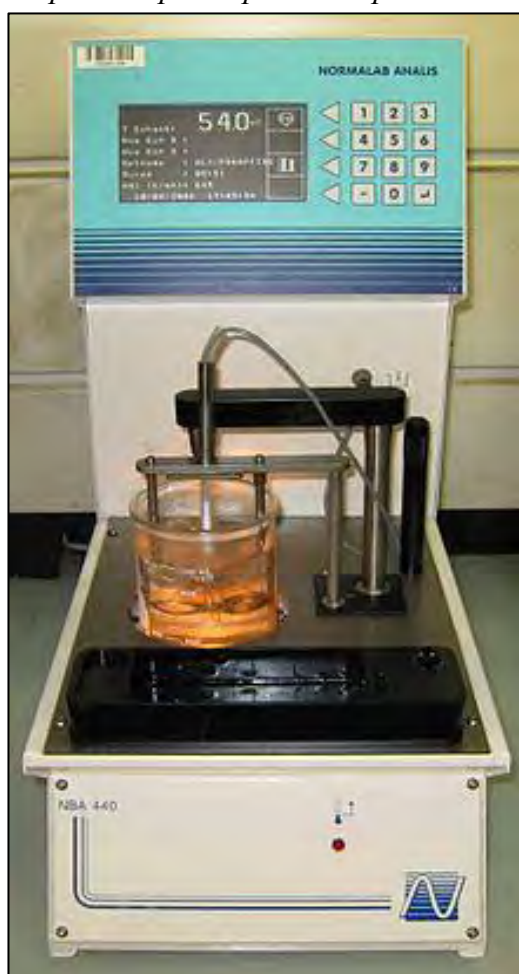


Punto di rammollimento: la prova determina a quale temperatura, un bitume progressivamente riscaldato, raggiunge una determinata consistenza: secondo quanto riportato nella vigente normativa C.N.R. – B.U. n° 35-73, viene eseguita testando il comportamento di 2 dischi di bitume, di dimensioni normate, riscaldati a temperature prossime ai 130 °C, agitati e colati all'interno di 2 anelli di ottone con bordi. Viene fornito un riscaldamento progressivo a velocità controllata, a partire dalla temperatura di 5 °C, con un gradiente costante di 5 ± 0.5 °C/min, mediante un bagno di acqua distillata che copra il campione per almeno 50 mm al di sopra del suo bordo superiore:

ognuno dei due campioni sostiene una biglia di acciaio del diametro di 9.53 mm e del peso di 3.50 ± 0.05 g. Con il progressivo riscaldamento si verifica il rammollimento del bitume, che sviluppa un rilassamento sotto il peso della biglia: la temperatura di rammollimento viene indicata come la media delle temperature (con tolleranza di ± 0.5 °C) a cui i 2 provini rammolliscono tanto da dare luogo ad un cedimento di 1 inch, che, nel Sistema Metrico Internazionale, viene fatto corrispondere ad un cedimento di 25.4 mm: qualora la differenza tra le 2 temperature sia superiore ad 1.0 °C la prova andrà ripetuta.

I valori della temperatura di rammollimento sono strettamente legati alla classe di penetrazione del bitume; in particolare, i bitumi cosiddetti “moli” avranno temperature di rammollimento più basse, viceversa i bitumi cosiddetti “duri” forniranno valori più alti. La normativa europea (UNI EN 1427) fornisce i valori di accettabilità per i bitumi da impiegarsi nella realizzazione di pavimentazioni: la minima classe di penetrazione a 25 °C richiesta è pari a 50/70; i valori di accettabilità per la temperatura di rammollimento sono normati, e variano a seconda della classe di penetrazione, in un range dai 35 ai 60 °C.

Figura 3.9. *Dispositivo per la prova del punto di rammollimento*



Punto di rottura: lo scopo della prova è quello di determinare, attraverso il punto di rottura, la temperatura alla quale un bitume solido o semisolido, raffreddato progressivamente, raggiunge un determinato grado di fragilità. Si utilizza la prova Fraass, che consiste nella stesura di un sottile strato di bitume su di una piastrina che viene ciclicamente inflessa a temperature via via decrescenti: le modalità operative differiscono a seconda del punto di rammollimento del bitume. Per bitumi con punto di rammollimento \leq di 70 °C, il campione viene preventivamente riscaldato ad una temperatura prossima ai 130 °C e agitato, per eliminare eventuali residui di acqua e condensa. Le piastrine, (41±0.5 mm x 20±0.2 mm x 0.15±0.02 mm) costituite di acciaio inossidabile, pulite con apposito solvente e asciugate se necessario, vengono manualmente inflesse, per determinare quale sia il loro verso di inflessione naturale: il bitume va posizionato sulla faccia esterna, ovvero quella che tende alla convessità. Dapprima, si posiziona sulla faccia della piastrina una quantità di materiale pari a 0.40±0.01 ml, allo stato solido o semi-solido; la piastrina viene collocata sul supporto del bagno di riscaldamento con il quale si controlla la temperatura. Avviene quindi il riscaldamento fino a temperature di 70 – 80 °C, (comunque al di sotto del punto di rammollimento), in modo che il bitume diventi fluido e si possa distribuire sulla superficie della piastrina, inclinandola progressivamente, e ricoprendola completamente di un sottile film: si riscalda nuovamente per un breve periodo per uniformare e lisciare definitivamente il film, e si procede a raffreddamento per eliminare eventuali bolle d'aria e imperfezioni. Il dispositivo di prova costituito da un sistema di inflessione a due graffe, entro le quali viene posta la piastrina: il sistema, come detto, è avvolto da una camera con bagno per il controllo della temperatura, costituito da acetone. Si porta quindi la temperatura a 10 °C al di sopra del previsto punto di rottura e si provvede al progressivo raffreddamento: mediante l'aggiunta di anidride carbonica si garantisce una diminuzione di temperatura di 1.0 °C al minuto. L'inflessione avviene una volta per ogni minuto, mediante un dispositivo a manovella che ruota di 1 giro al secondo. Il punto di rottura coincide alla temperatura a cui si verifica la prima fessura sul film di bitume aderente alla piastrina; generalmente si effettuano 2 prove su 2 piastrine spalmate dello stesso bitume, e il valore finale è la media delle 2 temperature, purché non differisca di più di 2 °C (nell'eventualità si dovrà ripetere la stesura del bitume e la prova).

Per quanto riguarda i bitumi con punto di rammollimento superiore ai 70 °C, si riscaldano 200 g di materiale fino a che diventa sufficientemente fluido da poter essere colato, comunque fino ad un massimo di 100 °C al di sopra del suo punto di rammollimento: si stende sulle piastrine fino a ricoprimento, per uno strato dello spessore di 2 mm, con l'ausilio di una pressa e di un cellophane protettivo. Le modalità di inflessione e di determinazione del punto di rottura sono identiche a quelle per i bitumi con punto di rammollimento inferiore ai 70 °C.

Figura 3.10. *Dispositivo per la prova del punto di rottura*



I valori del punto di rottura accettabili variano dai -6 ai +14 °C, in funzione della classe di penetrazione del bitume.

3.3. I conglomerati bituminosi

Sono dei conglomerati artificiali costituiti da una miscela di aggregati, tradizionali o di riciclo, e da un legante di tipo bituminoso, tradizionale o modificato con aggiunta di polimeri: possono essere aggiunti anche additivi che vadano a modificarne le caratteristiche o a migliorarne le performance. La miscela viene utilizzata per la realizzazione delle pavimentazioni utilizzate in ambito stradale, e più precisamente negli strati superiori, quali usura o binder: deve essere in grado di sopportare i carichi derivanti dal traffico senza dislocarsi o ammalorarsi. Per i conglomerati utilizzati superficialmente, che vengono posti a contatto con il pneumatico, sono richieste prestazioni ottimali, e in generale il soddisfacimento di un'ampia serie di requisiti.

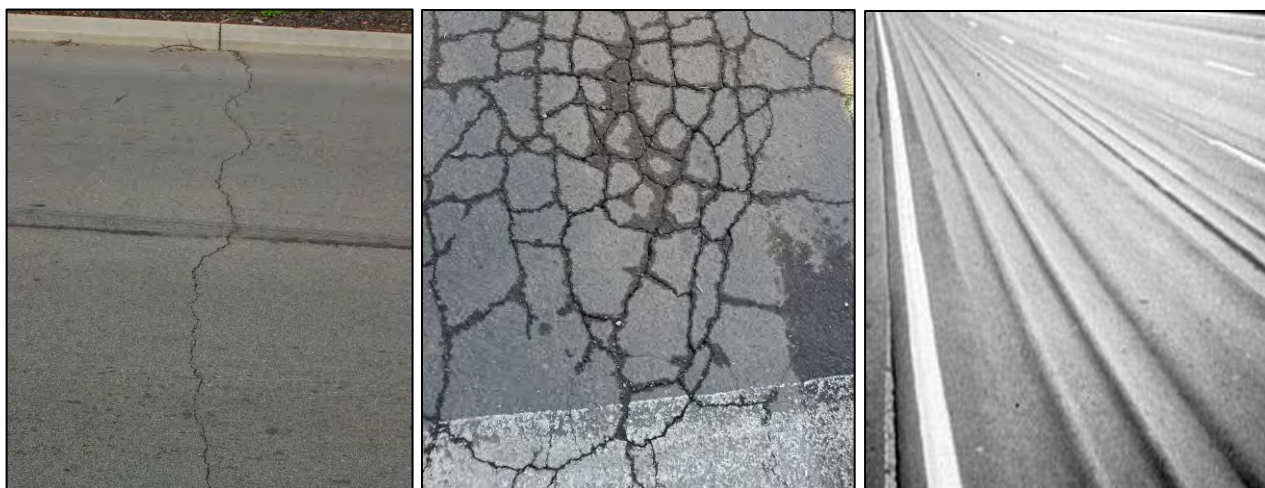
Innanzitutto, il conglomerato deve garantire un coefficiente di aderenza elevato, ai fini della sicurezza: dipende dalla natura delle superfici a contatto con lo pneumatico e dalla micro e macro tessitura propria del conglomerato. Non meno importante, dallo stato della pavimentazione: è infatti importante l'aspetto che riguarda la durabilità, ovvero l'attitudine a conservare le caratteristiche fisiche e meccaniche di materiale e struttura, affinché siano garantiti adeguati livelli di sicurezza durante la vita utile dell'opera. Le principali cause di degrado sono imputabili all'azione aggressiva degli agenti atmosferici e al traffico che sollecita la struttura, e possono provocare ammaloramenti, fessurazione e l'instaurarsi di meccanismi di rottura. Come visto in precedenza, il legante che permea il conglomerato bituminoso è assai sensibile alle variazioni di temperatura in esercizio, che per altro risultano essere severe; e il conglomerato, come prevedibile, risente fortemente di tale caratteristica.

In particolare, si distinguono 3 meccanismi di rottura diversi, ognuno competente a diverse temperature. Il meccanismo di rottura che avviene alle basse temperature provoca la fessurazione istantanea per sbalzo termico della pavimentazione: la rottura è dovuta a restringimenti e contrazioni successive della struttura molecolare del materiale. Nel caso in cui la resistenza a trazione della pavimentazione sia inferiore agli stati di coazione indotti dalla temperatura avviene la rottura per sbalzo termico, che si manifesta con una fessura concentrata in direzione trasversale rispetto al traffico. Paradossalmente, non è necessario il passaggio di alcun veicolo per il verificarsi di tale condizione. Alle temperature prossime ai 20 °C, generalmente si identifica un meccanismo di rottura diverso: avviene la rottura per fatica, causata da un accumulo di danno; è un fenomeno piuttosto severo, e può essere ulteriormente aggravato dal processo di invecchiamento del bitume che, mediante ossidazione di malteni e asfaltini, provoca l'irrigidimento e la fragilizzazione della

pavimentazione. In particolare, si manifesta con due particolari modalità: il meccanismo *bottom-up*, vede la propagazione delle fessure dal basso verso l'alto. Il peso trasferito allo pneumatico provoca la flessione della pavimentazione, in particolare tra strati legati e non legati, con il conseguente instaurarsi di sollecitazioni di trazione. Il passaggio ripetuto dei veicoli provoca microfessurazioni proprio su questa interfaccia, che al susseguirsi delle sollecitazioni si propagano verso la superficie. Il meccanismo *top-down*, invece, vede la propagazione delle fessurazioni verso il basso: sullo strato superficiale, il passaggio dello pneumatico induce compressione nei punti di contatto, e conseguente trazione nei punti adiacenti liberi dal passaggio della ruota. Ancora una volta, al susseguirsi dei passaggi veicolari, si creano microfessurazioni nelle porzioni tese, che si propagano poi verso il basso. In entrambi i casi la pavimentazione risulta localmente compromessa, con le fessurazioni che ne interessano l'intero spessore. Visivamente si possono distinguere fessure perpendicolari nelle direzioni longitudinale e trasversale al traffico, coesistendo entrambi i meccanismi di rottura (la cosiddetta manifestazione a "pelle di cocodrillo"): inoltre, il punto di contatto pavimentazione-pneumatico non è mai sempre lo stesso, fattore che amplifica la propagazione delle aree fessurate per questo tipo di rottura. Il terzo meccanismo di rottura avviene generalmente alle temperature di esercizio più alte, oltre i 40 °C, ed è definito come ormaiamento: è provocato da un accumulo di deformazioni viscosse permanenti. Si presenta dopo la fase che vede il cedimento naturale della struttura, che si verifica per il primo periodo dopo l'apertura al traffico; si manifesta con sentieri depressi nella zona di contatto con lo pneumatico, e piccoli avvallamenti laterali nelle zone adiacenti: risulta quindi compromessa la regolarità della pavimentazione e possono crearsi pericolosi accumuli d'acqua. Il fenomeno non si deve confondere con altri tipi di dissesto: qualora fossero presenti solo dei solchi, senza avvallamenti laterali, la causa è da attribuire ad un errato dimensionamento degli strati che costituiscono la struttura.

In generale, il fenomeno di degrado delle pavimentazioni è piuttosto complesso: per altro, oltre alle temperature a cui è soggetta la struttura, intervengono in maniera sensibile altri fattori. La velocità di applicazione dei carichi è uno di essi; risulta intuitivo come un veicolo ad alta velocità provochi sollecitazioni ben diverse dal transito di un veicolo a velocità ridotte (generalmente il più gravoso). Un chiaro esempio di complessità si evince già analizzando congiuntamente i diversi meccanismi di fessurazione, in funzione solo delle diverse temperature di esercizio: il fenomeno della fessurazione a fatica, imputabile a sollecitazioni che avvengono a temperature prossime ai 20 °C, può essere prevenuto con l'utilizzo di conglomerati in cui il legante risulta maggiormente tenero. Di contro, il meccanismo dell'ormaiamento a temperature elevate, si può prevenire con conglomerati costituiti da bitumi a rigidità elevata.

Figura 3.11. *Tipici ammaloramenti: fessurazione termica; fatica; ormaiamento*



Come già espresso nella trattazione del legante, la tendenza attuale è quindi rivolta alla ricerca di conglomerati che garantiscano caratteristiche di compromesso, ovvero che forniscano prestazioni accettabili, dal punto di vista della funzionalità e della durabilità, nelle diverse condizioni in cui la struttura si trovi ad operare, siano esse dovute alle variazioni di temperature, alle velocità e alla frequenza delle sollecitazioni, e a tutti gli altri fattori che concorrono al degrado. In ultima istanza, non si possono trascurare comunque considerazioni di tipo economico, sicuramente non marginali nel processo produttivo delle pavimentazioni stradali.

3.3.1. I conglomerati tradizionali

I conglomerati bituminosi tradizionali vengono definiti anche “a caldo”: la composizione classica prevede la miscelazione degli inerti e del legante bitume. Nel caso dei conglomerati modificati si possono avere aggiunte di additivi per scopi diversi, o direttamente l’utilizzo di bitume modificato con polimeri. La definizione “a caldo” prende origine dalle modalità di confezionamento e posa in opera del conglomerato: la produzione avviene in stabilimento, dapprima mescolando gli inerti sino ad ottenere l’assortimento granulometrico di progetto, e poi aggiungendo, per spruzzo, il legante bituminoso. La temperatura degli aggregati, all’atto della miscelazione negli impianti di produzione, è generalmente compresa tra i 160 e 180 °C; quella del legante (bitume), tra 150 e 170 °C.

Una volta miscelato, il conglomerato può essere trasportato fino al luogo di posa, dove possono avvenire le operazioni di stesura. I camion sono adibiti al trasporto dei materiali, e sono dotati di un pianale ribaltabile, copribile da un telone avvolgente per evitare raffreddamenti superficiali e conseguente formazione di crostoni sulla miscela. Nell'organizzazione del cantiere, la percorrenza stradale, dall'impianto di confezionamento al cantiere di stesa, non dovrà richiedere un tempo eccessivamente lungo, per evitare il raffreddamento del conglomerato. Qualora l'intervento preveda il rifacimento di una pavimentazione esistente, le scarificatrici, dotate di lame raschianti e nastro trasportatore, consentono di effettuare la cosiddetta "scarifica a freddo" del conglomerato bituminoso, ossia un'operazione di fresatura e pulizia del materiale della vecchia pavimentazione su cui intervenire. Il nastro trasportatore consente di convogliare il materiale di risulta fresato direttamente su cassoni di camion, per il successivo allontanamento dal cantiere. Le pulitrici, poi, consentono la perfetta pulizia del piano di posa, successiva agli interventi di scarifica, in modo da permettere la posa del conglomerato su di un piano perfettamente pulito, scevro da polveri e privo di residui di qualsiasi natura. La preparazione e la stesura del conglomerato, avviene mediante le macchine emulsionatrici, costituite da una caldaia per mantenere fluido il bitume, e da un irroratore a pressione, azionabile manualmente dall'operatore, per stendere uniformemente l'emulsione sulla zona di lavoro. Il bitume irrorato ha la funzione di collante, e va steso anche qualora si debba incollare uno strato di conglomerato bituminoso su di uno preesistente. Per mezzo delle vibrofinitrici, poi, avviene la posa del conglomerato bituminoso: sono dotate di una tramoggia per il carico del materiale da posare, nastri trasportatori, una piastra livellatrice riscaldata mediante bruciatori atmosferici alimentati a GPL, e automatismi di auto-livellamento. L'obiettivo di ottenere uno strato finito perfettamente sagomato, privo di sgranamenti, fessurazioni ed esente da difetti dovuti a segregazione degli elementi più grossi: a tale fine, le velocità di avanzamento delle vibrofinitrici sono estremamente basse (di circa 4 - 5 m/min). In questa fase, non si esclude l'intervento diretto degli operatori per agevolare le operazioni e correggere eventuali difetti e imperfezioni non ottimizzati dalle macchine. Infine, i rulli vibranti (gommati o metallici) sono utilizzati per costipare il manto di usura delle pavimentazioni in conglomerato: possono comunque essere utilizzati anche per la costipazione del binder e del sottofondo.

La temperatura del conglomerato alla stesa è superiore ai 150°C: in generale, la miscela non va sottoposta a temperature eccessivamente elevate, poiché si potrebbero compromettere le proprietà leganti del bitume: tuttavia, la lavorabilità non può prescindere dal riscaldamento, fino ad ottenere una consistenza adeguata alle operazioni. Solitamente, il periodo ideale di confezionamento e di stesura della miscela bituminosa è quello che va da Marzo a Novembre, particolarmente in presenza

di buone condizioni atmosferiche e di moderati livelli di umidità. Si riporta di seguito qualche immagine riguardante le apparecchiature e le operazioni di stesura.

Figura 3.12. *Scarificatore in azione*



Figura 3.13. *Modello di vibrofinitrice*



Figura 3.14. *Finitura con rullo*



Si illustrano di seguito, a titolo informativo, le prescrizioni relative ai conglomerati bituminosi a caldo estratte dal capitolato A.N.A.S. e dalle norme tecniche di appalto di Autostrade S.p.a..

Tabella 3.8. *Prescrizioni conglomerati a caldo - capitolati A.N.A.S. e Autostrade S.p.a.*

STRATO	CAPITOLATO ANAS		N.T.A. AUTOSTRADE S.p.A.	
	%bitume	%Vuoti	%bitume	%Vuoti
Base	3.5÷4.5	4÷7	4÷5	4÷7 (4÷7)
Collegamento	4.0÷5.5	3÷7	4.5÷5.0	3÷6 (3÷6)
Collegamento per ponti	-	-	5.0÷6.0	2÷4
Usura ordinaria	4.5÷6.0	3÷6	4.5÷6.0	4÷6 (3÷6)
Usura Drenante	-	-	5÷6.5	fuso A 16÷18 fuso B 14÷16 fuso C 12÷14
Usura per ponti	-	-	5.5÷6.5	2÷4

Legenda: (1) i valori tra le parentesi si riferiscono ai conglomerati riciclati in centrale, per quelli riciclati in sito è sempre richiesta una percentuale dei vuoti Marshall compresa tra 4 e 6.

3.3.2. I conglomerati tiepidi

L'aggiunta di additivi tiepidi (warm) al legante bituminoso, consente di ottenere un conglomerato denominato tiepido (W.M.A. - Warm Mix Asphalt): la sua principale peculiarità si riscontra nelle minori temperature di produzione e applicazione in opera, anche di 20÷40 °C inferiori alle temperature necessarie a tali operazioni per un conglomerato bituminoso tradizionale (H.M.A. – Hot Mix Asphalt).

La produzione del conglomerato può avvenire a temperature tra i 100 °C e i 150 °C, fornendo comunque alla pavimentazione proprietà e caratteristiche prestazionali del tutto simili a quelle di un conglomerato bituminoso tradizionale. Ne derivano però una serie di vantaggi che riguardano principalmente:

- minori emissioni, con riduzione anche del 50%, con conseguente miglioramento delle condizioni di lavoro per gli addetti alla posa in opera;
- riduzione dei fumi del 50% per ogni abbassamento di 12 °C, ancora con la conseguenza del miglioramento delle condizioni di lavoro del personale addetto;
- conseguenti benefici dal punto di vista ambientale, per le ridotte emissioni, ed anche per ciò che concerne l'energia necessaria alle operazioni (minore anche del 30%);

- benefici sulle caratteristiche, quali minore effetto di irrigidimento (“hardening”) del bitume, garantendo comunque la compatibilità con l’uso di pavimentazioni a base di bitume riciclato (R.A.P. – Recycled Asphalt Pavement);
- vantaggi in termini di tempo nelle operazioni di posa in opera, che può essere impiegato per le fasi di trasporto e compattazione;
- vantaggi in termini di tempo nella fase di raffreddamento, con conseguente diminuzione dei tempi necessari per l’apertura al traffico.

Le attuali tecniche di produzione di conglomerati bituminosi sono divise in 3 grandi tipologie:

- Conglomerato Bituminoso a Freddo (*C.M.: Cold Mixes*): prodotte con aggregato non riscaldato ed emulsione bituminosa o bitume schiumato
- Conglomerato Bituminoso Tiepido (*W.M.A.: Warm Mix Asphalt*): prodotto e miscelato a temperature comprese tra i 100 e i 150 °C.
- Conglomerato Bituminoso a Caldo (*H.M.A.: Hot Mix Asphalt*): prodotto e miscelato a temperature comprese tra i 120 e i 190 °C. La temperatura di produzione dipende dal tipo di bitume utilizzato.

I primi utilizzi di conglomerati W.M.A. furono sviluppati alla fine degli anni ,90, con i test sui primi additivi effettuati in Germania e in Norvegia e lo sviluppo del processo WAM-FOAM®.

3.3.2.1. La produzione

La tecnologia W.M.A., operando comunque in un range di temperature superiori ai 100 °C, garantisce che i residui di acqua all'interno del conglomerato siano pressoché insignificanti.

Sono utilizzate svariate tecniche per ridurre l'effettiva viscosità del bitume, in modo da consentirne l'utilizzo e la compattazione alle basse temperature. Le principali tecniche prevedono l'utilizzo di:

- Additivi Organici: vengono utilizzati diversi tipi di additivi organici per abbassare la viscosità del bitume a temperature di circa 90 °C: un additivo comunemente usato è una speciale cera di paraffina prodotta dalla conversione di gas naturale. Gli additivi organici forniscono tipicamente riduzione di temperatura tra i 20 e i 30 °C e incrementano inoltre la resistenza del conglomerato.
- Additivi Chimici: gli additivi chimici non modificano la viscosità del bitume. In quanto tensioattivi, lavorano a livello microscopico all'interfaccia bitume-aggregato. Regolano e riducono le forze d'attrito in un determinato range di temperatura, tipicamente tra i 140 e gli 85 °C. E' inoltre possibile il mescolamento degli aggregati e del bitume e la compattazione del conglomerato a basse temperature. Gli additivi chimici possono ridurre la temperatura di compattazione anche di 20 – 40 °C.
- Schiumatura: una buona varietà di tecniche di schiumatura è impiegata per abbassare la viscosità del bitume: sono utilizzate svariate tecniche per introdurre piccole quantità d'acqua all'interno del legante caldo. L'acqua, una volta trasformata in vapore, aumenta il volume del bitume e ne riduce la viscosità per un breve periodo di tempo. L'espansione del legante consente il ricoprimento degli aggregati alle basse temperature e l'umidità residua aiuta la compattazione nel sito di posa in opera. Temperatura di produzione e di stesura possono essere ridotte in parallelo. Le principali tecniche di schiumaggio utilizzate sono:
 - il *metodo di schiumatura diretta*: prevede l'iniezione di una piccola ed esatta quantità d'acqua nel bitume caldo mediante un ugello schiumante. Il risultato è un sensibile, ma di breve durata, incremento del volume del bitume, che facilita le operazioni di ricoprimento alle basse temperature. Una piccola quantità di vapore rimane comunque all'interno del legante, riducendone l'effettiva viscosità e favorendo il processo di compattazione. Durante il raffreddamento, il bitume ritorna allo stato originale, date le piccole quantità d'acqua introdotte. Questa tecnica può garantire una riduzione della temperatura del conglomerato di

circa 20 – 40 °C.

- Il *metodo di schiumatura indiretta*: utilizza un minerale come fonte di schiumatura dell'acqua: si usano principalmente minerali idrofilici della famiglia degli zeoliti, che contengono circa il 20% di acqua cristallina, che viene rilasciata sopra i 100 °C. Tale fenomeno crea un effetto di schiumatura controllato, che può fornire un miglioramento della lavorabilità per un periodo che dura dalle 6 alle 7 ore, o fino a che la temperatura non ritorni a scendere sotto i 100 °C. La schiumatura provoca l'aumento di lavorabilità del conglomerato, per cui si possono conseguentemente adottare temperature di miscelazione minori di circa 30 °C, ed ottenere gli stessi risultati di un processo standard.
- Un secondo *metodo di schiumatura indiretta* utilizza l'umidità della sabbia per generare una schiuma che si crei naturalmente. È una tecnica sequenziale: l'aggregato grossolano, che rappresenta circa l'80% del mix-design, è riscaldato/asciugato a 130-160 °C, ed è poi rivestito dal bitume, che crea un sottile strato ricoprente la parte grossolana. Successivamente, si ha l'aggiunta della frazione fredda umida: l'umidità in contatto col bitume caldo causa la schiumatura che facilita il rivestimento dell'aggregato fine freddo appena aggiunto. Tale tecnica consente le stesse riduzioni di temperatura della tecnica di schiumatura diretta (20 – 40 °C).

3.3.2.2. Studi e standard normativi

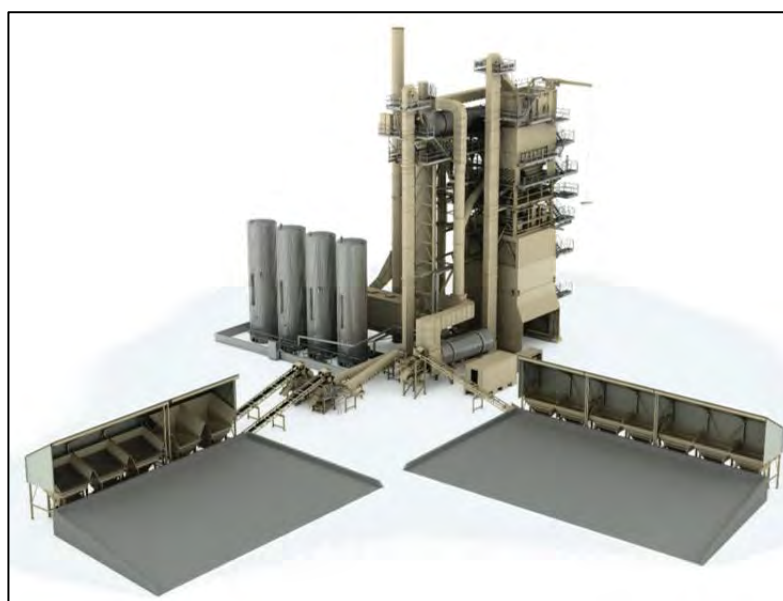
Studi sviluppati: un importante contributo sullo studio dei conglomerati W.M.A. è stato fornito, nel Novembre del 2012, dalla “Review of Overseas Trials of Warm Mix Asphalt Pavements and Current Usage by Austroads Members”, elaborazione sviluppata nel “AUSTROADS TECHNICAL REPORT - AP-T215-12” in Australia, nella quale vengono raccolte le esperienze di svariati paesi nell'utilizzo di tali tecnologie, con focus sulle differenze prestazionali tra W.M.A. e conglomerati tradizionali. Sono state sviluppate ricerche a riguardo anche in ambito statunitense, presso il “N.C.A.T. - National Center for Asphalt Technology” di Auburn, Alabama, e presso il “U.C.P.R.C. - University of California Pavement Research Center”, conducendo numerose indagini sulle differenze prestazionali tra conglomerati W.M.A. e tradizionali, sottoposti a sollecitazioni mediante “H.V.S. – Heavy Vehicle Simulator”. Analizzando in particolare le fasi di produzione, le fasi di

posa in opera, e monitorandone le performance in esercizio, si è evidenziato come la risposta dei W.M.A. sia pienamente comparabile a quella dei conglomerati caldi tradizionali, e, in alcuni casi, addirittura migliore. Numerosi studi sono stati sviluppati anche in Europa, evidenziando lo stesso trend, dal punto di vista delle proprietà meccaniche e delle performance delle pavimentazioni in esercizio.

Standard europei: lo standard europeo per i conglomerati bituminosi (EN 13108-1 a -7) non preclude l'utilizzo dei conglomerati bituminosi tiepidi. Include comunque le massime temperature per conglomerati particolari, ma non vengono menzionate temperature minime di accettabilità. La temperatura minima del conglomerato alla messa in commercio viene dichiarata dal produttore. Lo standard contiene inoltre indicazioni sull'utilizzo di conglomerati additivati, con relativi protocolli di dimostrazione di garanzia di prestazioni equivalenti ai conglomerati tradizionali. Di conseguenza, lo standard europeo non deve essere visto come una limitazione / impedimento all'utilizzo dei conglomerati W.M.A.

Impianti con W.M.A.: la miscelazione dei bitumi a temperature minori influenza l'intero processo di produzione dei conglomerati. Vi sono cambiamenti del processo direttamente correlati alle tecnologie di produzione, come per esempio la generazione di schiuma, ed altre equipaggiamenti opzionali adibiti alla produzione dei W.M.A..

Figura 3.15. Sistema di impianti per la miscelazione del conglomerato bituminoso



In generale va evitata la condensazione dei gas esausti d'impianto, limitando la temperatura entro limiti accettabili mediante eventuali elementi di sfogo, e prevenendo l'intasamento dei filtri, che può persino portare alla corrosione degli elementi metallici. La produzione di conglomerati a temperature inferiori cambia logicamente il processo termico all'interno delle camere di asciugatura, che possono presentare caratteristiche diverse rispetto a quelle di un impianto tradizionale: generalmente, la struttura consente processi di riscaldamento e asciugatura mediante rotazione e variazione di velocità dell'aria.

Figura 3.16. *Sistema di filtraggio delle emissioni*



La presenza di dispositivi per la schiumatura dei bitumi aumenta sicuramente i costi di realizzazione dell'impianto (generatore di schiuma, dispositivi di iniezione dell'acqua). Anche in presenza di additivi, l'impianto dovrà essere più complesso: sia per la realizzazione dei dispositivi di stoccaggio, sia per i dispositivi di aggiunta/miscelazione, che spesso necessitano di sistemi sofisticati per la corretta erogazione nel tempo degli additivi e per l'eventuale mescolamento, se richiesto. Nonostante la complessità di un impianto per la produzione di conglomerati W.M.A. sia maggiore, e sia necessario un attento controllo di qualità sulle operazioni, i benefici ottenibili risultano comunque appetibili nell'ottica di comparazione ad un impianto di produzione di tipo tradizionale.

3.3.2.3. L'utilizzo dei W.M.A.

Sin dagli inizi del nuovo secolo, e specialmente nell'ultimo decennio, si è verificato un incremento esponenziale nell'utilizzo di conglomerati bituminosi W.M.A., specie in paesi europei quali Danimarca, Francia, Norvegia e Svezia (solo dagli ultimi 3 anni). Si riporta un'interessante statistica che riguarda invece gli Stati Uniti, dove l'utilizzo dei conglomerati tiepidi ha subito, negli ultimi anni, una diffusione ben maggiore che negli stati europei.

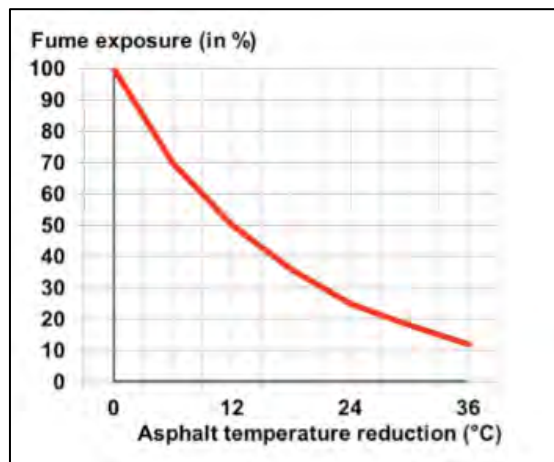
Tabelle 3.9. Statistiche sull'utilizzo dei W.M.A.

Year	Million tonnes of WMA	Tot. Asph. production [Million tonnes]	% WMA
2009	15.2	325	5 %
2010	37.3	326	11 %
2011	62.3	332	19 %
2012	77.1	323.5	24 %

Plant foaming	88.1 %
Chemical additive	9.6 %
Additive foaming	2.1 %
Organic additive	0.2 %

Il crescente impiego di conglomerati bituminosi tiepidi, negli ultimi anni, ha consentito lo sviluppo di studi mirati, non solo ad indagare, ma anche a quantificare i benefici derivanti dal loro utilizzo, sostituendo di fatto i conglomerati tradizionali caldi. Si riportano di seguito alcuni dati resi noti dalle pubblicazioni del sito dell'E.A.P.A. (European Asphalt Pavement Association).

- Miglioramento della qualità del lavoro: le minori temperature di miscelazione e stesura hanno indubbiamente minimizzato i fumi e le emissioni odorose derivanti dalle manipolazione del bitume, creando di fatto delle condizioni di lavoro sicuramente meno impattanti per gli addetti alle operazioni di posa in opera delle pavimentazioni. Il grafico proposto evidenzia come il rilascio di fumi sia ridotto del 50% per ogni diminuzione di 12°C: di conseguenza, un'attendibile riduzione di temperatura di circa 25°C conduce alla riduzione delle emissioni di fumi di ben il 75%, con evidenti benefici. Oltretutto, tale riduzione in termini di emissioni è la ragione più importante per cui l'industria europea del bitume spinge affinché si utilizzino, sempre più largamente, conglomerati di tipo W.M.A..

Grafico 3.1. *Andamento emissioni/temperature W.M.A.*

Uno studio riguardante le emissioni è stato effettuato, nel 2009, dalla “I.A.R.C. – International Agency for Research on Cancer”, dal titolo “A Case-Control Study of Lung Cancer Nested in a Cohort of European Asphalt Workers”, che ha messo in luce come non sembrano esserci correlazioni tra il rischio di cancro nel lungo periodo e l’esposizione ai fumi di bitume nelle fasi di manipolazione e posa in opera. Tuttavia, nella parte finale, viene sottolineata l’importanza dell’obiettivo della riduzione delle inalazioni e delle esposizioni dermatologiche al bitume negli ambienti di lavoro interessati.

- Benefici ambientali: come ovvio, a causa delle ridotte temperature di produzione dei conglomerati W.M.A., si ha minore consumo di carburante necessario ad alimentare le attrezzature per il riscaldamento delle miscele: ciò garantisce quindi minori emissioni totali dell’impianto di produzione del conglomerato. La quantificazione di tale riduzione dipende da diversi fattori, che andrebbero considerati caso per caso, tuttavia: le minori temperature richieste consentono sensibili riduzioni nelle emissioni dei camini d’impianto; il ridotto utilizzo di carburante ed energia consente la riduzione nelle emissioni di gas quali CO₂ e carbonio. Si riportano di seguito alcuni valori estratti da diversi studi:
 - *Warm-Mix Asphalt: European Practice; International Technology Scanning Program, FHWA-PL-08-007, February 2008, FHWA-HPIP, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA:*

“... valori rilevati con l’utilizzo di conglomerati W.M.A. rispetto a conglomerati tradizionali:

 - Produzione di CO₂ ridotta nell’ordine del 20-40%.
 - Produzione di SO₂ ridotta nell’ordine del 35-50%.
 - Produzione di composti volatili organici superiore al 50%.

- Produzione di CO ridotta nell'ordine del 10-30%.
- Produzione di NO ridotta nell'ordine del 60-70%.
- Rilascio di particolato ridotto dal 20 al 55%....”

- *Y. Brosseaud, M. Saint Jacques, Warm asphalt mixes: overview of this new technology in France, Paper 0309, Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana:*

“... produzione di gas serra quali CO₂, NO₂, SO₂ ridotta dal 25 al 50%.

Riduzione significativa di fumi ed aerosol di bitume e di idrocarburi aromatici, in percentuale che varia dal 35 al 50%...”

- *Benefici in fase di produzione:* l'utilizzo dei W.M.A. dimostra svariati vantaggi, non solo nella qualità del prodotto finale, ma anche per ciò che riguarda il processo di produzione: minori temperature dei conglomerati garantiscono minore effetto di irrigidimento durante il processo produttivo, e riducono in generale gli sforzi termici a cui vengono sottoposti gli impianti e le loro parti. In aggiunta, i W.M.A. risultano pienamente compatibili con l'utilizzo di conglomerati a base riciclata.
- *Benefici in fase di posa:* l'utilizzo dei W.M.A. facilita l'utilizzo dei materiali coinvolti nel processo, agevolando per esempio il processo di compattazione. A tale proposito, si ottengono benefici anche dal punto di vista logistico; con la possibilità di temperature minori possono essere serviti siti più distanti a parità di impianti, ottenendo comunque sempre le stesse prestazioni per ciò che concerne la compattazione.

Capitolo 4

Teoria reologica

Si definisce la “reologia” come la scienza che studia gli equilibri raggiunti dalla materia per effetto di sollecitazioni (dal greco antico ρεω, [reo], scorrere / -λογία, [-logia], espressione, teoria): richiede sicuramente un approccio interdisciplinare, in quanto può trovare riscontro in ambiti di natura biologica, chimica, fisica, geologica e matematica. La studio della reologia nasce già nei primi secoli a.C. dall’esigenza di comprendere i fenomeni deformativi della materia, ma la sua definizione più rigorosa prende vita agli inizi del Ventesimo secolo, quando un comitato scientifico composto da illustri quali *J.R. Crawford, E.C. Bingham, W.H. Herschel*, attribuisce il nome “reologia” alla disciplina che “*studia la deformazione e il flusso di un materiale per descrivere i comportamenti meccanici di materiali non obbedienti alle tradizionali leggi della viscosità e dell’elasticità introdotte da Newton e Hooke nel Diciottesimo secolo*”.

Con lo sviluppo del settore industriale e dei materiali degli anni più recenti, la reologia ha avuto larga diffusione in tutto il mondo, soprattutto nell’ambito dei prodotti sintetici nati dal ramo petrolchimico.

4.1. La teoria visco-elastica

Si definisce viscoelastico un qualunque corpo che presenta proprietà intermedie tra quelle di un solido e quelle di un fluido: l’interazione tra le fasi solida-elastica e liquida-viscosa dà luogo a dissipazioni di energia interna, che comporta una modifica della risposta tenso-deformativa rispetto al caso di stato perfettamente elastico. La teoria visco-elastica risulta fondamentale per comprendere i comportamenti reologici dei bitumi o dei conglomerati costituiti da legante bituminoso, i quali, di volta in volta, possono presentare caratteristiche tendenzialmente simili al solido perfettamente elastico o al fluido puramente viscoso, a seconda delle temperature e della durata di applicazione dei carichi.

4.1.2. Il fluido viscoso

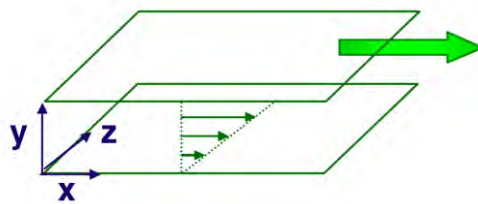
Da un punto di vista puramente intuitivo, la “viscosità” rappresenta la resistenza al moto di un fluido: da un punto di vista quantitativo, si può affermare che la viscosità misura la capacità di scorrimento di un fluido sotto l’azione di forze di taglio; la velocità di scorrimento di un fluido risulta quindi inversamente proporzionale alla viscosità.

La viscosità è definita come la grandezza che caratterizza il “*flusso viscoso*”. Un flusso viscoso implica un processo in cui l’energia meccanica applicata ad un materiale viene tutta o in parte dissipata in modo irreversibile sotto forma di calore: il flusso puramente viscoso si identifica quando l’energia meccanica viene totalmente trasformata in calore.

Con riferimento al ben noto flusso laminare di scorrimento tra piani paralleli, che rappresenta il movimento degli elementi componenti il mezzo, il comportamento viscoso si differenzia generalmente secondo 4 diverse configurazioni:

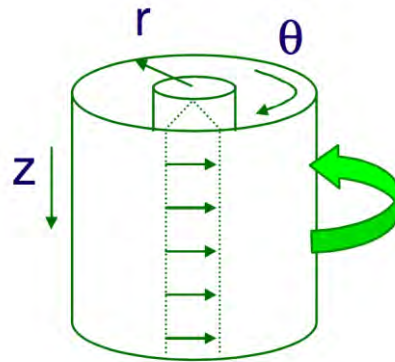
1. **Flusso tra 2 piani paralleli:** avviene nell’ipotesi in cui un piano sia fisso e l’altro in movimento. Lo spessore dei 2 piani è influente sul moto; il flusso interno avviene a piani mutuamente paralleli, e paralleli ai 2 piani esterni.

Figura 4.1. Flusso viscoso tra 2 piani posti a distanza z



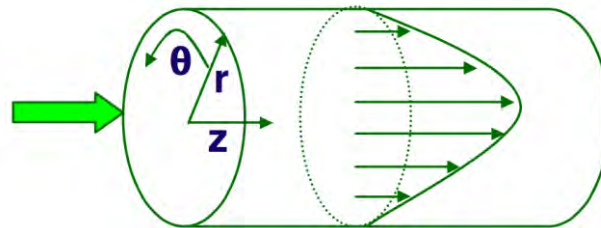
2. **Flusso rotazionale tra cilindri coassiali:** il fluido è contenuto nello spazio libero tra i 2 cilindri coassiali: uno dei due è fisso, mentre l’altro è in rotazione, e trascina con sé, in moto relativo, strati successivi di fluido.

Figura 4.2. *Flusso viscoso tra 2 piani posti a distanza z*



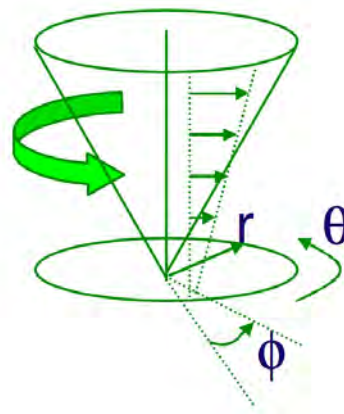
3. **Flusso capillare:** si realizza con un fluido in scorrimento all'interno di un tubo sottile (capillare), soggetto ad un gradiente di pressione tra l'ingresso e l'uscita. La velocità, nel moto capillare, assume andamento parabolico.

Figura 4.3. *Flusso capillare*



4. **Flusso piastra-cono:** si realizza con un fluido posto tra una piastra fissa e un cono posto in rotazione: il fluido assume moto circolare che avviene per rotazioni su strati successivi.

Figura 4.4. *Flusso piastra-cono*



In generale, il concetto di viscosità è legato alla nota “*legge di Newton*”:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}} \quad (4.3)$$

dove: η : viscosità dinamica [Pa s];
 τ : sforzo di scorrimento [shear-stress];
 $d\gamma/dt$: gradiente di velocità di scorrimento [shear-rate].

In generale, esistono 2 tipi di viscosità:

ν : viscosità cinematica [mm^2/s]: si misura per mezzo di viscosimetri capillari ed è dimensionalmente definita in base a grandezze cinematiche, quali lunghezza e tempo.

η : viscosità dinamica [Pa s]: per la sua definizione è necessario valutare anche l'intensità della forza sollecitante che la determina.

Le 2 viscosità sono tra loro legate dalla seguente formula:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.4)$$

dove: ν : viscosità cinematica [mm^2/s];
 η : viscosità dinamica [Pa s];
 ρ : densità.

4.1.2.1. Fluido newtoniano, non-newtoniano

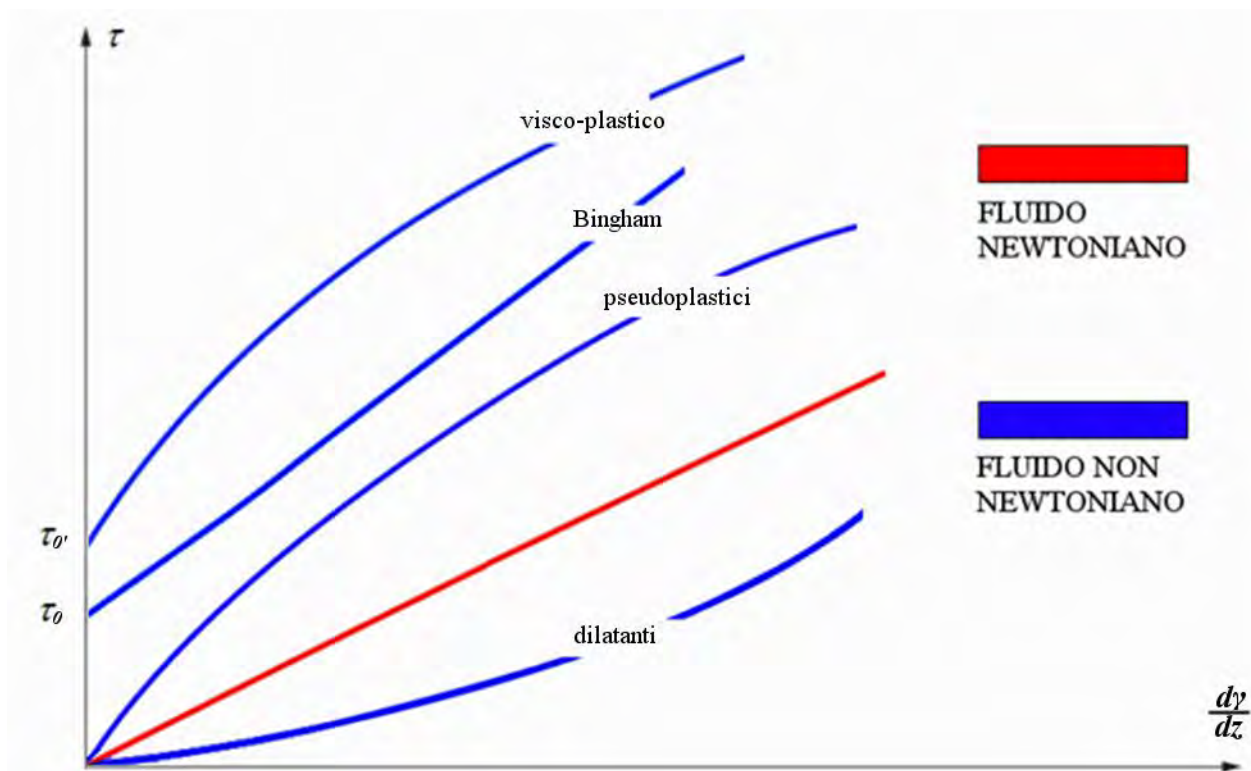
Un fluido si definisce **fluido newtoniano** se la viscosità dinamica η è costante: lo sforzo tangenziale τ applicato è direttamente proporzionale alla velocità di scorrimento del fluido. Nel grafico tensione/scorrimento il fluido sarà rappresentato da una retta avente coefficiente angolare pari proprio alla viscosità η .

Di contro, quando la viscosità dinamica η risulta variabile, il fluido si definisce **fluido non-newtoniano**: la viscosità, in questo caso, non dipende unicamente dalla temperatura, ma anche dalla velocità di scorrimento. Si parla quindi di viscosità apparente η_{app} . La legge di Newton diventa:

$$\tau = \eta \left(\frac{d\gamma}{dz} \right) \cdot \frac{d\gamma}{dz} \quad (4.5)$$

dove $d\gamma/dz$ rappresenta la velocità di scorrimento. A seconda della funzione η si possono distinguere differenti tipologie di fluido, spiegate in dettaglio di seguito.

Grafico 4.1. Fluido newtoniano / non-newtoniano



4.1.2.1.1. *Fluido pseudoplastico (shear thinning)*

Sono in genere sostanze pluri-fasiche, quali emulsioni, sospensioni e dispersioni, o bi-fasiche, quali miscele di polimeri fusi o in soluzione. La peculiarità principale sta nell'andamento della viscosità: *la viscosità dinamica η di un fluido pseudoplastico diminuisce all'aumentare della velocità di scorrimento*. Il fatto è principalmente causato da modifiche di natura strutturale che avvengono durante il flusso, alla luce della natura pluri-fasica del fluido: in stato di quiete, esistono aggregazioni reversibili tra particelle disperse, che, provocando interferenze con il flusso del fluido, determinano elevate viscosità, e che, in generale, causano aumenti di volume dei corpi dispersi. Il progressivo intensificarsi della velocità del flusso causa la disaggregazione dei legami tra particelle, con progressivo calo di viscosità, sino alla situazione in cui il fluido si presenta come sospensione di singole particelle. Solo dopo questa fase, la viscosità si stabilizza e rimane costante: il fluido acquista quindi le caratteristiche di uno newtoniano. In presenza di polimeri avviene un comportamento del tutto analogo: in quiete, le catene polimeriche si possono idealizzare come dei grovigli macromolecolari contorti, che, inevitabilmente si oppongono al flusso, e conferiscono al fluido alti valori di viscosità. Con l'aumentare della velocità di scorrimento, le molecole costituenti i polimeri tendono via via a disporsi parallelamente alla direzione del moto (con calo progressivo della viscosità), fino a che non avviene la parziale separazione delle catene: quando si sono ridotte al massimo le interazioni macromolecolari, e le singole molecole sono interamente disposte parallelamente al flusso, i valori di viscosità si stabilizzano. In generale, i fluidi pseudoplastici presentano comportamenti simili ai fluidi newtoniani alle basse e alle alte velocità di scorrimento; a valori intermedi si ha una marcata variazione della viscosità dinamica, e il comportamento è sostanzialmente diverso da quello di un fluido newtoniano.

4.1.2.1.2. *Fluido dilatante (shear thickening)*

Presenta comportamento opposto a quello del fluido pseudoplastico: *la viscosità dinamica η di un fluido dilatante aumenta all'aumentare della velocità di scorrimento*. E' un comportamento tipicamente attribuibile alle sospensioni di solidi in liquidi, particolarmente con alta concentrazione di solido: con l'aumento della velocità di scorrimento, il liquido non riesce più a permeare totalmente la superficie del grano solido e si sviluppano forze d'attrito tra particelle solide, responsabili dell'aumento di viscosità. Nel caso dei polimeri allo stato fuso, il comportamento dilatante può essere diretta conseguenza della cristallizzazione in condizioni di flusso indotta

dall'orientamento molecolare. Il fenomeno non è molto diffuso e, poiché non tecnologicamente favorevole, si cerca in genere di modificare la composizione della sospensione o la temperatura del processo.

4.1.2.1.3. *Fluido visco-plastico*

Il fluido visco-elastico presenta caratteristiche al confine tra solido e liquido: il fluido plastico è definito come quel fluido che presenta una soglia minima di sforzo per innescare lo scorrimento (denominata *yield point*). In altre parole, si tratta di dispersioni che, in quiete, sono costituite da un reticolo tridimensionale di particelle disperse in un liquido matrice, collegate tra di loro mediante forze di attrazione interparticellare: in quiete, le forze attrattive sono tali da impedire lo scorrimento relativo di particelle, con conseguenti valori elevati di viscosità; di fatto, il sistema, in quiete, possiede le caratteristiche di un solido. Solo quando lo sforzo applicato supera il valore del legame attrattivo interparticellare, le particelle possono acquistare movimento relativo e conferire al fluido le tipiche caratteristiche di un liquido. Come testimoniato dal precedente grafico, la curva di flusso inizia in corrispondenza dello sforzo τ_0 , maggiore di 0: superato lo sforzo τ_0 , il rapporto tra tensione e scorrimento (che rappresenta la viscosità dinamica η) si mantiene costante. Di seguito l'equazione costitutiva dei 2 diversi casi possibili.

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dz} \quad [\text{fluido di Bingham}] \quad (4.6)$$

oppure;

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{d\gamma}{dz} \right) \cdot \frac{d\gamma}{dz} \quad [\text{visco-plastico}] \quad (4.7)$$

4.1.2.1.4. *Fluido tissotropico*

La tissotropia è la proprietà di alcuni fluidi pseudoplastici di variare la propria aeriformità se sottoposti a sollecitazioni di taglio, o se soggetti a lunghi periodi di quiete: il fluido, può quindi passare da stato semi-solido (grasso o gel) a stato liquido. In altri termini, la tissotropia studia la dipendenza dei fenomeni dal tempo: essa si può idealizzare come un continuo evolvere di stadi di equilibrio termodinamico provvisori. Si manifesta in materiali viscoelastici, quali il bitume, e nei

liquidi semplici: nell'ultimo caso, il tempo necessario per raggiungere l'equilibrio è generalmente trascurabile se paragonato ai tempi di osservazione. A differenza dei fenomeni di invecchiamento risultanti da reazioni chimiche, l'effetto tissotropico è reversibile, e la configurazione iniziale può essere ripristinata con un'opportuna storia deformativa. Tuttavia, il fenomeno può essere spiegato come una trasformazione reversibile isoterma, in cui, quando l'azione della forza di taglio viene a scomparire, non si assiste più alla riformazione della struttura capace di rendere consistente il materiale. I sistemi tissotropici sono caratterizzati da una struttura a reticolo non stabile, formata da numerosi punti di contatto tra particelle asimmetriche: la struttura reticolare riesce a conferire al fluido sufficiente consistenza da presentarsi sotto forma di gel. Quando si applica lo sforzo di taglio, la sollecitazione provoca sconvolgimenti nella struttura, con scomparsa dei punti di contatto tra particelle, che, di conseguenza, cominciano ad allinearsi nella direzione del flusso: si assiste alla progressiva diminuzione dei valori di viscosità dinamica η , con trasformazione del gel in liquido. Una volta cessata la sollecitazione τ , la struttura reticolare riesce a ricostituirsi, senza però seguire a ritroso il processo reologico. Il fenomeno si può sviluppare anche per fluido in quiete per lunghi periodi, in quanto la viscosità può variare sensibilmente anche in funzione di fattori quali la velocità delle variazioni delle forze di taglio e il tempo di durata dell'intero processo tissotropico.

4.2. Grandezze reologiche del legante bituminoso

Alla luce di quanto sin qui analizzato, come particolare settore della reologia, la reometria si pone l'obiettivo di individuare i protocolli sperimentali, gli standard di esecuzione di prove di laboratorio, e le procedure di analisi dei dati sperimentali, al fine di definire le caratteristiche del materiale visco-elastico che costituisce la base dei conglomerati ad uso stradale: la conoscenza delle caratteristiche reologiche risulta infatti molto importante, in quanto direttamente correlata ai livelli prestazionali che il materiale può garantire in esercizio, nell'ottica di prevenzione dei classici fenomeni di degrado delle pavimentazioni. Le condizioni di esercizio possono essere assai severe, e ricoprire un ampio range di situazioni differenti, per quanto riguarda le sollecitazioni, i carichi e le temperature: diventa perciò fondamentale predisporre appropriati protocolli sperimentali capaci di indagare su scenari anche molto diversi. Attualmente, l'approccio consolidato è quello di determinare le caratteristiche reologiche dei leganti (quali proprietà elastiche, viscose e visco-elastiche), mediante l'utilizzo del reometro D.S.R. a taglio (Dynamic Shear Rheometer), capace di sollecitare i campioni in regime oscillatorio con diverse frequenze, e in grado di regolare la temperatura dello scenario di prova. In particolare, l'apparecchiatura è in grado di gestire una forzante di forma sinusoidale che varia l'intensità nel tempo: la forzante, nei vari casi, può essere costituita da una sollecitazione o da una deformazione imposta: le sollecitazioni o deformazioni, quindi, variano nel tempo secondo una legge armonica. In generale, il principale vantaggio derivante dall'impiego del regime oscillatorio sta nel fatto di poter effettuare un'analisi dinamica del comportamento dei materiali simulando per certi versi il ripetersi del transito veicolare.

4.2.1. Controllo di tensione

I test a tensione controllata vedono come input la sollecitazione applicata al provino: la tensione τ risulta quindi la variabile indipendente. La legge armonica che governa τ è del tipo:

$$\tau = \tau_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4.8)$$

dove: τ_0 : ampiezza di oscillazione della tensione (tensione massima);
 ω : pulsazione (pari alla frequenza a meno del fattore 2π).

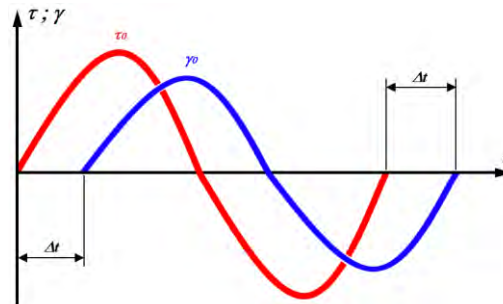
La corrispondente deformazione misurata risulta:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \delta) \tag{4.9}$$

dove: γ_0 : ampiezza della deformazione;
 δ : angolo di fase.

La curva sinusoidale della deformazione risulta simile a quella di tensione (oscillazioni alla stessa frequenza): tuttavia, la natura visco-elastica del bitume provoca un ritardo Δt nella risposta di deformazione, che viene rappresentato dall' "angolo di fase δ ".

Grafico 4.2. Controllo di tensione oscillatoria: onda di tensione - onda di deformazione



L'entità del ritardo Δt è rappresentato dall'angolo di fase δ ; esso può assumere valori compresi nell'intervallo tra 0 e $\pi/2$ e misura il rapporto tra le componenti reversibili e quelle viscosi: al valore 0 corrisponde una condizione di perfetta elasticità, mentre, al valore $\delta = \pi/2$, il materiale si comporta come un fluido viscoso ideale (Tabella 4.1).

Tabella 4.1. Ritardo Δt - Angolo di fase δ [tensione controllata]

Comportamento Elastico	Comportamento Viscoso	Comportamento Visco-elastico
Angolo di fase: $\delta = 0^\circ$	Angolo di fase: $\delta = 90^\circ$	Angolo di fase: $\delta = 0^\circ \div 90^\circ$
Ritardo: $\Delta t = 0$	Ritardo: $\Delta t = t/4$	Ritardo: Δt

Nota la sollecitazione applicata e misurata la deformazione, si è in grado di determinare il modulo complesso G^* :

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (4.10)$$

4.2.2. Controllo di deformazione

I test a deformazione controllata vedono come input il valore deformativo da applicare al provino: la deformazione γ risulta quindi la variabile indipendente. Il campione è sottoposto a scorrimento oscillatorio, applicando uno spostamento sinusoidale ad uno dei piatti del reometro: la legge deformativa sinusoidale è del tipo:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4.11)$$

dove: γ_0 : ampiezza di oscillazione della deformazione (deformazione massima);
 ω : pulsazione dell'oscillazione (pari alla frequenza a meno del fattore 2π).

In ogni istante di tempo, quindi, la velocità di scorrimento sarà data da:

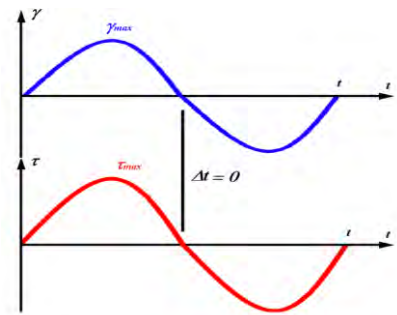
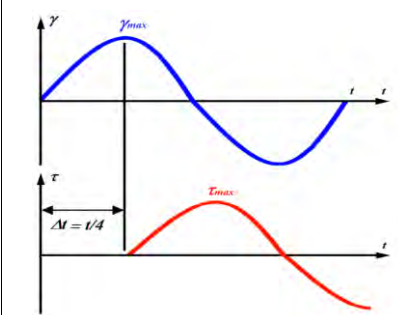
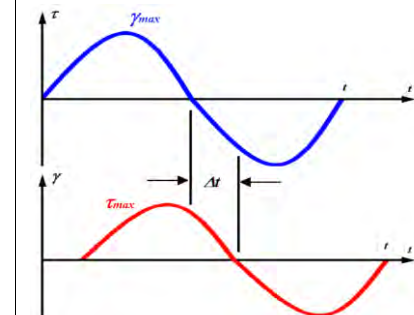
$$\dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_0 \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (4.12)$$

Sotto l'azione della forza periodica (4.11), il flusso risponderà con uno sforzo tangenziale che, se sono raggiunte condizioni stazionarie, e nell'ipotesi di risposta lineare del sistema, sarà del tipo:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (4.13)$$

Analogamente al caso di tensione controllata, lo sforzo oscilla alla stessa frequenza della deformazione forzante, ma sfasato di un certo ritardo, identificato dall'angolo di fase δ . In maniera analoga per la tensione controllata, le possibili risposte dei vari materiali a questo tipo di forzante sono illustrate in Tabella 4.2..

Tabella 4.2. Ritardo Δt - Angolo di fase δ [deformazione controllata]

Comportamento Elastico	Comportamento Viscoso	Comportamento Visco-elastico
Angolo di fase: $\delta = 0^\circ$	Angolo di fase: $\delta = 90^\circ$	Angolo di fase: $\delta = 0^\circ \div 90^\circ$
Ritardo: $\Delta t = 0$	Ritardo: $\Delta t = t/4$	Ritardo: Δt
		

La reazione viscoelastica del materiale ad una deformazione oscillante suggerisce di rappresentare lo sforzo tangenziale τ come somma di due componenti, una elastica, e l'altra viscosa. A tale scopo la (4.13) si può riscrivere come:

$$\tau = \tau_0 \cos \delta \sin \omega t + \tau_0 \sin \delta \cos \omega t \tag{4.14}$$

Oppure, dividendo per la deformazione massima:

$$\frac{\tau}{\gamma_0} = G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t \tag{4.15}$$

dove G' e G'' hanno le dimensioni di un modulo. Si definiscono quindi:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \begin{array}{l} \text{[modulo elastico} \\ \text{o conservativo} \\ \text{o di restituzione]} \\ \text{(storage moduls)} \end{array} \tag{4.16}$$

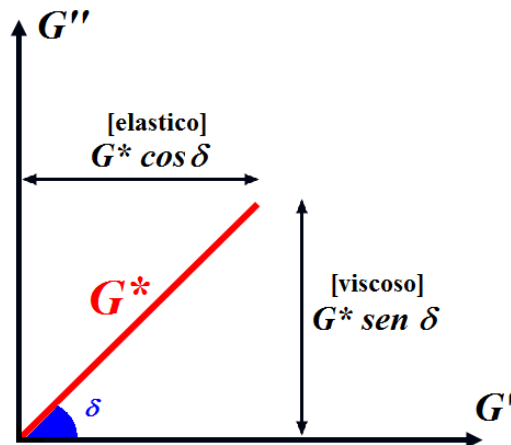
$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad \begin{array}{l} \text{[modulo viscoso} \\ \text{o dissipativo]} \\ \text{(loss moduls)} \end{array}$$

Si noti che, in quanto i fenomeni oscillatori lineari possono essere facilmente espressi da una matematica di numeri complessi, i moduli viscoelastici possono essere espressi attraverso un unico *modulo complesso* G^* definito come:

$$G^* = G' + i G'' \quad (4.17)$$

Il Grafico 4.3. riporta la rappresentazione delle due componenti di modulo nel piano complesso.

Grafico 4.3. Modulo elastico / Modulo viscoso – Piano complesso



Come alternativa all'espressione in termini di moduli, le proprietà meccanico-dinamiche lineari possono essere riformulate in termini di *viscosità complessa* η^* , data da:

$$\eta^* = \frac{G^*}{i \omega} = \eta' - i \eta'' \quad (4.18)$$

In base all'algebra dei numeri complessi è facilmente dimostrabile il legame tra le diverse grandezze viscoelastiche oscillatorie:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} \quad \eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad (4.19)$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad ; \quad |\eta^*| = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} = \frac{1}{\omega} \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

Fino a quando la risposta del materiale è lineare, nel senso che l'ampiezza dello sforzo generato è direttamente proporzionale all'ampiezza della deformazione, G' e G'' non dipendono dall'ampiezza stessa, ma sono solo funzione della frequenza.

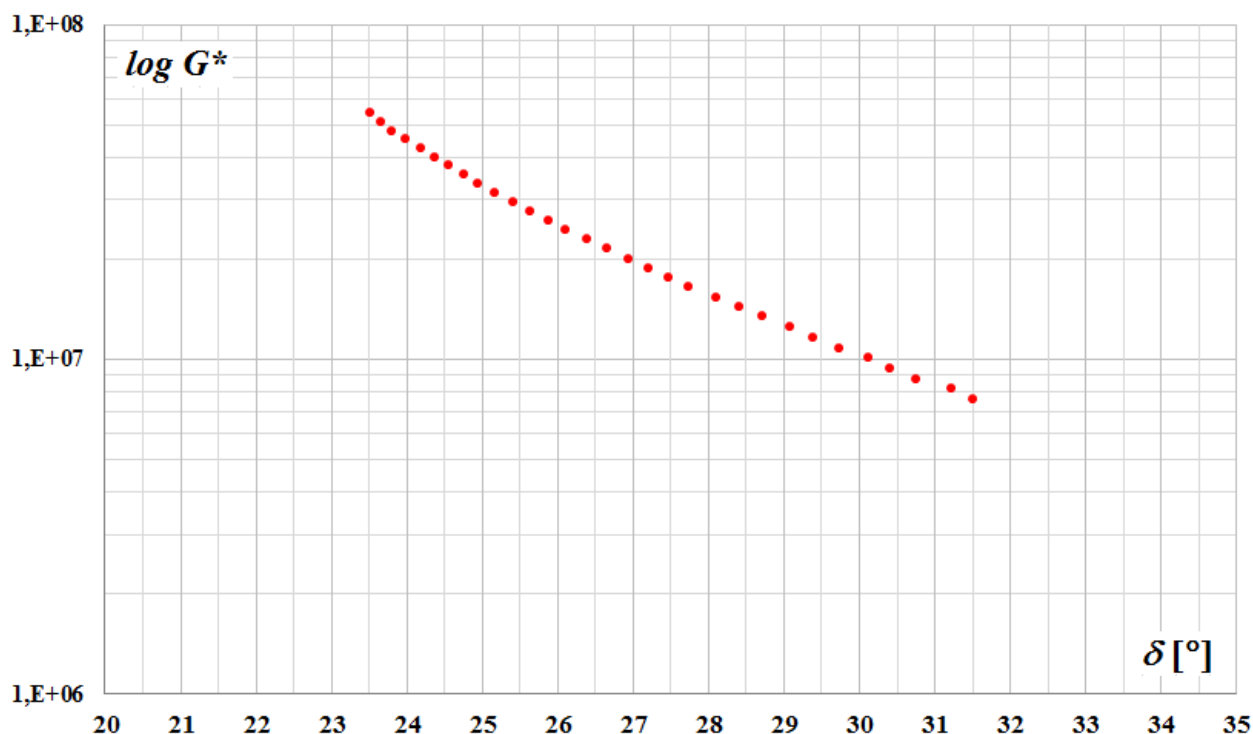
4.3. Rappresentazione delle grandezze reologiche

La quasi totalità delle prove previste nel protocollo sperimentale oggetto di questa Tesi, siano esse a regime oscillatorio o di altro tipo, daranno come risultato i valori dei moduli (complesso G^* , di restituzione G' , e dissipativo G'') e dell'angolo di fase δ : diventa quindi fondamentale organizzare i dati in modo che siano facilmente leggibili e possano rendere agevole il confronto tra i diversi campioni.

4.3.1. Piano di Black

Una possibile rappresentazione dei risultati di prove in regime oscillatorio sinusoidale, in alternativa alla rappresentazione delle funzioni viscoelastiche nel dominio delle frequenze, può essere costituita dal *piano di Black*, nel quale ogni coppia $G^* - \delta$ è rappresentativa di una frequenza e di una temperatura. Il successivo grafico ne riporta un esempio.

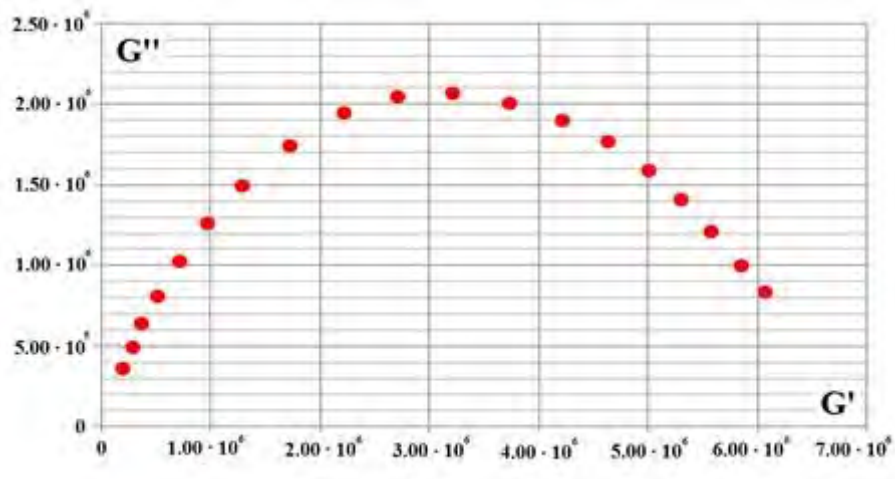
Grafico 4.4. *Piano di Black: rappresentazione di $G^* - \delta$*



4.3.2. Piano di Cole-Cole

Un'altra possibile rappresentazione dei risultati dei test in regime oscillatorio sinusoidale è data dal *piano di Cole-Cole*, nel quale vengono riportate le variabili di modulo di restituzione G' (in ascissa), e di modulo dissipativo G'' (in ordinata). Di seguito si riporta un esempio del piano.

Grafico 4.5. Piano di Cole-Cole: rappresentazione di $G' - G''$



Al variare della frequenza di carico, le variazioni del modulo complesso e dell'angolo di fase sono rappresentate mediante la variazione delle componenti di restituzione G' e di dissipazione G'' . Per quanto visto in precedenza analizzando la teoria visco-elastica, si possono schematizzare, sul piano di Cole-Cole, i diversi comportamenti:

Grafici 4.6. Piano di Cole-Cole: Solido elastico / Liquido viscoso

Solido Elastico	Fluido Viscoso
<p style="text-align: center;">G''</p> <p style="text-align: center;">G'</p> <p style="text-align: center;">Modulo elastico E</p>	<p style="text-align: center;">G''</p> <p style="text-align: center;">G'</p> <p style="text-align: center;">Viscoso</p>
<p>Il comportamento è indipendente dalla frequenza, per cui nel diagramma si ha un unico punto in corrispondenza del modulo elastico E.</p>	<p>La curva coincide con l'asse delle ordinate: il modulo tende ad ∞ per valori elevati della frequenza, mentre è nullo per frequenza 0.</p>

4.3.3. Master curve

Le proprietà visco-elastiche di un materiale sono, di norma, fortemente influenzate dalla temperatura: svariati studi hanno tuttavia dimostrato che i moduli di restituzione G' e di dissipazione G'' , risultanti a temperature diverse, possono essere raggruppati in un'unica visualizzazione, costituita dalla *master curve* del materiale: il processo è possibile grazie al principio di sovrapposizione tempo-temperatura (T.T.S.).

4.3.3.1. Principio di sovrapposizione tempo-temperatura

Il principio T.T.S. implica che una variazione di una grandezza meccanica, quale il modulo complesso G^* , ottenuta variando la temperatura a frequenza costante, può essere ottenuta variando la frequenza e fissando la temperatura. Sulla base di tale principio, quindi, si rende possibile la visualizzazione di un'unica curva che riassume il comportamento del materiale in un ampio range di frequenze (persino più vasto di quello direttamente analizzabile in laboratorio). Un materiale che è possibile schematizzare secondo tale principio prende il nome di *materiale termoreologicamente semplice*.

In uno scenario di prova in cui si rende necessario lo studio a temperature diverse, lo *shift factor* indica quel fattore da applicare alla temperatura per cambiare in modo univoco i tempi di rilassamento di tutti i campioni: in altre parole, se la temperatura T_0 viene assunta come quella di riferimento, lo scenario di variazione dovrà risultare:

$$\tau_1(T_0), \tau_2(T_0), \tau_3(T_0), \dots, \tau_n(T_0) \quad [\text{tempi di rilassamento}] \quad (4.20)$$

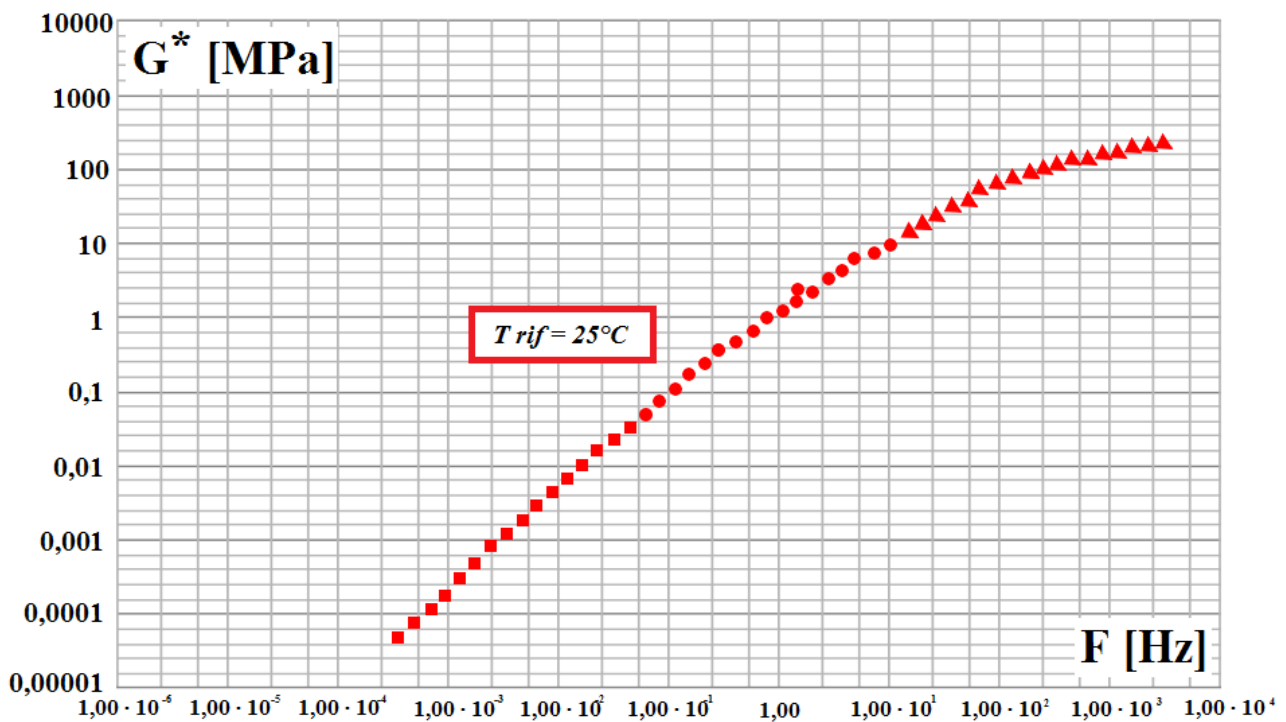
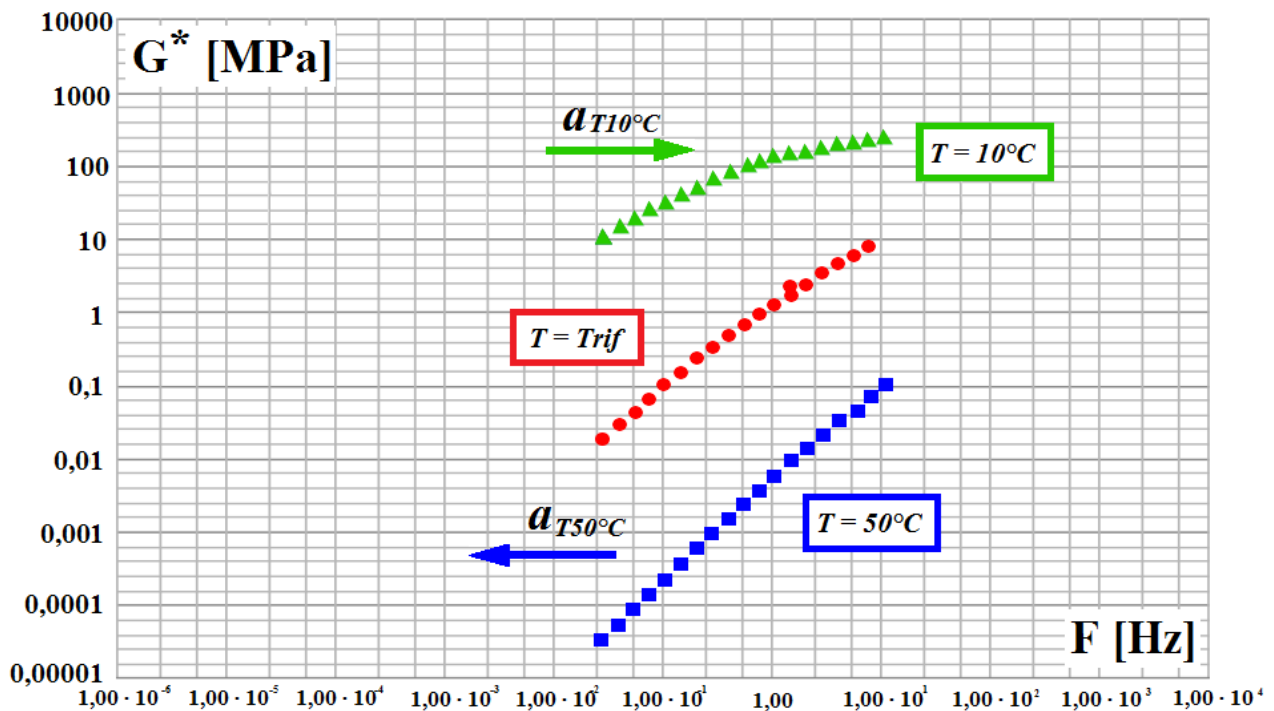
$$\tau_1(a_T), \tau_2(a_T), \tau_3(a_T), \dots, \tau_n(a_T) \quad [\text{variazione}] \quad (4.21)$$

con: τ : tempo di rilassamento alla temperatura indicata;
 T_0 : temperatura di riferimento;
 a_T : shift factor [con $a = 1$ per $T = T_0$];

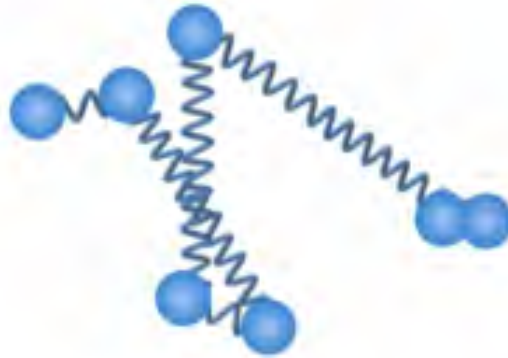
quindi:

$$\tau_n(T) = a_T \cdot \tau_n(T_0) \quad (4.22)$$

Grafico 4.7. Costruzione Master Curve – Principio T.T.S. alla temperatura di riferimento



La teoria che sta alla base del principio di sovrapposizione tempo-temperatura (T.T.S.) si deve allo studio del modello proposto da *Prince E. Rouse* nel 1953, riguardante la dinamica di moto di una catena polimerica, schematizzata da un sistema composto da una collana di masse collegate da molle, e soggetto all'azione viscosa.

Figura 4.5. *Modello di Rouse, 1953 - Schematizzazione della catena polimerica*

Si dimostra che le rigidzze di tutti i singoli elementi molla varino di un identico fattore, determinato secondo la seguente equazione:

$$G_i(T) = G_i(T_0) \frac{T \cdot \rho}{T_0 \cdot \rho_0} \quad (4.23)$$

dove: G_i : rigidzza della molla i-esima;
 ρ : densità del materiale.

La dipendenza della temperatura può allora essere esplicitata all'interno della formulazione del modulo di rilassamento del *modello di Maxwell generalizzato*. Il modello di Maxwell tenta di descrivere il materiale come un "continuum" meccanico nel quale si tengano conto della natura elastica e della natura viscoelastica: schematizza quindi il materiale come un sistema composto da una molla ed uno smorzatore collegati in serie (unità di Maxwell). Secondo la trattazione, la dipendenza dalla temperatura può essere esplicitata come:

$$G_i(t, T) = \frac{T \cdot \rho}{T_0 \cdot \rho_0} \cdot \sum_{i=1}^n G_i(T_0) e^{-\frac{t}{aT \cdot \lambda_i(T_0)}} \quad (4.24)$$

Quindi, definiti modulo ridotto e tempo ridotto;

$$G_r(t) = G_i(t, T) \frac{T_0 \cdot \rho_0}{T \cdot \rho} \quad [\text{modulo ridotto}] \quad (4.25)$$

$$t_r = \frac{t}{aT} \quad [\text{tempo ridotto}] \quad (4.26)$$

si ottiene l'equazione che descrive l'andamento del modulo ridotto nel dominio del tempo ridotto, contenendo al suo interno entrambe le informazioni relative alla dipendenza dal tempo e dalla temperatura:

$$G_r(t_r) = \sum_{i=1}^n G_i(T_0) e^{\frac{t_r}{\lambda_i(T_0)}} \quad (4.27)$$

Così come le altre grandezze visco-elastiche, il modulo $G(t, T)$, dipendente dal tempo e dalla temperatura, può essere espresso in funzione dell'unica variabile tempo ridotto (t_r): si deve comunque costituire la legge di variazione degli shift factor (a_T) alle diverse temperature. Tale legge può essere determinata dai dati sperimentali o, in alternativa, può essere descritta dall'equazione di *Williams-Landel-Ferry* (W.L.F.) o dalla legge di *Arrhenius*, a seconda delle temperature di prova rispetto a quella di transizione vetrosa.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T_1 - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad [\text{eq. Williams-Landel-Ferry}] \quad (4.28)$$

dove: C_1, C_2 : costanti di fitting che dipendono dal materiale.

$$\log(a_T) = \frac{E_f}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad [\text{lg. Arrhenius}] \quad (4.29)$$

4.3.3.2. Sviluppo delle master curves

Le master curves risultano quindi utili a rappresentare il comportamento del materiale in un ampio intervallo di tempi o frequenze di carico, dove l'andamento sperimentale determinato dalla curva racchiude entrambi gli effetti di tempo e temperatura: mediante la traslazione dei dati risultanti alle diverse temperature di prova, si può stabilire l'andamento della visco-elasticità del materiale, in un dominio più esteso rispetto a quello delle singole curve, inerenti i singoli test.

Per i materiali termo-reologicamente semplici, come già accennato, si rende necessaria soltanto la determinazione dello shift factor a_T , ovvero il *fattore di traslazione orizzontale*: in presenza di prove in regime oscillatorio, lo shift factor a_T viene determinato mediante le frequenze ridotte:

$$\omega_r(T_0) = a_T \omega(T) \tag{4.30}$$

$$a_T = \frac{\omega_r(T_0)}{\omega(T)} \quad [\text{shift factor orizzontale}] \tag{4.31}$$

Nei casi termo-reologicamente complessi, invece, si rende necessaria anche la determinazione del *fattore di traslazione verticale* b_T , relativo alla variazione non trascurabile della densità del materiale con la temperatura:

$$b_T = \frac{T_0 \rho_0}{T \rho} \quad [\text{shift factor verticale}] \tag{4.32}$$

Le master curves riportano l'andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase. A prescindere dal materiale testato, è possibile individuare delle caratteristiche standard così schematizzabili:

Tabella 4.3. *Caratteristiche standard master curves*

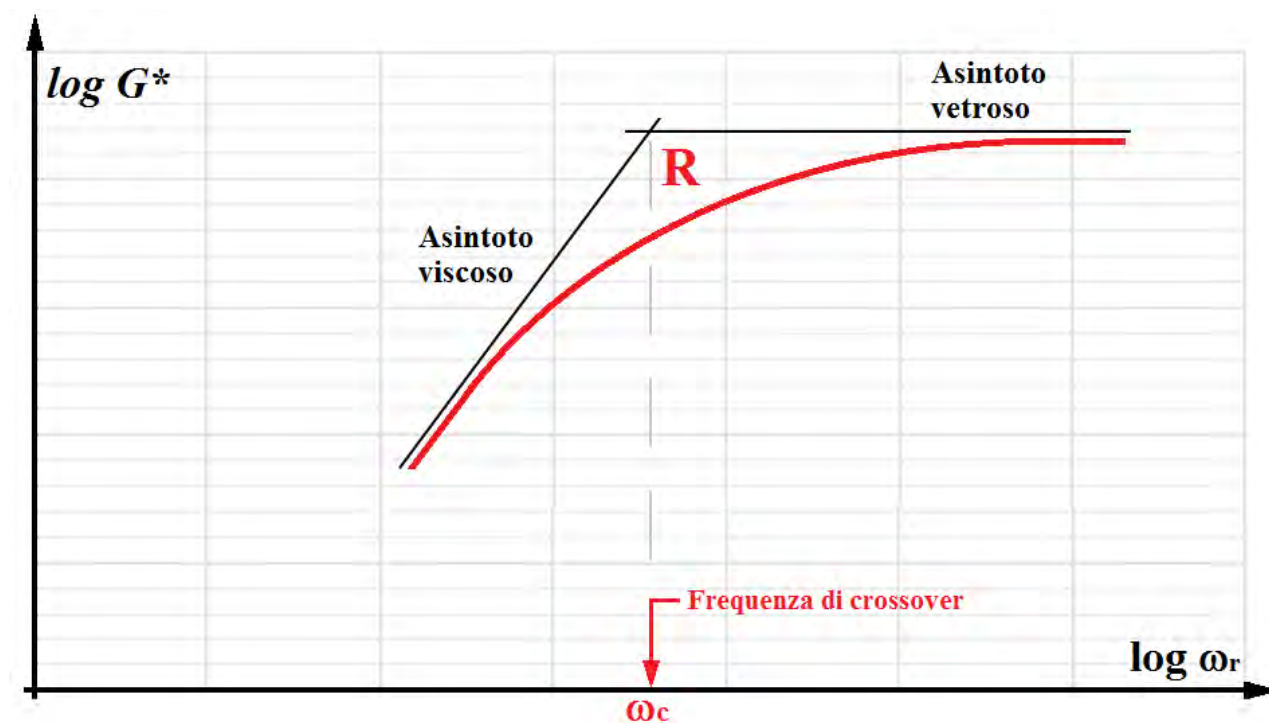
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Asintoto vetroso:</i> 	comportamento limite alle basse temperature e alle alte frequenze: in corrispondenza dell'asintoto vetroso il modulo complesso è detto vetroso, e si indica con G_g .
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Asintoto viscoso:</i> 	comportamento limite alle alte temperature e alle basse frequenze: in corrispondenza dell'asintoto viscoso si definisce la viscosità dello stato stazionario η_{ass} ; per piccole ampiezze si può considerare $\eta_{ass} \cong \eta_0$. $\eta_{ass} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{G^*}{\omega}$
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Frequenza di crossover (ω_c):</i> 	è la frequenza di oscillazione in corrispondenza della quale, ad una determinata temperatura, si ha: $\tan \delta = 1 \quad \text{cioè, } \delta = \pi/4 \quad \text{e } G' = G''$
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Indice reologico (R):</i> 	differenza tra il modulo vetroso e il modulo complesso alla frequenza di crossover: R indica la "velocità" con cui la curva raggiunge l'asintoto vetroso. $R = G_g - G^*(\omega_c)$

4.3.3.3. Modello Christensen and Anderson

Il modello *Christensen and Anderson* (C.A.) è un modello matematico elaborato presso la Pennsylvania State University che tenta di stimare le proprietà reologiche dei bitumi all'interno del campo di visco-elasticità lineare (L.V.E.) per tutte le temperature e le frequenze di "interesse" di una pavimentazione stradale: analizza i comportamenti del bitume sottoposto a prove di creep e a test in regime oscillatorio.

Il modello è costituito da due insiemi di relazioni, l'una per la zona viscosa e l'altra per il rimanente campo di frequenze: la figura successiva illustra i parametri presi in esame nel modello C.A., che caratterizzano una master curve.

Grafico 4.8. Modello Christensen and Anderson: caratterizzazione master curve



Si definiscono di seguito i parametri caratteristici individuati dal modello Christensen and Anderson:

Tabella 4.4. Parametri caratteristici modello Christensen and Anderson

<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Limite di visco-elasticità lineare (L.V.E.):</i> 	<p>il campo di visco-elasticità è definito dal comportamento in cui il rapporto sforzo-deformazione τ/γ è costante in ogni punto. Il modello determina il limite lineare sulla curva frequenza-modulo elastico definendo il limite nel punto in cui il modulo decresce al 95% del valore massimo: si suggerisce inoltre l'esecuzione di test con tensione non superiore al 75% di quella del limite lineare.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Modulo vetroso:</i> 	<p>(<i>glassy modulus</i>); è il valore dell'asintoto orizzontale sul grafico angolo di fase-modulo complesso: all'asintoto, il modulo complesso è caratterizzato da basse temperature e elevata frequenza di carico. E' un valore costante per ogni tipo di bitume, e, in generale, assume valori prossimi a 1 GPa. All'asintoto orizzontale, l'angolo di fase δ tende agli 0°.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Zona di viscosità stazionaria:</i> 	<p>è l'asintoto viscoso; viene raggiunto alle alte temperature e basse frequenze di carico: è rappresentato da una retta con coefficiente angolare pari a 1. All'asintoto viscoso, l'angolo di fase δ tende ai 90°.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Frequenza di crossover:</i> 	<p>è la frequenza determinata sulla master curve in corrispondenza dell'intersezione tra asintoto orizzontale vetroso e asintoto obliquo viscoso. Di fatto indica il passaggio dalla zona viscosa alla zona vetrosa, per cui risulta un indicatore della durezza e della consistenza del materiale. Il tempo di crossover è l'inverso della frequenza di crossover.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Indice reologico:</i> 	<p>è definito come la differenza tra il modulo vetroso e il modulo complesso dinamico ottenuto alla frequenza di crossover. Di fatto è un parametro direttamente proporzionale all'ampiezza al rilassamento, quindi può essere un ottimo indicatore caratterizzante il comportamento reologico del materiale. Risulta indipendente dalla temperatura di riferimento, mentre è caratteristico del tipo di bitume.</p>

Alla luce di quanto visto, si riportano ora le equazioni del modello, che descrivono il modulo complesso, l'angolo di fase e l'indice reologico, in funzione dei parametri sin qui analizzati.

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{\log 2}{R}} \right]^{\frac{R}{\log 2}} \quad [\text{modulo complesso}] \quad (4.33)$$

$$\delta = \frac{90}{\left[1 + \frac{\omega}{\omega_c}\right]^{\frac{\log 2}{R}}} \quad [\text{angolo di fase}] \quad (4.34)$$

$$R = \frac{\log 2 \times \log\left(\frac{G^*}{G_g}\right)}{\log\left(1 - \frac{\delta}{90}\right)} \quad [\text{indice reologico}] \quad (4.35)$$

dove:

- G_g : modulo vetroso;
- η_{ass} : viscosità nello stato stazionario;
- ω_c : frequenza di crossover [rad/s];
- R : indice reologico.

In questa fase, può risultare interessante raccogliere alcune considerazioni note da letteratura, e frutto di accurati protocolli sperimentali di ricerca: si riportano alcune nozioni sulla costituzione delle master curves e sull'analisi secondo il modello di Christensen and Anderson per quanto concerne le risposte di materiali diversi, per altro del tutto simili a quelli che si andranno ad utilizzare nella sperimentazione oggetto di questa tesi.

Grafico 4.9. Estratto – Christensen , Anderson, Rowe – Petersen Conference – Luglio 2008

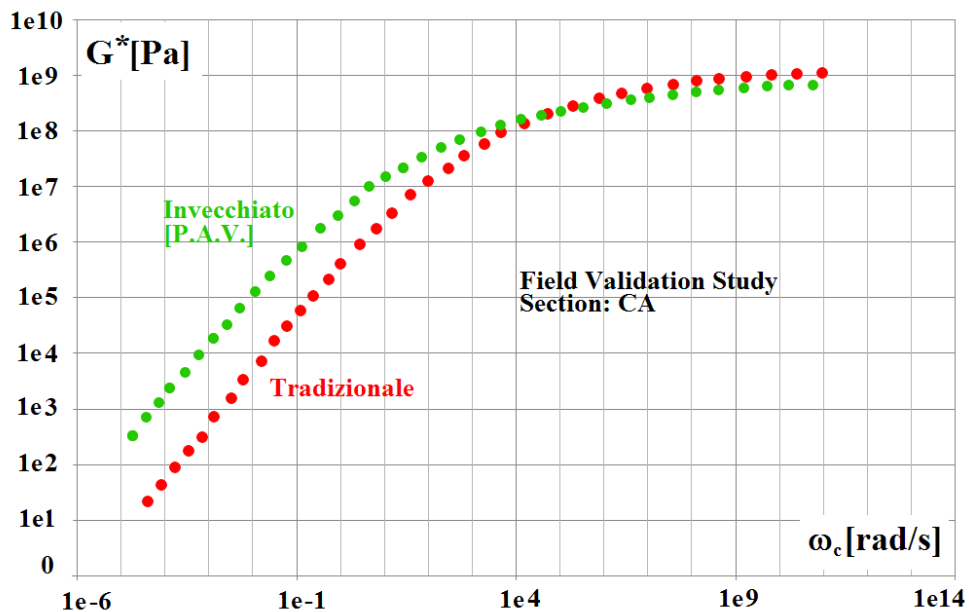
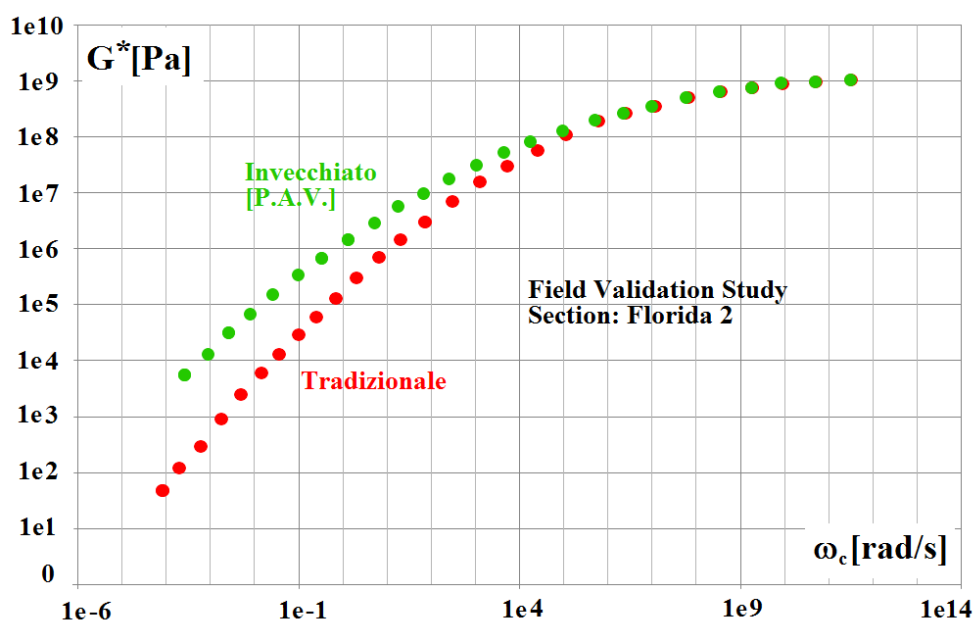


Grafico 4.10. Estratto – Christensen , Anderson, Rowe – Petersen Conference – Luglio 2008

Gli andamenti evidenziano i diversi risultati per un bitume tradizionale e per lo stesso bitume sottoposto a procedura di aging P.A.V.: gli studi hanno inoltre dimostrato che la procedura di aging può causare variazioni dell'indice reologico R e della frequenza ω_c . Ed in particolare:

- Le variazioni dell'**indice reologico R** influenzano il modulo di rilassamento, fornendo, di volta in volta, *master curves di forma diversa*.
- Le variazioni della **frequenza ω_c** influenzano la rigidità, fornendo, di volta in volta, *master curves di eguale forma, ma su diverse posizioni nel piano*.

4.3.3.4. Modello Christensen and Anderson modificato

Il modello (C.A.M.) [*Modified Christensen, Anderson and Marasteanu*] nasce da un largo studio reologico su bitumi modificati, riuscendo a descriverne, con maggior accuratezza, il comportamento in un ampio range di frequenze. L'analisi di 35 diversi bitumi modificati e additivati ha consentito il confronto tra modello C.A. e modello C.A.M., evidenziando talvolta anche sensibili differenze sui valori di modulo (sino al 35%). L'ulteriore contributo di Zeng, mediante analisi con D.S.R. di 9 diversi bitumi modificati a differenti frequenze di carico e temperature, ha consentito infine di definire le relazioni che costituiscono, di fatto, il modello C.A.M..

Il modello risulta essere valido sia per i leganti, sia per i conglomerati bituminosi, descrivendo in particolare il comportamento del bitume come un fluido visco-elastico, e il comportamento dei conglomerati come un solido visco-elastico. Di seguito si riporta la relazione per la determinazione del modulo complesso.

$$|G^*| = G_e + \frac{G_g - G_e}{\left[1 + \left(\frac{f_c}{f'_c}\right)^k\right]^{\frac{m_e}{k}}} \quad [\text{modulo complesso}] \quad (4.36)$$

dove: $G_e = |G^*|$ per $f \rightarrow 0$, modulo d'equilibrio, nullo nei leganti;

$G_g = |G^*|$ per $f \rightarrow \infty$, modulo vetroso;

f_c : parametro di posizione, con dimensioni di una frequenza (paragonabile alla frequenza di crossover del modello C.A.);

f'_c : frequenza ridotta;

k : [adimensionale] parametro di forma, da calibrare attraverso regressione lineare.

La frequenza ridotta risulta essere funzione sia della temperatura, sia della deformazione.

$$f'_c = f_c \left(\frac{G_e}{G_g}\right)^{\frac{1}{m_e}} \quad [\text{frequenza ridotta}] \quad (4.37)$$

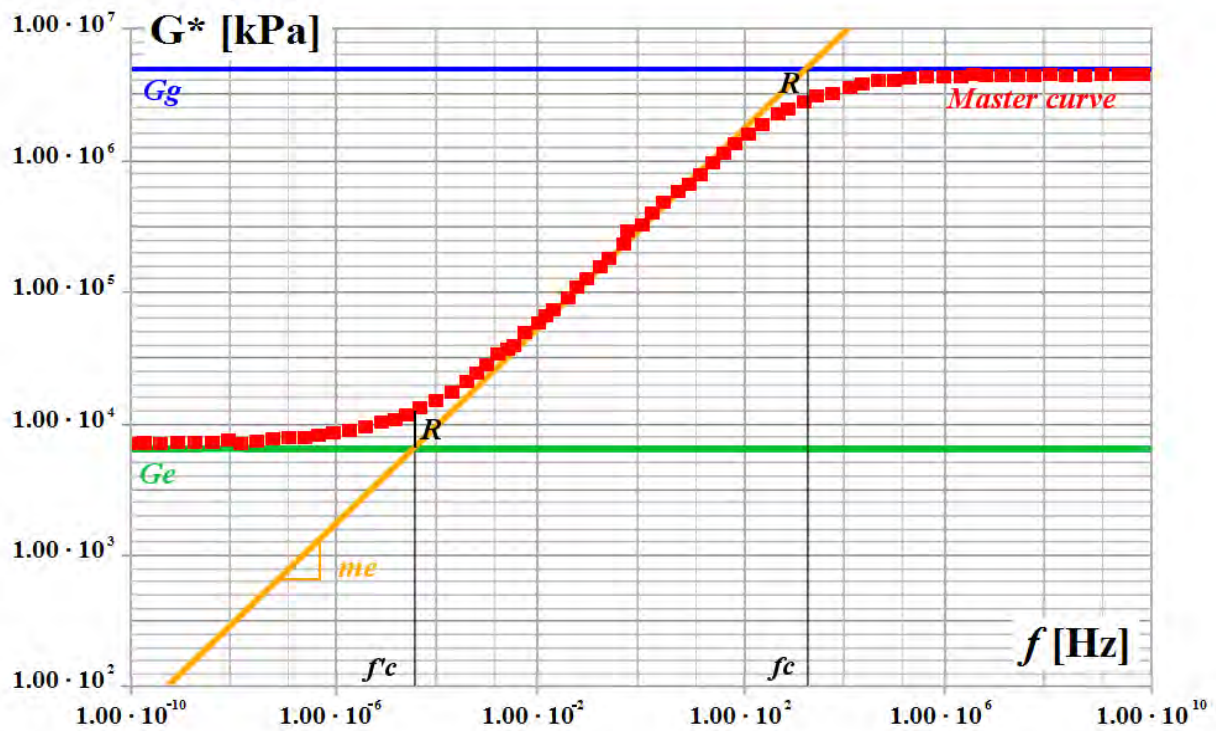
dove: m_e : [adim.] parametro di forma, da calibrare attraverso regressione lineare.

La figura successiva riproduce i parametri del modello. Si può facilmente individuare come:

- l'asintoto inferiore orizzontale sia di fatto G_e ;
- l'asintoto superiore orizzontale sia di fatto G_g ;
- l'asintoto obliquo sia caratterizzato da pendenza m_e ;
- le intersezioni dell'asintoto obliquo con quelli orizzontali (G_g e G_e) individuino rispettivamente la frequenza di crossover f_c e la frequenza ridotta f'_c sull'asse x;
- la distanza tra $G_g(f_c)$ e G_g sia rappresentata da R , espresso come:

$$R = \log \frac{2^{me/k}}{1 + (2^{me/k} - 1) \cdot \frac{G_e}{G_g}} \quad [\text{parametro } R] \quad (4.38)$$

Grafico 4.11. Parametri caratteristici della master curve nel modello C.A.M. modificato



L'angolo di fase si può definire come:

$$\delta = 90I - (90I - \delta_m) \left\{ 1 + \left[\frac{\log\left(\frac{f_d}{f'_c}\right)}{R_d} \right]^2 \right\}^{m_d/2} \quad (4.39)$$

dove: δ_m : angolo di fase in corrispondenza della frequenza f_d ;
 f_d : frequenza a cui corrisponde il punto di inflessione del bitume;
 R_d : parametro di forma;
 m_d : parametro di forma;

Per ciò che riguarda il parametro I, è stato dimostrato che:

$$\begin{aligned} I=0 & \quad \text{per } f > f_d; \\ I=1 & \quad \text{per } f < f_d. \end{aligned} \tag{4.40}$$

Al pari di altri ricercatori, lo stesso Zeng ha utilizzato le equazioni W.L.F. (Williams-Landel-Ferry) per individuare lo *shift factor* o, in alternativa, la formulazione di Arrhenius per la traslazione delle frequenze alle basse temperature.

In conclusione, è importante precisare che la descrizione dei fenomeni in questione con leggi rappresentative semplici non può prescindere da un modello di corpo continuo, omogeneo ed isotropo: in realtà, tutti i materiali, e in particolare i sistemi pluri-fase come i bitumi, sono costituiti da un grandissimo numero di elementi discreti, ovvero le singole molecole; le proprietà complessive del materiale dipendono quindi dalla media dei singoli comportamenti delle particelle. E' stato dimostrato che la forza di aggregazione della singola particella, che dà luogo a differenti gruppi, caratterizza maggiormente il comportamento finale del materiale, piuttosto che la caratteristica tipologica della singola particella.

Capitolo 5

Stato dell'arte

Nel seguente capitolo si riporta, a titolo informativo, una raccolta di pubblicazioni e articoli che trattano argomenti inerenti allo studio sviluppato all'interno di questa tesi. Possono fornire alcuni termini di confronto da discutere nel capitolo di analisi dei dati desunti dalla sperimentazione di laboratorio sviluppata. Possono inoltre dare alcuni spunti per la stesura dello stesso protocollo sperimentale, per quanto riguarda i parametri e le impostazioni dei diversi test che si andranno a sviluppare.

5.1. Articoli e pubblicazioni

Di seguito, l'elenco generale delle pubblicazioni inserite, riguardanti l'utilizzo degli aggregati nella costituzione delle miscele bituminose, lo studio dei conglomerati tiepidi, l'utilizzo in laboratorio del reometro D.S.R. a taglio, e l'applicazione del D.S.R. ai bitumi modificati con polimeri e ai mastici a base di filler.

Tabella 5.1. *Elenco delle pubblicazioni analizzate*

Argomento	Anno	Autore	Titolo	Fonte	Origine
Aggregati	2004	Sofilic et al	Characterization Of The Eaf Steel Slag As Aggregate For Use In Road Construction	Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica	Slovenia - Lubijana
Aggregati	2015	Autelitano e Giuliani	Swelling Behavior Of Electric Arc Furnace Aggregates For Unbound Granular Mixtures In Road Construction	International Journal of Pavement Research and Technology	Italia - Parma
Aggregati	2015	Khodary	Comparative Study Of Using Steel Slug Aggregate And Crushed Limestone In Asphalt Concrete Mixtures	International Journal of Civil Engineer and Thechnology	Egitto - Qena
Aggregati	2010	N.C.H.R.P. Report	Test Methods And Specification Criteria For Mineral Filler Used In H.M.A.	University of Winsconsin	U.S.A. - Wisconsin

W.M.A.	1995	Maccarone	Cold Asphalt Systems As An Alternative to Hot Mix	9th A.A.P.A International Asphalt Conference	Australia
W.M.A.	1999	Jenkins et al	Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, A New Process	7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa	Sudafrica
WMA	2000	Koenders et al	Innovative Process In Asphalt Production And Application To Obtain Lower Operating Temperatures	2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress	Gran Bretagna
D.S.R.	2013	Amarnath et al	Determining The Rheological Properties Of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer (DSR) For Selected Pavement Stretches	International Journal Of Research In Engineering And Technology	India - Bangalore
D.S.R.	2004	Xiaoge et al	Effect Of Aging On Viscoelastic Performance Of Asphalt Binder	Changsha University of Science and Technology	Cina - Changsha
D.S.R.	2012	Clopotel e Bahia	Importance Of Elastic Recovery In The DSR For Binders And Mastics	Engineer Journal	U.S.A. - Wisconsin
D.S.R.	2010	Johnson e Bahia	Evaluation Of Accelerated Procedure For Fatigue Characterization Of Asphalt Binders	University of Wisconsin	U.S.A. - Wisconsin
D.S.R. applicato ai bitumi modificati	2013	Xiao et al	Rheological And Chemical Characteristics Of Warm Mix Asphalt Binders At Intermediate And Low Performance Temperatures	Canadian Journal Of Civil Engineer	Cina - Shanghai
D.S.R. applicato ai bitumi modificati	2013	Cardone et al	Influence Of Polymer Modification On The Rheological Response Of Bitumens And Mastics	Department of Civil and Building Engineer - Università Politecnica delle Marche	Ancona
D.S.R. applicato ai bitumi modificati	2014	Frigio et al	Fatigue Rheological Characterization Of Polymer-Modified Bitumens And Mastics	Department of Civil and Building Engineer - Università Politecnica delle Marche	Ancona
D.S.R. applicato ai bitumi modificati	2010	Kim et al	Effects Of Warm Mix Asphalt Additives On Performance Properties Of Polymer Modified Asphalt Binders	Canadian Journal of Civil Engineer	U.S.A. - Indiana

5.1.1. L'utilizzo degli aggregati

Il particolare utilizzo di aggregati riciclati nella realizzazione di pavimentazioni stradali è una consuetudine ormai assodata già da qualche decennio: sono quindi disponibili numerosi articoli e pubblicazioni, effettuate da gruppi di studio, enti universitari o di ricerca, ed enti privati, che affrontano tale tematica, anche dal punto di vista strettamente tecnico. Si riportano di seguito alcuni estratti utili ad approfondire l'argomento degli aggregati di riciclo, ed in particolare l'uso delle scorie d'acciaieria E.A.F. (Electric Arc Furnace), che saranno utilizzate nella sperimentazione di laboratorio oggetto di questa Tesi.

In generale, la trattazione delle tematiche che riguardano il riutilizzo delle scorie di acciaieria risulta un argomento molto ampio, che può richiedere un approccio multi-disciplinare; sovente, interessanti pubblicazioni sono inserite in ambiti quali la chimica e la metallurgia.

Il primo articolo citato è tratto dall'archivio dell'A.I.D.I.C. (*Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica*): al 2004 risale la pubblicazione di Sofilic et al., dal titolo "*Characterization Of The Eaf Steel Slag As Aggregate For Use In Road Construction*", risultato di uno studio sviluppato in Slovenia, presso lo Slovenian National Building and Civil Engineering Institute di Ljubljana.

L'articolo espone la sperimentazione effettuata su scorie metallurgiche prodotte nello stabilimento di frantumazione CMC Sisak, in Croazia, i cui campioni hanno subito diversi trattamenti prima di essere testati. Le scorie fuse sono state sottoposte a raffreddamento in acqua, a separazione elettromagnetica, frammentazione e setacciatura: si sono quindi costituiti provini con frazioni granulometriche di 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm. Sono stati successivamente effettuati test di studio della morfologia e della composizione delle scorie, mediante microscopio ottico, diffrazione a raggi X, microscopio elettronico, e spettrometro a dispersione di energia. Si è poi indagato sulle caratteristiche fisico-geometriche, meccaniche e di durabilità per l'impiego come inerte nella costituzione dei conglomerati per pavimentazioni. Secondo i classici standard europei EN, si sono determinati fattori quali: composizione granulometrica, indice di forma e indice di appiattimento, resistenza alla frammentazione, densità, assorbimento d'acqua, resistenza al gelo e test dei solfati di magnesio: ulteriori indagini sono state condotte, riguardo la rumorosità. I campioni sono stati testati presso un laboratorio specializzato, col particolare intento di confrontare le caratteristiche degli aggregati riciclati, con quelle di inerti di origine naturale comunemente

impiegati nel settore delle costruzioni stradali. Le prove hanno determinato la composizione chimica delle scorie: sono risultate composte da wustite (FeO), silicati di calcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S , $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e C_3S), brownmillerite ($\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_5$, C_4AF) e mayenite ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, C_{12}A_7). Si sono per altro determinati la quantità di ossido di calcio e di magnesio e la stabilità volumetrica, parametri fondamentali per analizzare il possibile riutilizzo del materiale. I risultati di laboratorio hanno consentito di formulare alcune importanti conclusioni:

- l'analisi chimica ha determinato l'assenza di fase vetrosa, e scarsi contenuti di CaO e MgO , in accordo con le relative prescrizioni normative;
- si può affermare con certezza che la conversione delle scorie E.A.F. fornisce un materiale privo di qualsiasi costituente che possa ledere in qualche modo l'integrità ambientale;
- i test fisico-geometrici e di durabilità hanno indicato che l'aggregato ottenuto soddisfa i parametri prescritti dalle diverse normative per l'utilizzo nei conglomerati bituminosi da pavimentazioni stradali.

Il secondo estratto è contenuto nella rivista I.J.P.R.T. (*International Journal of Pavement Research and Technology*), nel Volume 8 – N° 2 del Marzo 2015, e presenta un recente studio sviluppato da Autelitano e Giuliani, dal titolo “*Swelling Behavior Of Electric Arc Furnace Aggregates For Unbound Granular Mixtures In Road Construction*”. Lo scopo della trattazione è di analizzare la stabilità volumetrica di diverse miscele granulari non legate composte da aggregati di scorie metallurgiche E.A.F., attraverso 2 procedure accelerate: bagno d'acqua (A.S.T.M. D4792/D4792M-13) e test a vapore (E.N. 1744-1).

La richiesta di aggregati ad alta qualità ha subito un grosso incremento negli ultimi anni: la maggior parte degli inerti comunemente utilizzati sono di origine naturale, ottenuti da cave e depositi alluvionali: tuttavia, la crescente considerazione nei confronti di tematiche di tipo ambientale sta spostando l'attenzione verso lo sviluppo di nuove tecnologie, che prevedono l'uso di nuovi materiali di diversa origine, spesso di riciclo, tra cui le scorie di produzione d'acciaio da forno ad arco elettrico. A tale proposito, l'articolo cita diverse ricerche e studi che si focalizzano sul possibile utilizzo delle scorie E.A.F. in sostituzione degli aggregati di tipo naturale, nei quali vengono espone le principali caratteristiche di tali materiali: secondo quanto emerge, la sostituzione dell'inerte garantisce adeguate proprietà fisico-meccaniche e di durabilità dei conglomerati ad uso stradale, assicurando persino miglioramenti delle prestazioni dal punto di vista della resistenza al fuoco, soprattutto per strati di base. Vengono anche citati approfondimenti che riguardano l'utilizzo

dell'inerte riciclato nella costituzione di conglomerati tiepidi per la realizzazione degli starti di usura più pregiati. Da questo punto di partenza, l'articolo in esame propone un'indagine più particolare, che tratta la stabilità volumetrica e l'attitudine al rigonfiamento degli aggregati. La sperimentazione di laboratorio ha previsto il confronto di due diversi tipi di aggregato: scorie d'acciaieria E.A.F., e rocce di origine calcarea [che per altro saranno entrambi utilizzati nel protocollo sperimentale di questa Tesi], provenienti rispettivamente da un impianto di produzione siderurgica del Nord Italia e da un deposito naturale della medesima zona. In particolare, la produzione delle scorie è stata effettuata con particolari modalità, consentendo di ottenere 2 diversi tipi di materiale: il primo, definito "fresco", e il secondo definito "invecchiato". Un'analisi preliminare delle composizioni chimiche e delle proprietà fisico-meccaniche ha consentito di stabilire le principali caratteristiche degli inerti; si riporta una tabella riassuntiva dei risultati.

Tabella 5.2. Caratteristiche fisiche – Estratto dall'articolo

Test	Standard EN	EAF 0/8 mm	EAF 8/16 mm	EAF 16/32 mm	Limestone 0/32 mm
Flakiness Index (%)	EN 933-3:2012	9.24 (FI ₂₀)	13.07 (FI ₂₀)	11.50 (FI ₂₀)	10.67 (FI ₂₀)
Shape Index (%)	EN 933-4:2008	7.62 (SI ₂₀)	7.67 (SI ₂₀)	7.63 (SI ₂₀)	7.02(SI ₂₀)
Los Angeles Coefficient (%)	EN 1097-2:2010	15.10 (LA ₂₀)	13.00 (LA ₂₀)	12.44 (LA ₂₀)	23.1(LA ₂₅)
Micro-Deval Coefficient (%)	EN 1097-1:2011	6.3 (M _{DE} 15)	6.1 (M _{DE} 15)	7.0 (M _{DE} 15)	13.8 (M _{DE} 15)
Polished Stone Value (%)	EN 1097-8:2009	-	52.9	61.1	48
Water Absorption (%)	EN 1097-6:2013	0.63 (WA ₂₄ 1)	0.60 (WA ₂₄ 1)	0.59 (WA ₂₄ 1)	0.47(WA ₂₄ 1)
Freezing and Thawing Resistance (%)	EN: 1367-1:2007	3.30 (F ₄)	2.30 (F ₄)	2.14 (F ₃)	1.16(F ₁)
Sand Equivalent Test (%)	EN 933-8:2012	77	-	-	68
Specific Gravity (kN m ⁻³)	EN 1097-6:2013	39.62	38.57	38.11	28.54

I campioni sono stati confezionati sia a granulometria monogranulare, sia a granulometria assortita, nel rispetto delle indicazioni contenute nel capitolato A.N.A.S. (5 campioni monogranulari, ed altri con assortimenti 5/8, 8/16, 16/19 e 19/24.4 mm): le 3 tipologie (calcarei, E.A.F. "freschi" e E.A.F. "invecchiati") sono quindi state sottoposte a compattazione con metodologia Proctor modificata (EN 13286-2). I provini sono stati sottoposti a 2 diverse procedure di test di rigonfiamento accelerato: il fattore di rigonfiamento è stato monitorato considerando le misurazione delle espansioni verticali di campioni contenuti lateralmente. La prima procedura ha previsto l'immersione dei campioni in un bagno d'acqua a circa 70 °C, per 7 giorni, e la determinazione del rapporto percentuale di espansione giornaliera rispetto alle dimensioni iniziali, a partire dalle 7 espansioni medie giornaliere campionate sulle 24 ore. La percentuale finale è stata calcolata come la media per 3 diversi provini sottoposti alle stesse operazioni. La seconda procedura ha previsto l'European Steam Test (test a vapore) (EN 1744-1): i campioni sono stati investiti da un getto continuo di vapore fluente a temperatura prossima ai 100 °C, per 7 giorni con erogazione ciclica, con alternanza di 10 ore di vapore e 14 ore indisturbate. Le rilevazioni orarie hanno registrato il

rigonfiamento volumetrico percentuale rispetto alle dimensioni iniziali, consentendo di classificare gli aggregati secondo i 4 gruppi proposti dalla normativa relativa al test di vapore. I principali risultati sperimentali sono di seguito riassunti.

- Le espansioni subite dalle scorie E.A.F. durante i test hanno consentito di descrivere il processo di rigonfiamento nel tempo. L'incremento volumetrico sembra seguire la successione ideale di 3 diversi fasi progressive. Una volta rappresentati graficamente i risultati, nella prima fase si riscontra un andamento pressoché lineare; la seconda fase vede invece una progressiva riduzione della pendenza, che arriva sino alla terza fase, in cui i fenomeni espansivi possono considerarsi esauriti (retta orizzontale): è verosimile attribuire i rigonfiamenti della prima e della seconda fase alle reazioni chimiche che coinvolgono gli ossidi di calcio (CaO) e di magnesio (MgO).
- Per ciò che riguarda i test a bagno d'acqua, i risultati hanno dimostrato un'alta stabilità delle scorie E.A.F. "invecchiate": l'incremento verticale medio risulta dell'ordine di pochi centesimi, corrispondenti ad una espansione lineare pressoché insignificante, di circa lo 0.02%, sicuramente trascurabile rispetto allo 0.5%, ovvero il limite massimo imposto dalla normativa di riferimento (A.S.T.M. D2940). Di contro, le scorie E.A.F. "fresche" sono risultate caratterizzate da un'espansione lineare ben più marcata, probabilmente per la diversa evoluzione temporale del processo di test.
- In generale si è dimostrato come, l'incremento delle dimensioni dei grani conduca all'aumento del rapporto di rigonfiamento e del tempo necessario alla stabilizzazione volumetrica: questo fatto pone l'attenzione sull'importanza del design e della percentuale di vuoti delle miscele. In particolare, il volume dei vuoti nei campioni granulari può mitigare l'espansione volumetrica degli aggregati da scorie di acciaieria.

In conclusione, gli aggregati derivanti dai processi di produzione metallurgica con forno ad arco elettrico hanno preliminarmente dimostrato eccellenti proprietà dal punto di vista chimico, fisico, e della durabilità. Per ciò che riguarda i processi di stabilizzazione volumetrica, si sono riscontrati comportamenti diversi in funzione di alcuni parametri: tuttavia, tutti i materiali testati hanno garantito caratteristiche conformi ai limiti tollerati dalle normative di riferimento. In generale, i processi di rigonfiamento effettuati in laboratorio hanno ben riprodotto le varie fasi ideali del processo. I parametri che sono sembrati più determinati nella stabilizzazione volumetrica risultano essere l'invecchiamento e il contenuto dei vuoti nelle miscele.

Il terzo estratto è contenuto nella rivista I.J.C.I.E.T. (*International Journal of Civil Engineer and Thechnology*), nel Volume 6 del Marzo 2015, e presenta uno studio sviluppato da Khodary presso il dipartimento di Ingegneria Civile della South Valley University di Qena, in Egitto, dal titolo “*Comparative Study Of Using Steel Slug Aggregate And Crushed Limestone In Asphalt Concrete Mixtures*”.

Nell’articolo viene esposta una sperimentazione di laboratorio, sviluppata sia sui conglomerati, sia sui materiali costituenti, al fine di certificare il possibile utilizzo di aggregati di origine siderurgica in sostituzione dei classici inerti di tipo calcareo. Il primo tipo di aggregato utilizzato è costituito da rocce calcaree frantumate, provenienti dalla cava “Quena” di Suez, mentre il secondo è costituito da scorie di processi di produzione dell’acciaio con forno ad arco elettrico, reperite nell’acciaieria “Ezz” situata nella medesima zona: quest’ultime sono state preliminarmente sottoposte ad ulteriore frantumazione di laboratorio, per ottenere misure granulometriche simili a quelle degli inerti di origine calcarea. Ancora una volta, in prima istanza, il protocollo ha previsto una serie di test sugli aggregati, per la valutazione delle composizioni chimiche (test a raggi X, microscopio elettronico) e delle caratteristiche fisico-meccaniche (gravità specifica, densità, resistenza all’usura), in accordo con le prescrizioni di riferimento. Successivamente sono state svolte indagini sul legante utilizzato per il confezionamento dei conglomerati: si è utilizzato un bitume con classe di penetrazione 60/70 a 25 °C, punto di rammollimento di 51 °C e gravità specifica di 1.04. Il mix design per il confezionamento dei conglomerati finali è stato effettuato secondo il classico protocollo Marshall: sono state condotte indagini su miscele con percentuali di bitume del 4.0, 4.5, 5.0 e 5.5%, determinando il contenuto ottimo di bitume, risultato del 5.02% per le miscele ad aggregati calcarei e del 5.60% per miscele ad aggregati riciclati: i campioni sottoposti alla prova Marshall, hanno consentito la determinazione dei parametri di stabilità e scorrimento. Sono state infine svolte indagini sul peso specifico, sui vuoti (V.A. - Air Voids) e sui vuoti riempiti di bitume (V.F.B. - Voids Filled with Bitumen). I risultati di laboratorio hanno portato a definire le seguenti conclusioni.

- I conglomerati costituiti da aggregati da scorie E.A.F. hanno garantito una stabilità Marshall 1.5 volte superiore a quella misurata per i conglomerati ad inerti calcarei, i quali, in altre parole, hanno presentato uno scorrimento Marshall superiore di circa il 30%: sono quindi risultati migliori dal punto di vista della resistenza alle deformazioni, riscontrabili soprattutto in aree caratterizzate da climi particolarmente caldi. Tuttavia, hanno presentato un maggiore rapporto di vuoti, dovuto alle diverse caratteristiche delle scorie.

- Lo sviluppo di ulteriori indagini ha consentito di stabilire che, in confronto agli inerti calcarei, gli aggregati E.A.F. forniscono miscele con migliore resistenza alle basse temperature, migliore rugosità superficiale, migliori conduttività elettrica e migliori proprietà meccaniche.
- L'analisi del peso specifico ha evidenziato come gli aggregati di riciclo siano più pesanti: il fatto può influenzare in modo sensibile il costo delle strutture, in quanto, a parità di spessore, sarà necessaria una maggiore quantità di materiale per la realizzazione degli strati.

In conclusione, tutti i risultati hanno indicato che, i conglomerati costituiti con scorie E.A.F., rispetto a quelli ad aggregati calcarei, risultano migliori per diversi aspetti, quindi ampiamente utilizzabili, con però alcune attenzioni rivolte all'analisi dei costi.

In generale, l'aggiunta dei filler minerali al legante bituminoso è una pratica ampiamente consolidata: una larga caratterizzazione dell'argomento è stata fornita dal “*N.C.H.R.P. Report*” sviluppato presso l'università del Wisconsin, negli U.S.A., e pubblicato in via definitiva nel Dicembre del 2010 [“*Test Methods And Specification Criteria For Mineral Filler Used In H.M.A.*”].

L'obiettivo dello studio è stato quello di identificare e sviluppare dei metodi di prova per la caratterizzazione degli effetti fisico-meccanici dei filler minerali nei mastici utilizzati per costituzione delle miscele tradizionali a caldo: si sono potuti inoltre specificare i criteri sui filler per ottimizzare le prestazioni dei conglomerati (in accordo con gli standard A.A.S.H.T.O. D-242). Lo studio ha incluso una vasta ricerca in letteratura per quanto concerne le caratteristiche dei filler che possono migliorare le prestazioni delle pavimentazioni: si è quindi sviluppato un ampio protocollo sperimentale, mediante il quale si sono potuti trattare 32 tipi di filler, preventivamente classificati dal punto di vista fisico e chimico, e 4 tipi di legante bituminoso, con miscelazione su diversi scenari, che hanno portato alla costituzione di 68 diversi tipi di mastici e 32 diversi tipi di bitumi. Si sono potuti analizzare i 5 principali indicatori prestazionali, quali lavorabilità, suscettività all'umidità, resistenza al degrado alle basse temperature, alla fatica, e all'ormaiamento. Per la maggior parte dei materiali testati, i protocolli messi a punto sono risultati sufficienti a certificare la possibilità di utilizzo dei filler per la garanzia di adeguati criteri prestazionali.

5.1.2. I conglomerati W.M.A.

Si riportano di seguito, in ordine cronologico, alcune delle pubblicazioni più importanti, considerate i contributi pionieristici più famosi per lo sviluppo e la diffusione di tale tecnologia.

Il primo articolo citato è stato presentato in Australia da Maccarrone S. nel 1995, durante la “*9th A.A.P.A International Asphalt Conference*”, e riporta il titolo “*Cold Asphalt Systems As An Alternative to Hot Mix*”. Lo studio vuole esaminare la costituzione di conglomerati a freddo, basati sull'utilizzo di bitume schiumato ed emulsioni bituminose, con lo scopo di definire i criteri di selezione/progettazione e le caratteristiche meccaniche dei materiali coinvolti. Si inserisce in un periodo in cui si registra il forte sviluppo di nuove tecnologie per la stesura di pavimentazioni stradali, favorite dalla nascita di una nuova coscienza nei confronti di tematiche quali il risparmio energetico e la salvaguardia ambientale. Sebbene tratti esplicitamente il tema dei conglomerati freddi, senza riferirsi ai W.M.A., è considerato un fondamentale contributo di partenza nello studio delle miscele tiepide.

Secondo quanto riportato, il mix design non differisce sostanzialmente da quello classico utilizzato per i conglomerati a caldo: il progetto deve essere mirato ad ottenere miscele che garantiscano comunque caratteristiche meccaniche adeguate. Viene posta l'attenzione sul contenuto ottimo di umidità, mediante il quale si riescono a massimizzare la densità asciutta e il modulo di resistenza. La presenza d'acqua, infatti, risulta essere un fondamentale aiuto nella dispersione del bitume e nella compattazione: per simulare questo processo, sono state sviluppate numerose prove, ottenendo risultati di laboratorio veritieri utilizzando un compattatore giratorio, calibrato su 85 cicli alla tensione di 240 kPa, su campioni cilindrici del diametro di 100 mm, inclinati di 2° sul piano orizzontale (simulazione di starti con spessore maggiore di 150 mm). Le caratteristiche meccaniche sono state indagate mediante “MAT.T.A.” (MATerial Testing Apparatus), misurando il modulo di resilienza, i comportamenti ad usura e a fatica dei conglomerati. Si è indagato poi in merito alle modalità di rivestimento degli aggregati, che, nell'impiego di conglomerati freddi, sono risultate fondamentali, per assicurare adeguate resistenze all'umidità: la porzione fine di inerte è risultata la più critica; si è quindi deciso di separarla (con setaccio da 4.75 mm) dalla porzione grossa. I due gruppi sono quindi stati trattati con tecniche diverse. La porzione grossa è stata sottoposta ad emulsione bituminosa, che, garantendo bassa viscosità, ha favorito il rivestimento dei grani di aggregato. La porzione fine, invece, è stata trattata con bitume schiumato, con un contenuto d'acqua inferiore a quello presente nelle emulsioni. In generale, per entrambe le tecniche, si è riscontrata

una viscosità inferiore rispetto a quella dei conglomerati caldi; è risultata sempre fondamentale la calibrazione dei contenuti d'acqua da aggiungere. Per ciò che riguarda il contenuto ottimale di bitume, sono stati effettuati diversi campioni, a percentuale variabile, secondo metodologie diverse, in funzione dei tipi di conglomerato. Le miscele con il 5 e il 6% si sono utilizzate per indagini sulla quantità di vuoti e sui moduli di resistenza; la percentuale del 6% ha fornito conglomerati visivamente molto simili a quelli caldi. Le miscele con il 2 e il 3% sono state invece utilizzate per indagini sul contenuto umido, sia a temperatura ambiente, sia a 60 °C: la percentuale del 2% è risultata la più funzionale alla costituzione di miscele con bitume schiumato. Si è inoltre studiata l'influenza del filler sulle prestazioni, ottenendo utili indicazioni anche sulle modalità di stoccaggio dei materiali, fortemente influenzate dai fenomeni di evaporazione acqua: la combinazione bitume 4% e filler 2% è risultata idonea allo stoccaggio per periodi superiori al mese. E' stata poi rivolta l'attenzione anche al non meno marginale aspetto dei costi. Ne è risultata una netta riduzione, soprattutto per gli aspetti legati alla gestione degli impianti, capaci di consentire maggiore flessibilità nelle fasi di trattamento e lavorazione dei materiali.

Al termine dell'articolo sono riportate alcune esperienze di successo nell'utilizzo di conglomerati freddi e tiepidi in sostituzione di quelli tradizionali, tra cui il rifacimento di un tratto autostradale in Australia compromesso da fenomeni di ormaiamento, la nuova costruzione di un'estesa rete stradale nella città di Ryde, Australia, ed altri progetti sparsi in tutto il Regno Unito.

Il secondo estratto è stato presentato durante la *"7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa"*, da Jenkins et al., nel 1999, e riporta il titolo *"Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, A New Process"*. L'articolo esplora i possibili benefici dell'utilizzo di conglomerati prodotti dalla miscelazione di una larga varietà di aggregati e del bitume, mediante riscaldamento a temperature al di sotto dei 100 °C, indagandone le proprietà fisico-meccaniche: tratta quindi il processo di realizzazione dei cosiddetti "conglomerati schiumati tiepidi".

Il processo di schiumatura prevede che il bitume caldo sia espanso in schiuma, attraverso l'iniezione di piccole percentuali di acqua nebulizzata: la schiuma deve essere immediatamente miscelata con gli aggregati, che abbiano subito riscaldamento ed asciugatura. Lo studio vuole quindi analizzare i possibili benefici derivanti da miscele a temperature più basse, che coinvolgano processi di asciugatura e riscaldamento degli aggregati meno intensi e dispendiosi. Convenzionalmente infatti, la produzione di miscela a caldo (H.M.A.) implica il maggiore dispendio di energia nei processi di trattamento degli aggregati, che devono avvenire prima della

miscelazione: uno studio termodinamico ha dimostrato che la necessaria conversione dell'acqua in vapore, che richiede il superamento del calore latente di evaporazione, implica un dispendio energetico 500 volte superiore a quello necessario per l'aumento di 1 grado Celsius di acqua allo stato liquido. Di conseguenza sono evidenti i vantaggi ottenibili con processi che si mantengano a temperature al di sotto di quella di ebollizione, propri dei conglomerati tiepidi: allo stesso tempo, l'intento della progettazione sarà quello di garantire comunque adeguate caratteristiche delle miscele, nonostante le diverse modalità di confezionamento. A tale scopo, l'articolo tenta di analizzare le modalità di miscelazione, ossia del rivestimento dei grani da parte della schiuma bituminosa: sono state individuate tre possibili situazioni. Nel primo caso l'aggregato può penetrare le bolle di schiuma, risultando meccanicamente danneggiato e compromettendo l'adesione, così da fornire una miscela non legata. Nel secondo caso si può assistere ad un elevato trasferimento di energia al contatto tra i grani e la schiuma, che provoca una riduzione nella tensione di vapore nelle bolle ed un repentino collasso delle temperature, con conseguente aumento della viscosità e limitazione nei processi di adesione. Nel terzo caso, qualora un grano di piccole dimensioni entri in contatto con la schiuma, si assiste ad un trasferimento di calore moderato che lascia le bolle intatte, permettendo così al bitume di trattenere calore, e quindi di mantenere viscosità basse e di garantire un corretto fenomeno di rivestimento. Diventa quindi fondamentale lo studio delle dimensioni e dell'assortimento granulometrico degli aggregati. Per quanto detto, lo studio tenta di caratterizzare il comportamento delle miscele tiepide in funzione di tre diversi fattori: la natura e l'assortimento granulometrico degli inerti, le temperature a cui si sottopongono i materiali (miscelazione e compattazione) e la presenza di umidità nel conglomerato nelle diverse fasi del processo di produzione.

La sperimentazione in laboratorio ha consentito di monitorare il contenuto di umidità nei conglomerati tiepidi testando 7 differenti miscele, in un range di 4 temperature medie rappresentative delle diverse fasi del processo di produzione. E' stato possibile individuare una relazione che esprime la perdita di umidità durante il trattamento del bitume schiumato, mediante un'equazione che dipende da umidità iniziale prima della miscelazione, umidità finale immediatamente dopo la miscelazione, temperatura degli aggregati e contenuto percentuale di bitume schiumato (in % rispetto agli inerti). E' inoltre stata dimostrata la possibilità di aggiungere acqua calda o fredda all'aggregato riscaldato: solo nel caso di acqua calda si è però assistito ad un visibile incremento della dispersione del bitume e del processo di rivestimento.

Per quanto riguarda la temperatura degli aggregati e la sua influenza nel processo di miscelazione, è stato necessario testare un elevato numero di campioni, in un range dai 30 ai 90 °C, non esistendo precedenti trattazioni in letteratura: con l'aumento della temperatura degli inerti pre-miscelazione, si sono riscontrati significativi benefici nella distribuzione del bitume e nei processi di rivestimento. E' stato quindi possibile individuare 3 categorie di comportamento alle diverse temperature: grani sostanzialmente non rivestiti, con ricoprimento di bitume inferiore al 20%; grani parzialmente rivestiti, con ricoprimento di bitume dal 21 al 99%; grani completamente rivestiti, con ricoprimento totale.

Per quanto riguarda la lavorabilità delle miscele W.M.A. si è indagato valutando la coesione: sebbene non siano state stabilite oggettive relazioni tra i 2 parametri, la pratica comune indica come bassa coesione fornisca matrici soggette a segregazione, e alta coesione provochi indurimenti, entrambi fattori che limitano la lavorabilità. La coesione delle miscele schiumate è stata testata mediante V.S.T. (Vane Shear Test), utilizzando 2 diversi materiali, registrando la perdita di consistenza dopo il trattamento di schiumatura, simulato con compattazione Marshall. E' quindi stato possibile dimostrare un incremento della resistenza al taglio, all'aumentare delle temperature di miscelazione: sebbene solo in un range di temperature prossime a quella ambiente (dai 10 ai 45°C), i materiali hanno dimostrato un notevole incremento della coesione.

Infine, sono state condotte delle indagini sulle modalità di compattazione dei W.M.A.. Si è partiti dal presupposto, già assodato, che l'incremento della densità e dei livelli di compattazione della miscela conduce ad un sensibile miglioramento delle proprietà meccaniche, in particolare della stabilità e della rigidità. I test sono stati effettuati mediante tecnica giratoria, impostato a diversi cicli, in funzione dei materiali e dei possibili livelli di traffico prevedibili in esercizio. Si è utilizzato il protocollo Superpave, con settaggi di 1.25° per l'angolo di inclinazione, 600 kPa di carico e 30 rotazioni per minuto, variando unicamente la temperatura di prova. Il protocollo ha previsto prove di resistenza a trazione indiretta I.T.S. (Indirect Tensile Strength), per misurare la resistenza a fatica: le prove, notoriamente distruttive non hanno consentito di identificare oggettive relazioni tra la tensione e i fenomeni di rottura; hanno comunque fornito un trend comportamentale. I risultati hanno comunque dimostrato che la temperatura degli aggregati, all'atto della miscelazione, sembra non avere significativa influenza sulla compattazione. Le piccole variazioni nel contenuto dei vuoti riscontrate sono state invece verosimilmente attribuite alle variazioni nel contenuto di umidità avvenute durante i test.

In conclusione, le indagini svolte hanno consentito di raccogliere una serie di esperienze funzionali al progetto delle miscele W.M.A., portando a stabilire che:

- nelle fasi antecedenti alla miscelazione con bitume schiumato, il riscaldamento degli aggregati, comunque al di sotto dei 100 °C, ha un notevole impatto sulle caratteristiche delle miscele prodotte. Analisi visive indicano che il rivestimento degli inerti migliora con l'aumento delle temperature, anche per grani grossi;
- la distribuzione del bitume risulta migliorata se gli inerti subiscono riscaldamento pre-miscelazione (dimostrato dai test sulla coesione mediante V.S.T.);
- la compattazione dei W.M.A. è fortemente dipendente dalla temperatura a cui avviene, mentre risulta scarsamente influenzata dalla temperatura degli aggregati all'atto della miscelazione;
- la compattazione può essere simulata sia a temperatura ambiente, sia a temperatura più alta: come già noto da letteratura, la compattazione simulata a temperatura ambiente rappresenta in modo veritiero il comportamento delle pavimentazioni in esercizio costituite da conglomerati tiepidi;
- l'umidità è un fattore determinante nei processi di rivestimento e di sviluppo della coesione nella miscela: il contenuto umido diminuisce durante il processo di miscelazione, come conseguenza dell'eccitazione delle molecole dell'acqua causata dal calore dovuto agli aggregati riscaldati.

Il terzo estratto è stato presentato da Koenders et al., durante il “2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress”, tenutosi a Barcellona nel 2000, e riporta il titolo “*Innovative Process In Asphalt Production And Application To Obtain Lower Operating Temperatures*”. L'articolo descrive un tecnica per la costituzione dei conglomerati bituminosi tiepidi, testata in laboratorio e valutata in larga scala con test sul campo (in Norvegia, Regno Unito e Olanda), rivolta particolarmente alla produzione e alla formazione di strati capaci di ottima resistenza ai fenomeni di usura. Ancora una volta, l'intento della trattazione è dimostrare adeguati standard prestazionali e di qualità delle miscele, nonostante il processo produttivo si sviluppi a temperature inferiori a quelle normalmente raggiunte nel confezionamento dei tradizionali conglomerati a caldo. In altri termini, si è andati alla

ricerca di un compromesso tra la bassa viscosità del bitume (necessaria ad ottenere aggregato ben rivestito e lavorabile, durante miscelazione, stesura e compattazione), e un accettabile tempo di solidificazione, che garantisca le caratteristiche finali richieste. I test di laboratorio sono stati condotti con lo scopo di indagine di performance delle miscele quali resistenza alle sollecitazioni statiche e dinamiche, modalità di frattura, resistenza all'usura, e comportamenti a fatica e alle basse temperature: si è inoltre rivolta l'attenzione a fattori paralleli quali le caratteristiche ambientali e le emissioni di fumi e sostanze volatili durante le operazioni di confezionamento e stesura. La possibilità della riduzione delle temperature, propria dei processi di produzione delle miscele tiepide (nelle quali le temperature di produzione si aggirano tra i 100 e i 120 °C, e quelle di compattazione tra gli 80 e i 90 °C), si può ottenere combinando diversi tipologie di bitume: l'articolo analizza in particolare i processi che coinvolgono miscele bituminose dense, le più utilizzate. In particolare, la sperimentazione ha previsto l'utilizzo di un bitume duro, in forma di polvere, schiuma o emulsione, con temperatura di compattazione tra gli 80 e i 90 °C, e di un bitume molle, a viscosità sufficientemente bassa, miscelato a temperature intermedie. Il bitume molle è prima miscelato con gli aggregati: deve presentare viscosità inferiore ai 0.3 Pa*s a 100 °C, in modo da consentirne miscelazione, con rivestimento completo degli aggregati, a temperature minori dei 100 °C (spesso sono previsti additivi a favore di coesione). Di seguito si elencano le principali indagini svolte in laboratorio.

- La compattabilità, a temperature tra i 70 e gli 80 °C, è stata valutata misurando il grado di compattazione con pressa giratoria, principalmente in funzione del contenuto dei vuoti dei campioni.
- La resistenza alle deformazioni permanenti è stata testata con il N.A.T. (Nottingham Asphalt Tester) per 1 ora a 40 °C, con un carico ciclico di 100 kPa, agente per 0.2 secondi, seguiti da 1.8 secondi di riposo.
- La resistenza a fatica è stata analizzata mediante prova a tre punti, a 10 °C e a 40 Hz: i test si sono svolti applicando una tensione costante al centro di uno strato di bitume, per un numero di volte sufficiente a raggiungere la metà della rigidità iniziale. Le caratteristiche delle miscele sono state espresse nel valore di tensione applicato corrispondente a una vita a fatica di 1 milione di cicli, e in funzione della possibile deformazione iniziale da applicare al campione in modo da ottenere effettivamente 1 milione di cicli prima del collasso. I risultati hanno dimostrato comportamenti molto simili per conglomerati caldi e tiepidi preparati con polvere,

ovvero raggiungimento del milione di cicli già con applicazione di carichi molto bassi. Inoltre, campioni tiepidi testati per 2 settimane, 2 mesi e 6 mesi, non hanno evidenziato fenomeni di solidificazione.

- L'adesione della miscela è stata analizzata mediante il test di abrasione californiana modificato: si sono valutati gli effetti superficiali provocati da un impatto istantaneo di sfere d'acciaio sui campioni, dopo l'immersione in acqua a 4 °C per 24 ore.
- I fenomeni di frattura a bassa temperatura sono stati analizzati mediante il test "Shell's Thermal Restrained Cooling": i provini sono stati raffreddati lentamente (10 °C/ora), mantenuti compressi lateralmente mediante una fustella (a causa del confinamento, gli stress termici si sviluppano fino al punto in cui si eccede la forza a frattura del conglomerato). I risultati, desunti a 9 mesi dalla preparazione dei campioni, hanno mostrato comportamenti molto simili per miscele calde e tiepide, con fratture avvenute, in entrambi i casi, a temperatura di circa -27 °C, nonostante nel primo periodo dopo la produzione le miscele tiepide avessero fornito temperature di frattura e valori di tensione più bassi.
- Per quanto riguarda la sperimentazione in esercizio, l'articolo cita una serie di esperienze sparse in diversi paesi, nelle quali si è tentato di paragonare le prestazioni del conglomerato tiepido a quelle della tradizionale miscela a caldo. Si è quindi tentato di utilizzare gli stessi materiali (per quanto possibile) e di garantire le operazioni di posa con modalità simili: i diversi confronti sono stati effettuati su zone caratterizzate da livelli di traffico simili e soggette a climi molto somiglianti.

In conclusione, i W.M.A. hanno dimostrato di essere dei materiali davvero promettenti, che garantiscono ottime prestazioni sotto svariati punti di vista, ampiamente paragonabili a quelle dei conglomerati a caldo, fornendo tuttavia la possibilità di processi di produzione e stesura che implicano temperature inferiori a quelle tradizionalmente raggiunte. Tali riduzioni contribuiscono positivamente alla diminuzione delle emissioni (fumi, polveri, CO₂) e alla salvaguardia energetica. In particolare, dopo una lunga sperimentazione di laboratorio, si sono ottenuti ottimi risultati anche in esercizio per conglomerati tiepidi schiumati e ad emulsione bituminosa.

5.1.3. Studi reologici con D.S.R.

L'utilizzo del reometro a taglio (D.S.R.), allo scopo di determinare le caratteristiche reologiche dei bitumi, risulta largamente diffuso già da qualche anno: in aggiunta ad altre apparecchiature, consente la simulazione in laboratorio dei comportamenti dei leganti nei confronti di fenomeni quali fessurazioni termiche, fatica e deformazioni permanenti. Si riportano di seguito alcuni articoli che espongono alcune sperimentazioni che hanno previsto l'impiego del Dynamic Shear Rheometer.

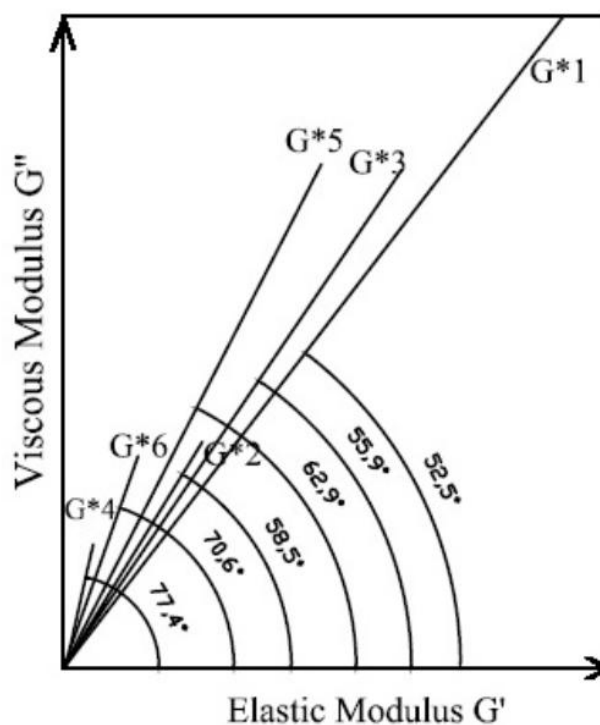
Il primo estratto è stato presentato nel I.J.R.E.T. (*International Journal Of Research In Engineering And Technology*) nel Novembre del 2013, redatto da Amarnath et al., dal titolo “*Determining The Rheological Properties Of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer (DSR) For Selected Pavement Stretches*”. L'articolo si è posto l'obiettivo di studiare le proprietà reologiche, mediante D.S.R., di un bitume estratto e recuperato da un tratto di pavimentazione in esercizio da 4 anni, originariamente caratterizzato da una classe di penetrazione 60/70. Sono stati svolti svariati test per la determinazione di parametri quali modulo complesso, modulo elastico e viscoso, e angolo di fase, con lo scopo di indagare sui comportamenti nei confronti di fenomeni di degrado dovuti a fatica e di deformazioni permanenti con ormaie. Non a caso, la trattazione ha riguardato leganti invecchiati: è infatti noto come le proprietà reologiche, direttamente correlabili alle performance, siano strettamente dipendenti dalle modalità di produzione dei conglomerati, ma soprattutto dai processi che interessano la pavimentazione durante le fasi di esercizio. Il tratto di strada oggetto di analisi è stato reperito in ambito autostradale (Highway 17, Bangalore); la pavimentazione flessibile, costituita da 4 strati, è stata suddivisa in 6 sezioni, in modo da costituire diversi campioni rappresentativi dei differenti strati. Il processo di estrazione è stato effettuato mediante ripetuti processi di lavaggio con solventi e filtrazione con estrattore a centrifuga, fino a evaporazione dei solventi: il recupero del bitume è stato effettuato mediante metodo di distillazione di Abson (A.S.T.M. D1856), previo riscaldamento a 135 °C. A fronte di un punto di rammollimento originale di 44 °C (classe 40-55), i leganti estratti dalle 6 sezioni provenienti dai diversi strati hanno fornito valori compresi tra i 46 e i 48 °C. La sperimentazione con reometro D.S.R. è stata condotta portando i bitumi alla temperatura di 45 °C (con tolleranza di 0.1 °C), in modo da consentirne la stesura sui piatti dell'apparecchiatura: sono stati effettuati diversi test, tra cui: “strain controlled mode” (a deformazione controllata), al fine di determinare i valori di modulo complesso (con tolleranza sulla deformazione imposta del 20%); “stress controlled mode” (a tensione controllata), sempre per la determinazione del modulo complesso, con tolleranza sempre pari al 20% rispetto al valore di tensione imposto [tensione costante pari a 2.45 kPa, alla temperatura costante di 46.0 °C,

con tolleranza di 0.1 °C]. Le prove si sono sviluppate in 2 serie di 10 cicli, alla frequenza standard di 10 rad/s: il software di supporto ha fornito la registrazione automatica dei dati durante tutto lo svolgimento delle prove, mediante i quali è stato possibile raccogliere tutti i valori dei moduli elastici, viscosi e complessi, e i relativi angoli di fase, per le 6 sezioni diverse. Di seguito sono illustrati i risultati.

Tabella 5.3. Risultati dei test D.S.R.

Section number	Phase angle $\delta(^{\circ})$	Complex modulus G^* (Pa)	Elastic modulus G' (Pa)	Viscous modulus G'' (Pa)	Complex viscosity η^* (Pas)	Strain γ	$G^*/\sin \delta$ (Rutting par.) kPa	$G^* \sin \delta$ (Fatigue par.) kPa
C1	52.54	31.98e+04	19.5e+04	25.4e+04	31.9e+03	76.45e-02	402.90	253.80
C2	58.51	9.767e+04	5.10e+04	8.33e+04	9.74e+03	2.5033e-02	114.53	83.22
C3	55.86	22.13e+04	12.4e+04	18.3e+04	22.1e+03	1.105e-02	267.32	182.91
C4	77.35	3.116e+04	6.83e+03	3.04e+04	3.11e+03	7.8469e-02	31.936	30.34
C5	62.91	20.79e+04	9.47e+04	18.52e+04	20.74e+03	1.176e-02	233.60	185.09
C6	70.59	8.276e+04	2.75e+04	7.81e+04	8.25e+03	2.954e-02	87.748	77.99

Grafico 5.1. Rappresentazione grafica dei risultati



Le principali deduzioni sono esposte di seguito:

- il modesto innalzamento dei punti di rammollimento, rispetto a quelli originali, ha testimoniato l'avvenuto effetto di invecchiamento del conglomerato, con conseguente irrigidimento: nonostante i 4 anni trascorsi in esercizio, i valori sono risultati comunque all'interno dei range di accettabilità secondo le prescrizioni;
- l'angolo di fase più alto di alcune sezioni è risultato corrispondente ad una maggiore viscosità del materiale; tutti gli strati testati, comunque, hanno garantito alta viscosità;
- l'analisi delle deformazioni permanenti da ormaiamento propria del primo periodo di vita del conglomerato, dipendente principalmente dalle caratteristiche degli aggregati, ha fornito valori del rapporto modulo complesso/seno angolo di fase ampiamente al di sopra del valore minimo prescritto dal protocollo Superpave (2.2 kPa);
- l'analisi del comportamento a fatica, espressa dal prodotto di modulo complesso e seno dell'angolo di fase, ha fornito valori ben al di sotto del massimo prescritto da protocollo Superpave (5000 kPa).

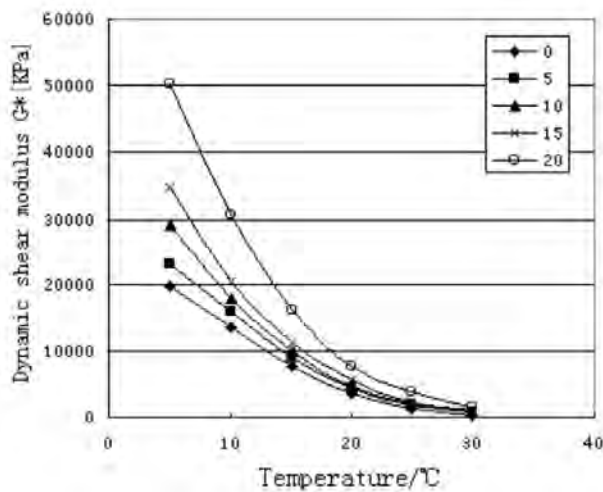
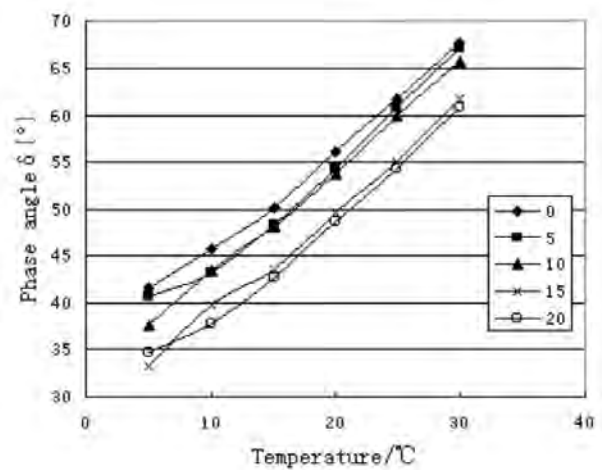
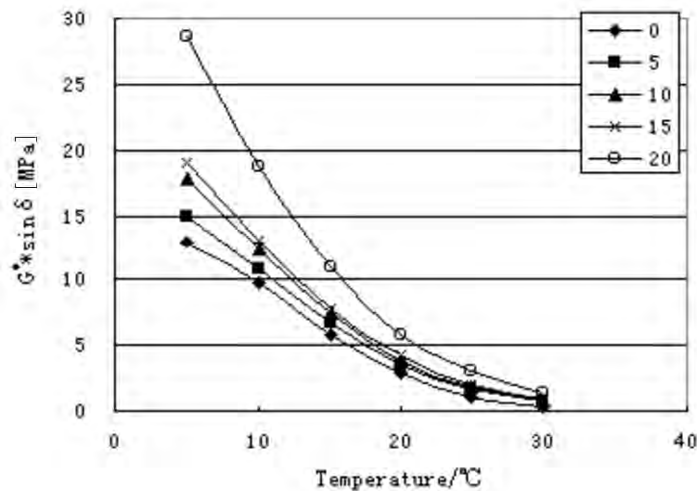
In generale, i test D.S.R. hanno evidenziato che i bitumi, sebbene soggetti a traffico per un periodo di 4 anni, possiedono rigidità sufficiente per resistere a fenomeni di ormaiamento e degrado da fatica; eventuali presenze di degrado comunque riscontrate, saranno quindi da imputare a criticità nel sub-strato, o a problemi nei sistemi accessori, come quelli di drenaggio.

Il secondo articolo proposto tratta uno studio sviluppato nel Luglio del 2004 da Xiaoge et al., presso la *Changsha University of Science and Technology*, in Cina, dal titolo "*Effect Of Aging On Viscoelastic Performance Of Asphalt Binder*": l'obiettivo della sperimentazione di laboratorio è stato quello di analizzare le risposte viscoso ed elastiche del bitume, sottoponendo i campioni a serie di test con B.B.R. (Bending Beam Rheometer) e D.S.R. (Dynamic Shear Rheometer), costituiti mediante procedure di simulazione dell'invecchiamento R.T.F.O. e P.A.V.. Ancora una volta viene enfatizzato il ruolo dell'invecchiamento, responsabile di quei cambiamenti fisici e chimici e di quei processi di ossidazione che provocano irrigidimenti del conglomerato, con aumento del punto di rammollimento, incremento della viscosità, e diminuzione di fattori quali la

classe di penetrazione e la duttilità. La simulazione del fenomeno in laboratorio è stata sviluppata seguendo il protocollo S.H.R.P. (Strategic Highway Research Program): il confezionamento di campioni R.T.F.O. (Rolling Thin Film Oven) è stato destinato alla simulazione dell'invecchiamento iniziale, subito dal materiale durante le fasi di produzione, mentre quello di campioni P.A.V. (Pressure Aging Vessel) alla simulazione di un invecchiamento di durata approssimativa di 5 anni. In laboratorio è stato utilizzato un bitume Shell-70, caratterizzato da penetrazione a 25 °C di 68.8, punto di rammollimento di 46.5 °C e duttilità a 25 °C maggiore di 100 cm. Per quanto riguarda l'utilizzo del reometro D.S.R., si sono svolte svariate simulazioni per la determinazione dei moduli complessi e degli angoli di fase: ancora una volta, la resistenza alle deformazioni permanenti con ormaie è stata espressa dal rapporto di modulo e seno dell'angolo di fase, mentre il comportamento a fatica è stato indicato con il prodotto dei 2 parametri. I test sono stati sviluppati sui campioni P.A.V. in funzione di 2 parametri: è stato previsto un range di temperature dai 5 ai 30 °C, con intervalli di 5 °C, e si sono testati campioni sottoposti a diverse simulazioni di invecchiamento (periodi di invecchiamento in laboratorio dalle 0 alle 20 ore, ad intervalli di 5 ore). La tabella riporta i valori registrati dal software del reometro: i grafici successivi illustrano gli andamenti di modulo complesso, angolo di fase e della resistenza alle deformazioni da fatica (espressa dal prodotto), in funzione delle diverse temperature di prova e dei periodi di invecchiamento.

Tabella 5.4. Risultati dei test D.S.R. in funzione di temperatura e periodi di invecchiamento

Aging PAV(h)	Viscoelastic Index	Temperature (° C)					
		5	10	15	20	25	30
0	G^* (KPa)	19600	14000	7590	3480	1290	375
	δ (°)	40.7	43.2	48.3	54.3	60.8	67.1
	$G^* \sin \delta$ (MPa)	12.8	9.61	5.67	2.82	1.13	0.345
5	G^* (KPa)	22900	15900	8940	4340	1900	814
	δ (°)	40.7	43.2	48.3	54.3	60.8	67.1
	$G^* \sin \delta$ (MPa)	14.93	10.88	6.67	3.52	1.66	0.75
10	G^* (KPa)	29200	18000	9930	4710	2150	865
	δ (°)	37.5	43.4	48.2	53.8	60	65.7
	$G^* \sin \delta$ (MPa)	17.78	12.37	7.40	3.80	1.86	0.79
15	G^* (KPa)	34800	20500	11300	5600	2370	986
	δ (°)	33.2	39.7	43.5	49.6	55	61.7
	$G^* \sin \delta$ (MPa)	19.06	13.09	7.78	4.26	1.94	0.87
20	G^* (KPa)	50400	30600	16100	7670	3790	1490
	δ (°)	34.7	37.8	42.6	48.8	54.4	60.9
	$G^* \sin \delta$ (MPa)	28.69	18.75	10.90	5.77	3.08	1.30

Grafico 5.2. *Modulo dinamico complesso***Grafico 5.3.** *Angolo di fase***Grafico 5.4.** *Indice della resistenza a fatica*

Si riportano di seguito le principali deduzioni:

- l'incremento del periodo di invecchiamento in laboratorio è stato responsabile dell'innalzamento dei moduli complessi e della progressiva decrescita dell'angolo di fase: questo fatto può essere responsabile di un incremento della capacità anti-deformativa propria del legante, che può sicuramente favorire la posticipazione del degrado da deformazioni permanenti;
- il prodotto modulo complesso/seno dell'angolo di fase, rappresentativo della resistenza a fenomeni di fatica, è risultato direttamente proporzionale al periodo di invecchiamento in laboratorio espresso in ore: i campioni maggiormente invecchiati hanno quindi fornito una minore resistenza a fatica.

In conclusione, il prolungarsi del tempo di invecchiamento P.A.V. ha fornito graduali incrementi di elasticità e graduali decrementi di viscosità, ossia un comportamento sicuramente utile a posticipare le deformazioni permanenti, ma altresì meno cautelativo nei confronti di fessurazioni da fatica.

Il terzo estratto proposto è contenuto nell'E.J. (*Engineer Journal*) n° 4, vol. 16, del 2012 e consiste in uno studio effettuato da Clopotel e Bahia presso il Department of Civil and Environmental Engineering dell'University of Wisconsin Madison, negli Stati Uniti, dal titolo "*Importance of Elastic Recovery in the DSR for Binders and Mastics*". L'articolo propone una sperimentazione di laboratorio per definire le procedure del test E.R.-D.S.R. (Elastic Recovery - Dynamic Shear Rheometer) in sostituzione alla prova E.R.-D.B. (Elastic Recovery - Ductility Bath). La procedura E.R. per la determinazione della deformazione elastica recuperabile dei bitumi è attualmente inserita negli standard A.S.T.M./A.A.S.H.T.O., e viene sviluppata con il test di misurazione del bagno di duttilità: la nuova procedura propone la determinazione di tale grandezza mediante l'utilizzo del reometro a taglio D.S.R., con notevoli vantaggi, in termini di accuratezza, di ripetibilità e di risparmio nei materiali e nei tempi di esecuzione. L'approccio tradizionale per la caratterizzazione delle miscele prevede test M.S.C.R. (Multiple Strees Creep and Recovery) per la determinazione della resistenza alle deformazioni permanenti, e test L.A.S. (Linear Amplitude Sweep) per lo studio della resistenza a fatica. Tali prove riescono a fornire indicazioni dirette sulle resistenze proprie dei materiali, a differenza della procedura E.R.-D.B., che fornisce soltanto misure percentuali di elasticità recuperabile. In tale contesto si inserisce quindi la trattazione della nuova procedura, mirata a sostituire quella tradizionale: viene sviluppata in laboratorio trattando bitumi modificati con polimeri e additivati con la presenza di filler minerali (mastici). Attualmente, la classificazione Performance Grade risulta poco funzionale alla definizione dei comportamenti visco-elastici dei leganti; il protocollo Superpave presenta sicuramente maggiore accuratezza, ma viene di norma applicato a bitumi di tipo tradizionale. Il N.C.H.R.P. (National Cooperative Highway Research Program) si è quindi posto l'obiettivo di verificare la validità del protocollo Superpave applicato a bitumi modificati, concludendo, dopo svariati studi, come il protocollo sia comunque utilizzabile, anche se non del tutto esaustivo: si è quindi proposto il protocollo Superpave Plus, nel quale vengono inserite le ulteriori specificazioni da seguire per la completa caratterizzazione dei leganti modificati con polimeri.

La sperimentazione ha previsto la combinazione di diversi materiali: si sono utilizzate 2 tipologie di bitume (PG 64-22 e PG 58-28), 7 tipi di polimeri modificanti, e 3 tipologie di filler minerali [(LS2)

calcarei, (DS2) dolomitici, (CA2) di calcio]. Sono state effettuate le seguenti prove:

- E.R.-D.S.R.: determinazione delle caratteristiche reologiche con reometro rotazionale a taglio D.S.R., secondo standard A.S.T.M. D7175, su campioni soggetti a trattamento R.T.F.O. (Rolling Thin Film Oven) [gap: 2.10 mm - temperatura di prova: 25 °C - deformazione costante: 0.023 s⁻¹ per 2.0 s];
- L.A.S.: valutazione della capacità di resistenza a fenomeni di fatica mediante test “linear amplitude sweep”. Si è utilizzato nuovamente il reometro D.S.R. per la misurazione delle proprietà reologiche: in fase iniziale si è effettuato un “frequency test”, mentre successivamente, in prossimità del collasso da fatica, si è effettuato l’ “amplitude sweep test”, in modalità “controllo di deformazione”, con una frequenza di 10 Hz. Lo schema di carico è stato costituito da cicli, composti da 10 secondi di sollecitazione a deformazione controllata e da un successivo intervallo per l’incremento dell’ampiezza di deformazione, variabile dallo 0.1 al 20.0%. Ogni 10 cicli si sono registrati i picchi di deformazione e tensione, e i valori di modulo complesso e angolo di fase;
- M.S.C.R.: valutazione delle percentuali di deformazione recuperabili, secondo standard A.S.T.M. 1045-10, secondo il quale si utilizza il reometro D.S.R. in modalità “controllo di tensione”. Il campione, costituito secondo procedura di invecchiamento R.T.F.O., sono stati sollecitati ciclicamente [1 secondo di carico e 9 secondi a riposo]: i primi 10 cicli alla tensione di 0.1 kPa, i secondi 10 a 3.2 kPa.

Una volta effettuati tutti i test, per tutte le combinazioni dei diversi materiali, è stato possibile analizzare i risultati. Si riportano di seguito le principali deduzioni.

- Sembra esistere una buona rispondenza tra la deformazione recuperabile determinata con tradizionale test E.R.-D.B., e quella ottenuta con test E.R.-D.S.R., anche se l’ultima ha fornito valori mediamente inferiori del 70%. Il fatto può essere imputabile a cause differenti: il carico applicato con reometro è di taglio, a differenza di quello della tradizionale prova a bagno di duttilità; la temperatura nel reometro è strettamente fissata, con tolleranza di 0.1 °C, a differenza di quella del test D.B., a bagno aperto, per cui maggiormente sensibile alle condizioni ambientali; o ancora esistono differenze geometriche nei campioni. Nonostante tutto, è preferibile la nuova prova con reometro; oltre ai già citati vantaggi, uno dei maggiori

miglioramenti consiste nella possibilità di monitorare i valori in continuo durante le prove.

- Sebbene la valutazione dell'elasticità recuperabile sia largamente utilizzata, esiste un forte dibattito sulla validità di tale parametro per la caratterizzazione dei comportamenti dei leganti. Non esiste alcun dubbio sul fatto che essa sia un indicatore efficiente nella trattazione di bitumi modificati con polimeri elastomeri. Restano invece alcune riserve sulla sua validità nella valutazione di altri tipi di polimeri, come, per altro, se sia un parametro che possa indicare in modo esaustivo il comportamento nei confronti di fenomeni quali la durabilità e la qualità generale del materiale. La sperimentazione comparativa tra prove E.R.-D.S.R. e test L.A.S.-M.S.C.R. ha fornito alcune risposte: i risultati sembrano indicare che, sia per la valutazione delle deformazioni permanenti (M.S.C.R.), sia per i comportamenti a fatica (L.A.S.), la valutazione dell'elasticità recuperabile (E.R.-D.S.R.) può essere un valido surrogato, anche se la maggiore rispondenza si evince nell'ambito della fatica.
- I risultati con D.S.R. nelle prove dei mastici hanno portato a concludere che, sia per bitumi tradizionali, sia per bitumi modificati con polimeri, l'elasticità recuperabile risulta molto simile, a prescindere dal tipo di filler minerale impiegato.

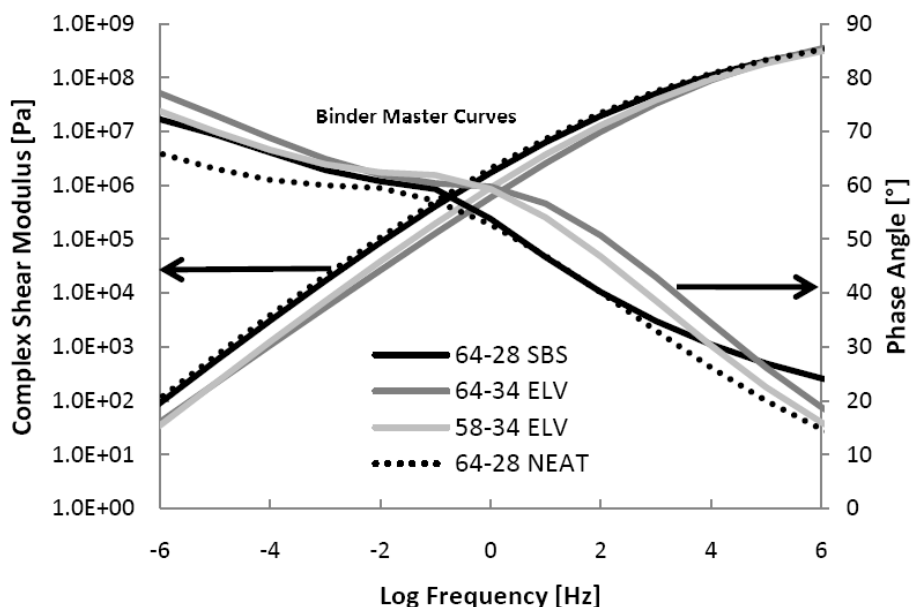
Un altro importante contributo d'analisi è raccolto nella pubblicazione ad opera di Johnson e Bahia, sviluppata presso il Dipartimento di Ingegneria Civile della University of Wisconsin, negli U.S.A., pubblicato nel 2010, dal titolo “*Evaluation Of Accelerated Procedure For Fatigue Characterization Of Asphalt Binders*”.

Lo studio si è posto l'obiettivo di identificare una nuova procedura per la caratterizzazione dei materiali per quanto riguarda la resistenza a fatica: la necessità di sviluppo di un protocollo accurato è giustificata dal fatto che, gli attuali metodi di indagine, riguardanti la determinazione dei moduli complessi, considerano gli effetti di invecchiamento a lungo termine, senza però trattare la reale resistenza alle sollecitazioni, l'effetto delle strutture che costituiscono la pavimentazione, o ancora, i carichi reali dovuti al traffico. Il protocollo sperimentale è stato sviluppato testando 4 tipologie di bitume (di cui 3 modificate), tutti sottoposti a procedura di invecchiamento P.A.V., mediante reometro a taglio D.S.R. Anton Paar.

Tabella 5.5. *Bitumi modificati: polimeri utilizzati*

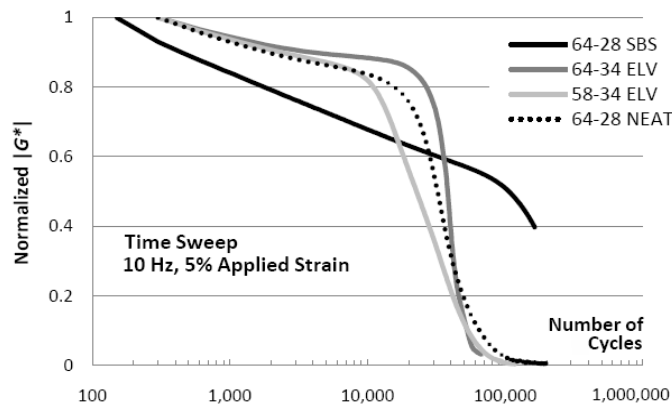
Binder PG Grade	Polymer	Modification Type
64-28	None	None
64-28	S.B.S.	Plastomeric
58-34	Elvaloy®	Elastomeric
64-34	Elvaloy®	Elastomeric

Al fine di determinare appropriate temperature di test, si sono sviluppate le “master curves” dei materiali, per determinare a quale temperatura si raggiungessero tensioni di 5.000 kPa (valore da protocollo Superpave) [prove di “frequency sweep” con applicazione di deformazione dello 0.1%, a frequenza via via variabile da 1 ai 30 Hz, e a temperature comprese tra i 7 e 28°C]. La figura illustra i risultati (“master curves”).

Grafico 5.5. *Prove di “frequency sweep”: Master Curves*

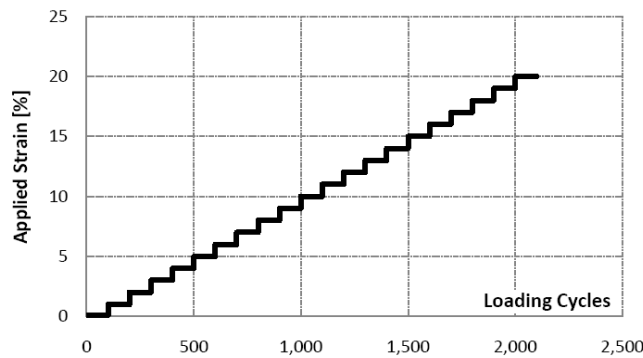
Si sono quindi sviluppate prove di “amplitude sweep” nelle ipotesi che potessero ben conformarsi ai fenomeni di fatica, misurati mediante prove di “time sweep”. I test “time sweep” sono stati effettuati in controllo di deformazione al 5%, per più di 360 000 cicli, alla frequenza di 10 Hz. I risultati, illustrati nella successiva figura, evidenziano come il bitume modificato con S.B.S. garantisca una maggiore resistenza al danno da fatica.

Grafico 5.6. Risultati dei test “time sweep”



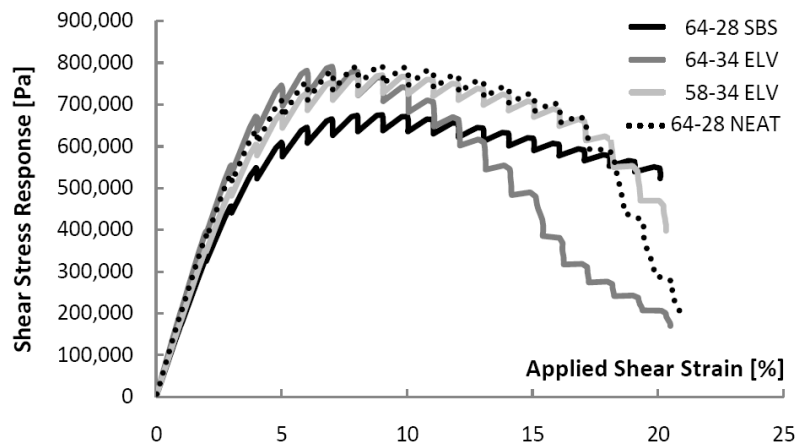
I test “amplitude sweep” sono stati anch’essi effettuati alla frequenza di 10 Hz; di seguito se ne riporta lo schema dei cicli di carico.

Grafico 5.7. Schema di carico ciclico “amplitude sweep”



Si è impostata la prova controllando la deformazione, e monitorando i risultati per quanto riguarda le tensioni di taglio: il seguente grafico riporta gli andamenti ottenuti.

Grafico 5.8. Risultati test “amplitude sweep” – Tensione vs. Deformazione



Alle deformazioni applicate più alte (20%), il reometro ha sollecitato il materiale con un carico che ha portato la deformazione dallo 0 al 20% in un'unica direzione, e successivamente con un carico che ha portato la deformazione al 20% nell'altra direzione in 0.1 secondi. Per quanto emerge dalla rappresentazione grafica, non sembra essersi sviluppato alcun comportamento irrigidente, per nessuno dei campioni testati.

Oltre ai test citati, la pubblicazione propone altre metodologie per l'analisi dei comportamenti a fatica dei bitumi, con l'intento di confrontare e validare tutte le procedure prese in esame: per brevità, la nostra trattazione si sofferma alle prime prove, che costituiscono di fatto le stesse che saranno sviluppate nel protocollo sperimentale in laboratorio.

5.1.4. Sperimentazione con D.S.R. applicata a bitumi modificati

Il seguente paragrafo vuole raccogliere alcune esperienze presenti in letteratura nello studio delle proprietà dei bitumi additivati con polimeri: generalmente, le sperimentazioni prevedono lo sviluppo di diversi tipi di protocolli e l'utilizzo di svariate apparecchiature di test. Per motivi di pertinenza ci soffermeremo alle analisi degli aspetti che riguardano soltanto l'utilizzo del reometro a taglio D.S.R..

Il primo articolo è stato pubblicato il 3 Giugno 2013 nel "*Canadian Journal Of Civil Engineer*": redatto da Xiao et al., presenta il titolo "*Rheological And Chemical Characteristics Of Warm Mix Asphalt Binders At Intermediate And Low Performance Temperatures*", ed è stato sviluppato presso la Tongji University di Shanghai, Cina.

L'obiettivo dello studio è presentare una sperimentazione di laboratorio su 8 tipi di bitume, di cui 4 miscelati con additivi tiepidi non schiumati, che analizza, secondo standard Superpave, le caratteristiche reologiche dei materiali alle basse e alle temperature intermedie. E' quindi previsto l'utilizzo di reometro D.S.R. (Dynamic Shear Rheometer) e reometro B.B.R. (Bending Beam Rheometer), e test F.T.I.R. (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) per determinare l'influenza dell'additivo dopo procedura di invecchiamento di lungo termine. L'indagine concerne le temperature basse e intermedie in quanto tipiche del clima canadese: i principali meccanismi di rottura della zona oggetto di studio, infatti, sono quelli dovuti all'indurimento e alla fragilizzazione dei bitumi costituenti i conglomerati, che avvengono a temperature contenute.

I bitumi utilizzati presentano diversi P.G. (da 76-22 a 52-28): sono state aggiunte 4 tipologie di additivi warm non schiumati, in percentuali variabili dallo 0.3 all'1.5% in peso, a seconda delle indicazioni dei produttori. Le procedure di invecchiamento hanno seguito gli standard A.A.S.T.H.O. T240 (R.T.F.O. per invecchiamento iniziale) e A.A.S.H.T.O. R28 (P.A.V. per invecchiamento dopo l'esercizio). I test D.S.R., condotti mediante piatto da 8 mm, con gap di 2 mm, hanno fornito i valori di modulo complesso e angolo di fase a diverse temperature di prova (28°C, 25°C, 19°C, 16°C). Dall'analisi del prodotto del modulo e del seno dell'angolo di fase, rappresentativa dei comportamenti a fatica, si è dedotto che, in presenza di W.M.A., alle temperature più alte si sono ottenuti inferiori valori di $G^* \sin \delta$, a prescindere dalla tipologia di additivo: in generale, i bitumi additivati con W.M.A. hanno fornito valori dei prodotti tali per cui sembrano possedere una minore suscettibilità all'ossidazione rispetto ai bitumi non additivati. Sulla base di tutti i test svolti, si è potuto concludere che, i bitumi invecchiati e miscelati con additivi tiepidi hanno indicato che l'origine e il Performance Grade sono fattori fondamentali nella determinazione del prodotto $G^* \sin \delta$ e della rigidità.

Il secondo estratto degno di nota riguarda uno studio svolto nel 2013 presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e delle Costruzioni dell'Università Politecnica delle Marche, redatto ad opera di Cardone et al, dal titolo "*Influence Of Polymer Modification On The Rheological Response Of Bitumens And Mastics*". Il testo descrive dettagliatamente una sperimentazione di laboratorio che si pone lo scopo di investigare principalmente i comportamenti e le resistenze a fenomeni di ormaiamento in diversi scenari: in particolare, paragonando diversi tipi di campioni, costituiti nei vari casi da bitume ordinario, bitume additivato con polimeri, e leganti con aggiunta di filler di diversa natura (mastici). Si è utilizzato un bitume con classe di penetrazione 70/100, reperito in una raffineria del territorio italiano; si sono impiegati due tipi di polimeri modificanti: il primo di tipo S.B.S. (styrene-butadiene-styrene), con il 30% di styrene, e il secondo costituito da un mix di etilene e propilene, aventi entrambi densità pari a 0.94 g/cm^3 , ed entrambi miscelati al 4% in peso rispetto al bitume. Si sono inoltre impiegati filler di tipo basaltico e di tipo calcareo, in rapporto in massa di 1.2 (con dimensione inferiore a 0.063 mm), miscelati al legante a temperature prossime ai 170 °C mediante un accurato processo di mescolamento. La sperimentazione è stata eseguita con reometro D.S.R., in particolare sviluppando test M.S.C.R., in accordo con lo standard A.S.T.M. D7405, col particolare scopo di indagare sulla resistenza ai fenomeni di ormaiamento in situ. I test sono stati sviluppati alle diverse temperature di 56, 64, 70, 76°C, alle tensioni prima di 0.1 kPa, e poi di 3.2 kPa: per i test con i mastici si è deciso di aggiungere l'ulteriore tensione di 10.0 kPa. Si è quindi

cercato di quantificare il comportamento non lineare dei materiali: in particolare si è deciso di considerare la “caratteristica di deformazione non recuperabile” (J_{nr}) come parametro indicatore dei fenomeni di degrado tipici delle temperature in esercizio più alte. Il parametro J_{nr} è stato calcolato come rapporto tra la deformazione residua nelle fasi di scarico e la tensione τ applicata durante le fasi di carico; si è potuto facilmente identificare come l’andamento di J_{nr} sia stato molto simile in tutti i casi, sia per i bitumi, sia per i mastici, nonostante il prevedibile aumento del parametro con la temperatura, a causa dell’innalzarsi della viscosità alle temperature più alte. Per altro, a parità di bitume e di temperatura, è stato possibile dimostrare come la presenza dei filler provochi l’irrigidimento dei campioni, testimoniato da un valore di J_{nr} più basso: inoltre, non si sono riscontrate significative variazioni della rigidità per i mastici alle diverse temperature, a testimonianza del fatto che i filler causano irrigidimento in tutti i casi, a prescindere dalle temperature. Per ciò che riguarda i mastici a base di bitume modificato con polimeri, il range delle tensioni, espresso dai valori di J_{nr} , è sembrato fortemente influenzato dalla tipologia di inerte impiegato. Tutti i mastici a base di filler basaltici sono risultati poco influenzati dai parametri di tensione, a differenza di quelli costituiti con filler calcarei, per i quali si sono potute osservare importanti variazioni della rigidità con il progredire delle tensioni applicate ai campioni. In definitiva si sono potute constatare le già note proprietà irrigidenti dei filler, sia nei casi di bitume ordinario, sia nei casi di bitume modificato con aggiunta di polimeri.

Una sperimentazione simile è stata condotta nel 2014 da Frigio et al, sempre presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e delle Costruzioni dell’Università Politecnica delle Marche, ed è culminata con la pubblicazione dal titolo “*Fatigue Rheological Characterization Of Polymer-Modified Bitumens And Mastics*”. Lo studio è stato svolto con modalità analoghe al precedente, questa volta con lo scopo di investigare sui comportamenti riguardanti i fenomeni di degrado da fatica. Sono stati impiegati gli stessi polimeri modificanti (dosati al 2 e al 4%), ed ancora filler di natura basaltica e calcarea, miscelati in rapporto 1.2 in massa. I test in laboratorio hanno previsto ancora una volta l’utilizzo del reometro a taglio D.S.R: tutti i materiali sono stati sottoposti a test di fatica con testa di carico da 8 mm, impostando un gap di 2 mm; si sono applicati cicli di carico alla temperatura di 10 °C e alla frequenza di 10 Hz, in modalità di controllo di tensione, settata, di volta in volta, a diversi valori. Al fine di individuare le percentuali di deformazione da imporre ai campioni, sono stati condotti test per indagare sul limite di deformazione lineare/visco-elastica, sia per i bitumi, sia per i mastici; la scelta finale delle deformazioni da imporre è anche derivata da considerazioni operative, cercando di predisporre analisi con tempi di sviluppo ragionevoli,

compatibili con le esigenze di laboratorio. La scelta finale ha portato all'impiego di deformazioni compreso tra lo 0.3 e l' 1.5%, a seconda dei campioni in analisi.

Le analisi dei dati hanno riguardato dapprima il modulo complesso G^* , determinato ad inizio e a fine prova: si è potuto dimostrare, come per altro era atteso, che il modulo complesso decresce all'aumentare della deformazione imposta; inoltre, dal confronto tra i due diversi polimeri, è emerso come quelli di tipo plastomerico producano un effetto irrigidente sul bitume, mentre quelli di tipo elastomerico producano invece un effetto che ammorbidisce il legante. In altri termini, la presenza e la crescente quantità di modificante elastomerico (S.B.S.) consente l'aumento della vita utile a fatica, mentre la presenza e la crescente quantità di modificante plastomerico tende a diminuire la vita utile a fatica. Come per i bitumi, anche per i mastici si è riscontrata la diminuzione del modulo complesso a tensioni via via maggiori: si è inoltre potuta dimostrare la ben nota proprietà irrigidente dell'inerte fine; dal confronto con i bitumi, si sono potute riscontrare importanti diminuzioni della vita a fatica per i mastici, a prescindere dalla natura di filler impiegati. Le curve di fatica hanno testimoniato che, nonostante la presenza dei filler, si è comunque mantenuto il comportamento irrigidente dei plastomeri (con conseguente diminuzione della vita a fatica) e il comportamento ammorbidente degli elastomeri (con conseguente aumento della vita utile a fatica). In generale, tutti i mastici sono risultati meno sensibili alle variazioni di tensione imposta, se comparati con i bitumi.

Si cita in breve un ulteriore contributo, fornito da Kim et al., con lo studio dal titolo "*Effects Of Warm Mix Asphalt Additives On Performance Properties Of Polymer Modified Asphalt Binders*", sviluppato presso la Clemson University, nell'Indiana (U.S.A.), e pubblicato nel 2010 nel "*Canadian Journal of Civil Engineer*".

Lo studio presenta una sperimentazione di laboratorio per l'indagine delle performance di bitumi modificati con polimeri, contenenti additivi warm (W.M.A.), su cui si simula artificialmente il processo di invecchiamento, mediante le 2 note procedure R.T.F.O. e P.A.V.. Il protocollo utilizzato è di fatto il Superpave: sono state previste prove con viscosimetro rotazionale (V.R.), reometro a taglio (D.S.R.) e reometro B.B.R.. I risultati hanno indicato che:

- l'aggiunta di additivi warm al bitume modificato con polimeri ha evidenziato positivi incrementi nella resistenza alle deformazioni permanenti alle alte temperature;

- a temperature intermedie, la valutazione del prodotto di moduli complessi e angoli di fase ha evidenziato che i bitumi modificati additivati warm risultano meno resistenti nei confronti di fenomeni di fatica, se paragonati a bitumi semplicemente modificati (senza additivi);
- l'aggiunta di cera additiva può provocare una sfavorevole perdita di resistenza per ciò che riguarda i fenomeni di fessurazione alle basse temperature.

Capitolo 6

Il reometro D.S.R.

Il “reometro dinamico a taglio” è un’apparecchiatura costituita da due piatti metallici paralleli, che possono essere racchiusi in una camera per il controllo della temperatura, da un dispositivo di carico e da un sistema di controllo e acquisizione dati. La sperimentazione di laboratorio prevede l’utilizzo del reometro D.S.R. Anton Paar, in particolare del modello M.C.R. 302.

6.1. D.S.R. Anton Paar M.C.R. 302

Il reometro è costituito da una strumentazione di test dei provini, accoppiata ad un sistema di rilevazione software fruibile da un computer desktop: l’apparecchiatura è dotata anche di un display di riepilogo e di tasti frontali per controllo remoto senza l’utilizzo del pc.

Figura 6.1. *Reometro D.S.R. Anton Paar M.C.R. 302*



6.1.1. Le componenti

Nella parte inferiore del reometro è presente un piatto circolare, a superficie liscia, sopra il quale si andranno a posizionare i campioni oggetto di test: oltre a fornire la superficie di appoggio, è in grado di regolare la temperatura al contatto, in modo da garantire diversi scenari di prova. La sensibilità del piatto può garantire impostazioni di temperatura con precisione di 0.01 °C: la regolazione del calore è permessa da un circuito ad acqua con pompa, collegato direttamente allo strumento. Il dispositivo è in grado di riscaldare il piatto: gli eventuali processi di raffreddamento, invece, non possono essere direttamente garantiti dall'apparecchiatura. Il raggiungimento di basse temperature, quindi, è fortemente dipendente dai valori della temperatura ambiente: per temperature minori di quella ambiente si dovrà eventualmente raffreddare l'acqua prima della sua immissione nel circuito, ad esempio mediante un criostato. Ai fini della sperimentazione prevista, questo accorgimento non sembra comunque essere necessario. La temperatura viene rilevata al piatto inferiore mediante una sonda termica interna costituita da una resistenza a serpentina di platino.

Figura 6.2. *Piatto inferiore di riscaldamento*

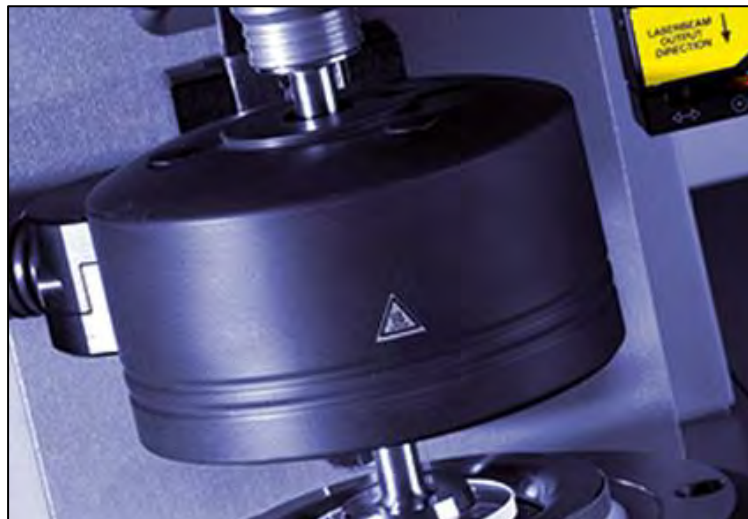


La parte superiore del piatto risulta essere rimovibile, mediante apposita chiave, al fine di agevolarne la pulizia al termine delle operazioni di test.

La parte superiore dell'apparecchiatura è costituita dalla cosiddetta “appendice” del reometro, ovvero l'alloggiamento in cui è contenuta la parte meccanica dello strumento, che risulta essere la

più delicata, e quella che deve subire i controlli più rigorosi. E' dotata di un'apertura filettata sulla quale, rimosso il coperchio protettivo di neoprene, va avvitata la cella Peltier: nella parte superiore, attraverso la cella, si situa l'attacco su cui vanno inserite le teste di carico necessarie ad effettuare le prove. La cella è formata da un supporto di scorrimento d'acciaio, da una ghiera di fissaggio al reometro e da una campana plastica di colore nero, che avvolge il gambo della testa di carico ed è collegata ad un impianto di aereazione. A causa delle forze d'attrito che si sviluppano durante le fasi di prova, la temperatura dei campioni può subire notevoli aumenti: la funzione della cella è quella di garantire un flusso d'aria opportunamente modulato che mantenga la temperatura nei pressi del campione costante, e pari alle temperatura di prova settata, erogata dal piatto inferiore del reometro. Il dispositivo che garantisce il mantenimento della temperatura di test mediante aria compressa è provvisto di deumidificatore interno, che previene fenomeni di condensa sui piatti, o formazione di ghiaccio nei casi di prove a basse temperature.

Figura 6.3. *Cella Peltier*



La testa di carico è lo strumento che viene posto superiormente a contatto con il campione: fissata sull'appendice superiore, è il pezzo mobile del reometro, che fornisce le sollecitazioni al materiale. Il reometro Anton Paar M.C.R. 302 consente agevolmente la sostituzione di diverse teste di carico, per lo sviluppo di prove con piatti superiori di diverse geometrie e dimensioni. Lo standard A.A.S.T.H.O. T 315-10, riguardante l'utilizzo del reometro rotazionale a taglio, prevede 2 misure standard per le teste di carico: la prima con diametro di 8.00 ± 0.02 mm, e la seconda con diametro di 25.00 ± 0.05 mm, da intercambiare principalmente a seconda delle temperature di prova. Per esigenze di laboratorio, la seguente sperimentazione prevede invece l'utilizzo di 2 teste di carico cilindriche, una con diametro di 8.00 ± 0.02 mm, e una con diametro di 20.00 ± 0.05 mm. Le teste

sono costituite di acciaio inossidabile o di alluminio, e devono garantire superfici perfettamente piatte e lisce. La testa di carico superiore e il piatto inferiore devono essere vicendevolmente concentrici; allo stato attuale, non esiste una procedura standardizzata per il controllo della centratura dei piatti, che può comunque essere analizzata visivamente. La testa di carico, attaccata all'appendice superiore, che costituisce la parte terminale della meccanica dello strumento, deve garantire un moto rotatorio senza alcun gioco orizzontale o verticale: il controllo può essere effettuato con un calibro posto a contatto con i bordi della testa mobile, a dispositivo in rotazione. I limiti tollerati da normativa, sia per il gioco orizzontale (centricity), sia per il gioco verticale (runout), sono di ± 0.02 mm (oppure di 0.01 mm per apparecchiature recenti).

Figura 6.4. *Retro della testa di carico*



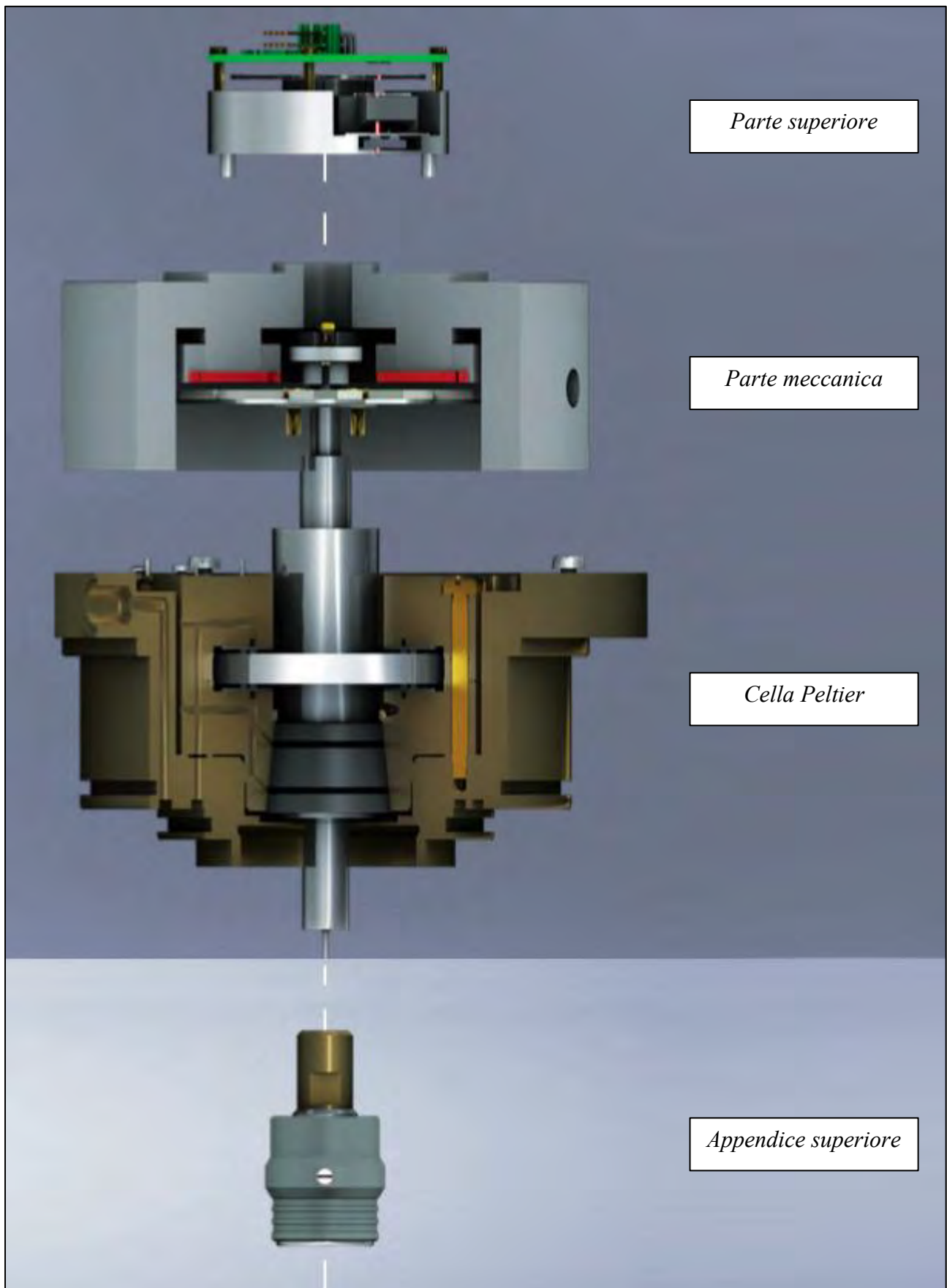
Figura 6.5. *Attacco testa-appendice superiore*



La testa di carico consente l'applicazione ai campioni di carichi rotazionali ad oscillazione sinusoidale a frequenza imposta, che generalmente corrisponde a 10.0 ± 0.1 rad/s (comunque con errore massimo tollerato dell'1%). Il dispositivo è in grado di fornire carichi a tensione controllata, mediante sollecitazione torsionale ciclica con accuratezza di ± 10 mN*m rispetto al valore selezionato: può fornire anche sollecitazioni a deformazione controllata, con torsione ciclica atta a garantire deformazioni angolari specifiche con un'accuratezza di $100 \mu\text{rad}$.

La figura a pagina seguente illustra una sezione longitudinale che evidenzia tutte le parti del reometro (previo inserimento della testa di carico).

Figura 6.6. *Sezione longitudinale*



Il sistema di acquisizione dei dati tramite software consente la registrazione dei valori di temperatura, frequenza, angolo di deflessione e torsione. I dispositivi di misurazione devono garantire le accuratezze espresse in tabella; il sistema deve garantire il calcolo e la registrazione di: tensione, deformazione, modulo complesso di taglio (da 10 Pa a 100 MPa, con scarto massimo pari all'1%) e angolo di fase (da 0 a 90 °, con accuratezza minima di 0.1 °).

Tabella 6.1. Accuratezze - A.A.S.H.T.O. T 315-10

Property	Accuracy
Temperature	0.1 °C
Frequency	1 %
Torque	10 mN*N
Deflection angle	100 µrad

Come già accennato, la parte cruciale dello strumento è costituita dall'apparato meccanico superiore, che deve garantire, mediante testa di carico, sollecitazioni precise ed accurate, consentendo la rotazione della testa con una quasi totale assenza d'attrito. A tale proposito risultano fondamentali i settaggi iniziali e le procedure di controllo e verifica dell'apparato sollecitante, come per altro della parte di controllo della temperatura. Tutte le procedure sono esposte nel paragrafo successivo.

Figura 6.7. Reometro Anton Paar M.C.R. 302

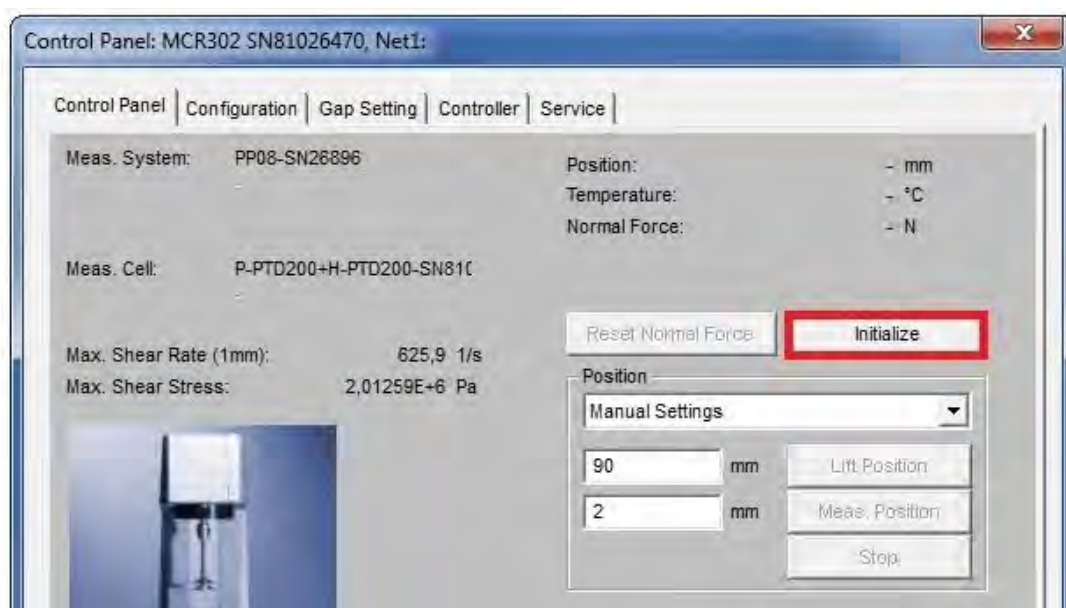


6.1.2. Configurazioni e pre-settaggi

In primo luogo, è necessario ispezionare la superficie del piatto inferiore, ed eventualmente pulire ogni residuo di materiale da lavorazioni precedenti, mediante stracci, panni di carta, tamponi di cotone, o altro materiale adatto allo scopo: possono essere impiegati solventi a base di agrume, oli minerali, toluene o simili. In seguito, è necessario rimuovere il coperchio in neoprene che protegge la parte superiore ed avvitare la cella Peltier nell'apposito alloggiamento. L'accensione dell'attrezzatura va effettuata solo dopo avere accertato preventivamente il corretto funzionamento dei circuiti d'aria compressa e di quello ad acqua, che deve risultare in pressione: il tasto ON è situato sul pannello laterale. Una volta premuto, è necessario attendere qualche minuto prima di eseguire qualsiasi operazione, per consentire all'apparecchiatura di compiere alcuni test iniziali interni: a controlli avvenuti il display frontale fornirà l'avviso di sistema pronto all'utilizzo. E' altresì importante verificare, dopo l'accensione, il corretto collegamento dello strumento al computer, testimoniato dall'accensione della spia verde "online" sita sul pannello frontale.

Una volta acceso il reometro è possibile aprire il software "RheoPlus": quindi, dal menu superiore a tendina, aprire "Device>Control Panel", e cliccare sul pulsante "Initialize". A questo punto l'apparecchiatura effettua dei movimenti automatici della parte meccanica in modo da predisporre l'appendice all'utilizzo.

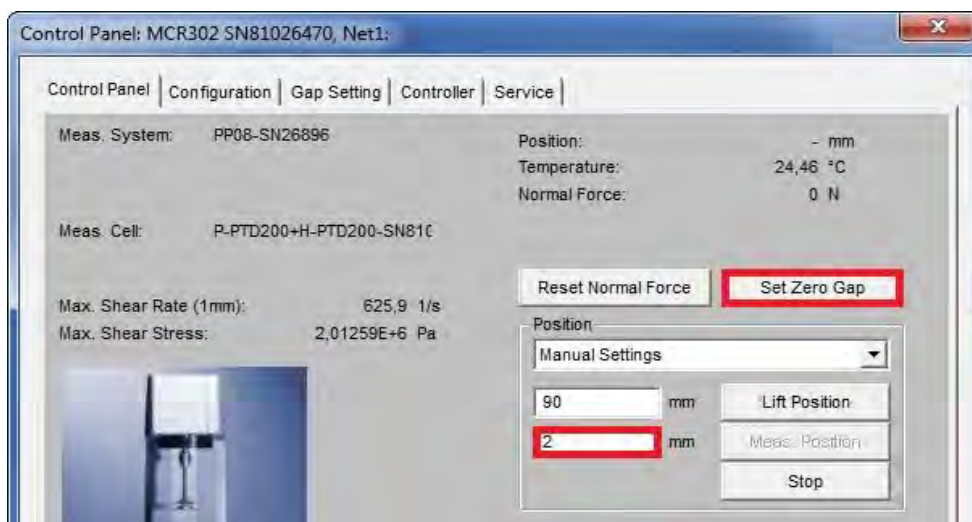
Figura 6.8. Procedura di inizializzazione



Una volta terminata la procedura di inizializzazione, se non fosse stato ancora eseguito, è possibile montare il dispositivo di aggancio della cella Peltier sulla filettatura posta sulla parte superiore del reometro: il montaggio deve essere effettuato con precisione, senza urtare la delicata appendice superiore. A questo punto è possibile montare la testa di carico nell'appendice; è una operazione delicata, che deve essere effettuata sollevando il dispositivo di blocco dell'appendice e allineando i segni di centratura della testa e della stessa appendice, senza forzare il dispositivo: una volta abbassato il dispositivo di blocco, il reometro procede al riconoscimento della testa di carico montata. Dopo qualche secondo di lettura, il display rileva la testa di carico e la sua dimensione: qualora il processo di rilevazione non andasse a buon fine sarà necessario rimuovere e reinserire la testa di carico.

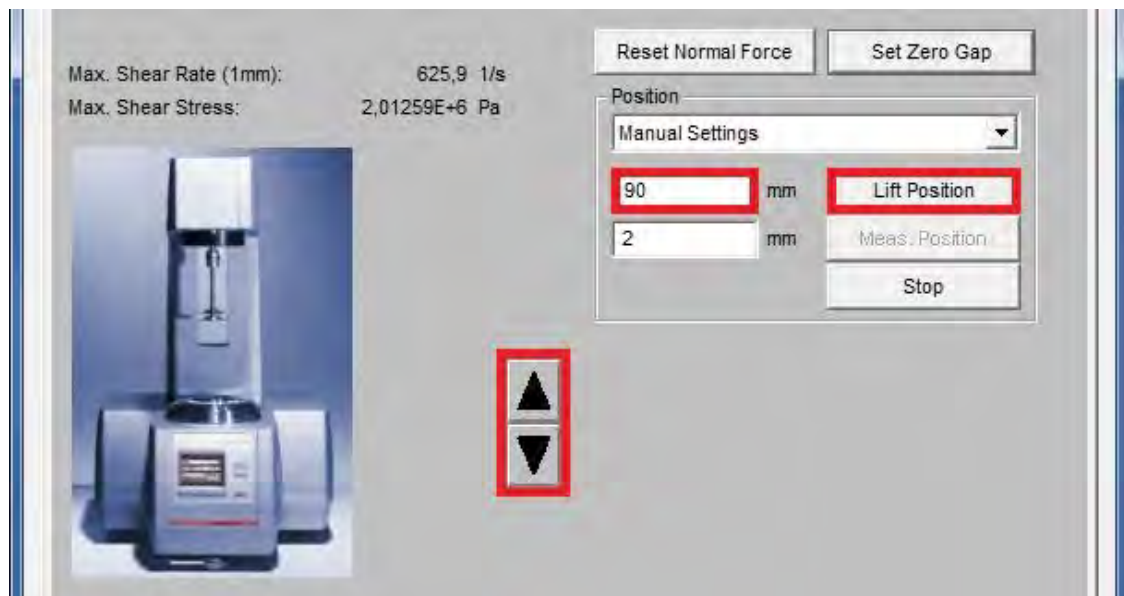
A questo punto, nuovamente dal pannello “*Device>Control Panel*”, è necessario cliccare sul pulsante “*Set Zero Gap*”: la testa di carico viene mossa verticalmente dalla posizione più alta, sino a toccare il piatto inferiore, in modo da calibrare esattamente la distanza verticale del suo bordo inferiore, e raggiungere approssimativamente la condizione di sforzo normale nullo. Si solleva poi in prossimità del valore specificato nel software, nella casella affianco al pulsante, che generalmente è da impostare a 1.00 o 2.00 mm (giustificati in seguito). Teoricamente, telaio, organi di rilevazione, e organi di fissaggio del reometro sarebbero soggetti a dilatazioni termiche durante i test, dovute al naturale aumento della temperatura; tale fenomeno provocherebbe la variazione del valore di zero gap appena settato. Tuttavia, la presenza di sistema a temperatura controllata con cella Peltier ad impianto ad aria compressa previene tale fenomeno, senza necessità di ricalibrizioni del valore di gap zero: la procedura deve comunque essere ripetuta ogni qual volta si sostituisce la testa di carico.

Figura 6.9. *Settaggio del “Zero Gap”*



Una volta calibrato il gap è possibile intervenire sull'altezza dell'appendice interagendo con le frecce poste nella medesima maschera, o in alternativa, impostando un determinato valore, in millimetri, nella casella "Lift Position" (l'operazione può rendersi necessaria per la rimozione o sostituzione della testa di carico o per il posizionamento dei campioni).

Figura 6.10. "Lift Position" – Regolazione verticale

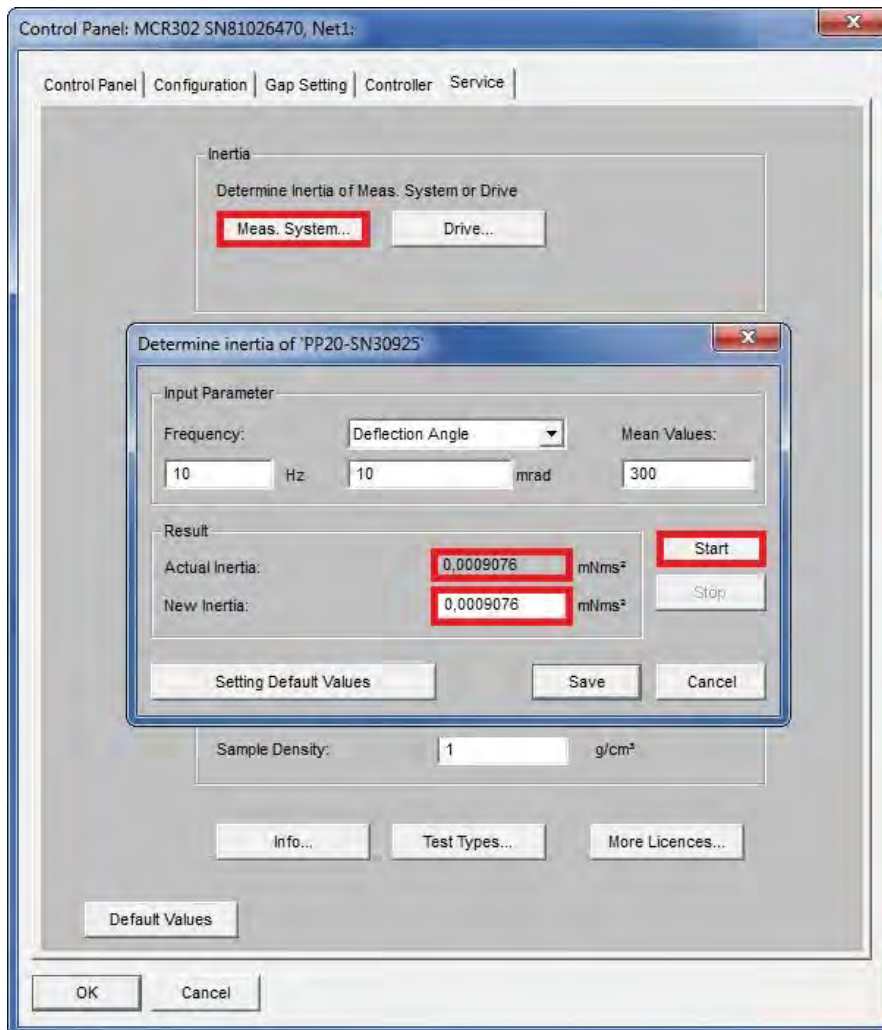


Le calibrature successive risultano essere le fasi più delicate, in quanto vanno a verificare il movimento dell'appendice che trasmette il moto alle teste di carico: per tale motivo, devono essere effettuate senza perturbare il sistema, evitando di urtare il piano di appoggio del reometro, o eccessivi sbalzi di corrente d'aria; è preferibile chiudere momentaneamente anche l'impianto ad aria compressa della cella Peltier, che potrebbe essere ulteriore fonte di perturbazione.

La prima calibratura da eseguire è denominata "Measuring System" e può essere selezionata dal percorso "Design>Control Panel>Service"; ha lo scopo di regolare la parte elettronica dell'apparecchiatura e di calibrare l'inerzia relativa alla torsione dell'appendice. Va eseguita generalmente con cadenza giornaliera, anche se di fatto risulta necessaria ogni qual volta si sostituisce una testa di carico; può essere effettuata solo in presenza di testa montata sullo strumento. I parametri da impostare vanno mantenuti da default: cliccando il tasto "Start" ha inizio il test; nella casella "Result" vengono visualizzati i valori di inerzia, espressi in mNms^2 , prima e dopo la configurazione. Il corretto svolgimento della procedura deve fornire risultato post-configurazione simile al valore espresso su "Actual Inertia" (con variazioni accettabili di 0.00001): qualora ciò non si verificasse è bene rieseguire la procedura. Al termine delle operazioni è

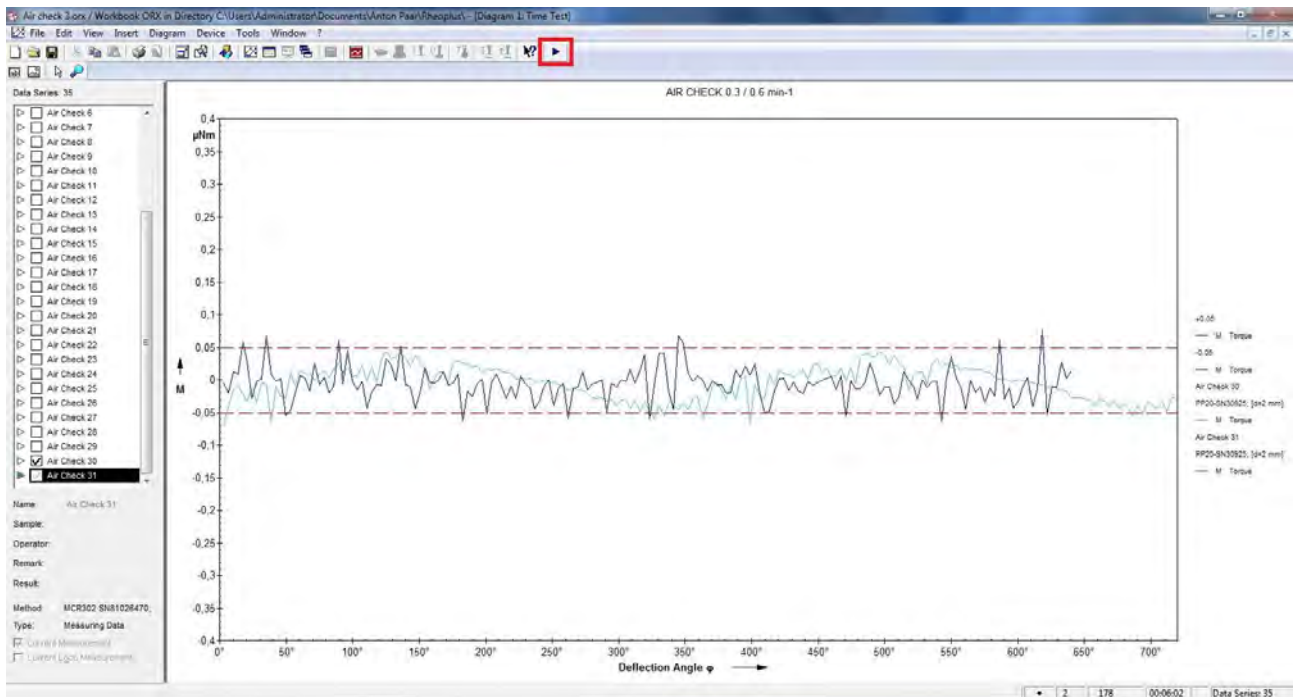
necessario cliccare sul tasto “Save” per memorizzare l’ultimo valore inerziale determinato.

Figura 6.11. Procedura “Measuring System”

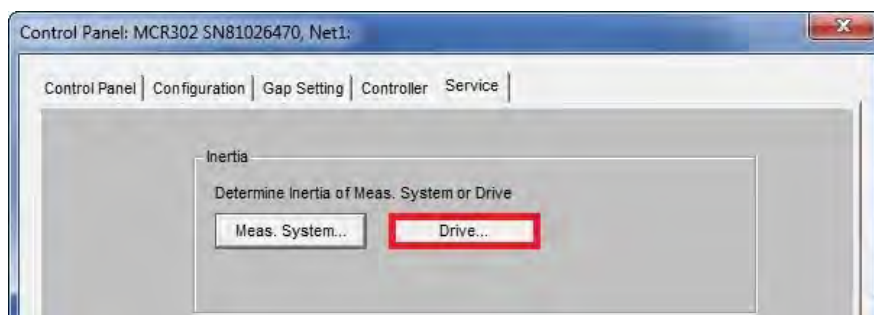


Un’ulteriore calibratura da eseguire, durante il primo utilizzo dello strumento, è denominata “*Motor Adjustment*”: dal pannello “*Design>Control Panel>Service*” è possibile cliccare sul pulsante dedicato. La successiva maschera va impostata con i parametri descritti nella successiva figura [selezionare in alto la corretta testa di carico, con dimensione e numero di serie – impostare il parametro “*Adjusting type*” su “*Long Adjust*”, con velocità di 0.6 1/min].

Tale procedura ha lo scopo di ricalibrare le costanti interne dello strumento, responsabili del funzionamento dell'appendice che trasmette le sollecitazioni: va eseguita di norma, ogni 90 giorni, e deve essere ripetuta per ogni testa di carico da utilizzare durante la sperimentazione. Di fatto, la procedura va a correggere eventuali anomalie che si possono verificare durante periodi di prova, o comunque di inattività, di circa 3 mesi. Il monitoraggio delle azioni compiute dal "*Motor Adjustment*" è demandato alla procedura "*Air Check*", che dà la possibilità di valutare il funzionamento dell'appendice, in termini di momento torcente. Va eseguita prima e dopo la procedura di "*Motor Adjustment*", e dà la possibilità di confrontare il momento torcente rilevato all'appendice, prima e dopo la procedura di correzione trimestrale: come illustrato nella figura successiva, i risultati sono plottati in forma grafica, nella quale è indicato anche un fuso limite (di colore rosso) entro cui i parametri sono considerati accettabili. Teoricamente, dopo un periodo sostanzialmente lungo di utilizzo o di inattività, il momento torcente rilevato mediante "*Air Check*", prima della procedura di "*Motor Adjustment*", dovrebbe risultare sostanzialmente al di fuori del fuso limite. Una volta eseguita la procedura di correzione, e rieseguita l'analisi "*Air Check*", l'andamento del momento torcente dovrebbe sostanzialmente rientrare nella zona delimitata dal fuso limite. La procedura di verifica "*Air Check*" può essere richiamata aprendo il file "*Aircheck3.orx*" presente nell'archivio del computer, e viene avviata semplicemente cliccando sul tasto "*Play*": come la procedura di "*Motor Adjustment*", deve necessariamente essere eseguita con una testa di carico montata sullo strumento. Per ottimizzare i risultati, la procedura di "*Motor Adjustment*" è bene sia eseguita impostando il gap a 1.00 mm, mediante l'apposito comando "*Lift Position*" sopra citato.

Figura 6.14. Procedura di verifica “Air Check” pre/post “Motor Adjustment”

L'ultima procedura preliminare è denominata “Drive”, ed è avviabile dal percorso “Design>Control Panel>Service”: va eseguita a cadenza giornaliera e consente di verificare la strumentazione senza alcuna testa di carico inserita. Come il “Motor Adjustment”, va preceduta e seguita dal controllo “Air Check”. Una volta eseguita la procedura “Drive” senza testa di carico, è quindi necessario rimontare la testa prima di effettuare il nuovo “Air Check”: è inoltre necessario rieseguire prima anche il settaggio dello “Zero Gap” e la calibrazione del “Measuring System”. Come per il “Measuring System” si andranno a controllare i valori inerziali nella casella “Result”.

Figura 6.15. Procedura “Drive”

Riepilogando, una volta avviato lo strumento, è possibile inizializzare l'apparecchiatura. Una volta terminata questa fase, è necessario effettuare le procedure preliminari. Di seguito, sono illustrate le sequenze ordinate delle procedure da eseguire, sia per il primo utilizzo, sia per l'utilizzo giornaliero del reometro (che teoricamente andrebbero rieseguite ad ogni cambio della testa di carico).

Tabella 6.2. *Sequenza procedure pre-test*

Procedure Primo Utilizzo		Procedure Giornaliere	
1	Montaggio testa	1	Montaggio testa
2	“Set Zero Gap”	2	“Set Zero Gap”
3	“Measuring System”	3	“Measuring System”
4	“Air Check”	4	“Air Check”
5	“Motor Adjustment”	5	Rimozione testa
6	“Air Check”	6	“Drive”
7	Rimozione testa	7	Montaggio testa
8	“Drive”	8	“Set Zero Gap”
9	Montaggio testa	9	“Measuring System”
10	“Set Zero Gap”	10	“Air Check”
11	“Measuring System”		
12	“Air Check”		

Le teste di carico che saranno utilizzate sono di 2 tipi. La scelta dipende dalla temperatura di test: in generale, la testa più piccola va utilizzata per basse temperature, mentre la testa più grande per le temperature più alte (in modo da considerare il comportamento viscoso del bitume e agevolare la sollecitazione dei campioni durante i test).

Tabella 6.3. *Teste di carico utilizzate*

Testa di carico da 8 mm		Testa di carico da 20 mm	
NOME:	PP08	NOME:	PP20
Φ DICHIARATO:	8.000 mm	Φ DICHIARATO:	20.000 mm
Φ REALE:	7.969 mm	Φ REALE:	19.981 mm
FORMA:	Piatto - Piatto	FORMA:	Piatto - Piatto
N° SERIALE:	26896	N° SERIALE:	30925
			
La testa di carico PP08 è piatta (PP)		La testa di carico PP20 è piatta (PP)	

6.1.3. Predisposizione dei campioni

Una volta eseguiti i pre-settaggi è possibile predisporre lo strumento per i test. Per agevolare le operazioni di posizionamento del provino è consigliabile operare con la testa di carico ad un gap di circa 90 mm, impostabile mediante il pulsante “*Lift Position*” descritto in precedenza. Il provino si presenta come una sorta di “pastiglia”, di diametro approssimativo pari a quello della testa di carico (la procedura per la costituzione dei provini è descritta nel capitolo successivo): è quindi importante la fase di centratura della “pastiglia” sul piatto. Per una centratura accurata, prima di sollevare a 90 mm la testa di carico, è consigliabile abbassarla fino ad un gap di qualche millimetro (sempre mediante apposito pulsante “*Lift Position*”), e segnare con un pennarello i bordi della testa di carico sul piatto inferiore, in modo da avere un riferimento preciso sulla corretta posizione da dare al campione. Il posizionamento del campione deve avvenire evitando eccessive manipolazioni del bitume, per non alterarne le caratteristiche: può essere consigliato l’ausilio di una spatola pulita (la manipolazione a mano può risultare anche difficile per il fatto che la temperatura corporea può già cambiare la consistenza del campione). Una volta posizionata e centrata la “pastiglia” si devono effettuare le procedura di “*Measuring Position*” e di “*Trimming*”.

La procedura di “*Measuring Position*” va effettuata cliccando sull’apposito pulsante “*Meas. Position*”, selezionabile dal solito percorso “*Design>Control Panel*”: in questa fase diventa fondamentale l’impostazione del gap nella casella a lato. Il valore va impostato a seconda della testa di carico.

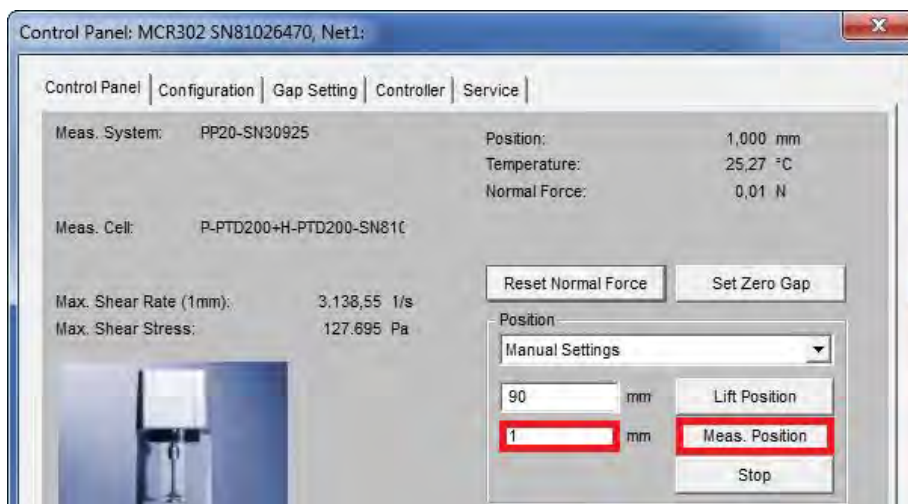
Tabella 6.4. *Teste di carico - gap suggeriti*

Testa di carico	Gap consigliato
PP08 – (8 mm)	2 mm
PP20 – (20 mm)	1 mm

Al clic del pulsante, la testa di carico si porta approssimativamente al valore specificato nella casella (precisamente a $1.000+0.025\text{mm}$, oppure a $2.000+0.025\text{mm}$): il campione è generalmente più spesso, per cui l’operazione di settaggio del gap può richiedere qualche minuto. I provini vanno posizionati alla temperatura ambiente, per cui la loro consistenza può opporsi tenacemente allo schiacciamento: durante l’abbassamento si può quindi sviluppare una significativa forza di compressione, che generalmente arriva a circa 40 N. E’ un valore alto, al limite della tolleranza

dello strumento, ma che di solito si mantiene per pochi istanti, e che non dà sostanziali problemi. Tuttavia, durante la fase di abbassamento è bene monitorare il valore di sforzo normale, e verificare che non si raggiungano valori troppo elevati (sopra i 60 - 70 N), e per periodi prolungati.

Figura 6.16. *Procedura “Measuring Position”*



Qualora l’abbassamento dovesse risultare eccessivamente difficoltoso a causa dell’elevata consistenza del campione, può rendersi utile riscaldare il piatto inferiore del reometro, così da rendere più fluido il materiale, e, conseguentemente, più facilmente comprimibile. L’interazione con la temperatura del piatto inferiore può avvenire dalla solita maschera, agendo sulla casella della temperatura e sui pulsanti “Set” e “Switch off”. Tale controllo viene solitamente utilizzato solo per operazioni preliminari, come quella appena descritta: le reali temperature di prova verranno impostate in fase successiva.

Figura 6.17. *Controllo della temperatura*



E’ importante monitorare, in questa fase, anche il valore di sforzo normale N raggiunto nella compressione del provino (visualizzato nel display frontale del reometro): in generale, la fase di impostazione del gap di prova è assai delicata, in quanto può influenzare direttamente i dati registrati durante i test. In particolare, quando si rende necessario il preriscaldamento del campione

per consentirne la compressione, è di fondamentale importanza, una volta raggiunta la posizione di prova, reimpostare la temperatura a quella di test, e attendere qualche minuto per consentire a tutto il materiale di stabilizzarsi termicamente, anche nelle porzioni più interne, non a contatto con il piatto inferiore. Prima di dare l'avvio alle fase successiva si deve comunque verificare che il valore di compressione sia prossimo agli 0 N: a gap raggiunto, sarà ancora presente uno sforzo normale residuo di compressione, che richiede qualche minuto per portarsi a zero (per la "stabilizzazione" della consistenza del materiale).

Una volta terminata la procedura di abbassamento, quando la testa di carico è esattamente nella posizione specificata, il software emette un avviso acustico con maschera, che testimonia l'avvenuta operazione e suggerisce l'inizio della procedura di "Trimming".

Figura 6.18. Avviso di "Trimming"

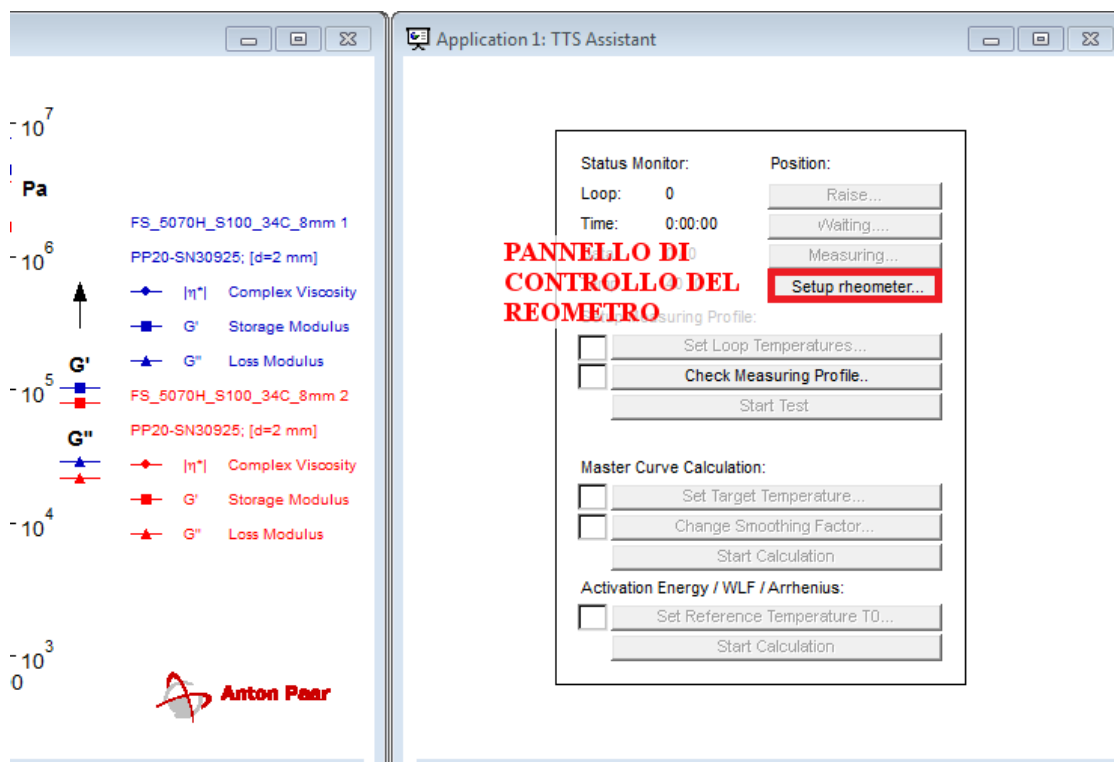


L'operazione di "Trimming" consiste nell'asporto del materiale in eccesso fuoriuscito lateralmente ai bordi della testa di carico, causato dallo schiacciamento della fase precedente, durante il quale si assiste al rilassamento del campione ai lati: si effettua mediante un apposito utensile, denominato "trimmer". E' essenzialmente costituito da una spatolina in acciaio con punta piatta, che va posta a contatto con il bordo della testa di carico: in più fasi, è necessario pulire i bordi della testa e rimuovere il materiale in eccesso: l'operazione deve essere eseguita prestando particolare attenzione, in modo da non graffiare il piatto di appoggio inferiore ed evitare di contaminare le parti più esterne del piatto. Le "pastiglie" si presenteranno in uno stato semi-solido: di conseguenza, la rimozione del materiale potrebbe non essere agevole: è quindi consigliabile riscaldare preventivamente l'utensile con una fiamma.

Una volta eseguita la procedura di "Trimming" è sufficiente calare la cella Peltier sul piatto inferiore: l'apparecchiatura è quindi pronta per la fase di test dei campioni.

Tutte le procedure di predisposizione dei campioni possono essere eseguite interagendo dal pannello al percorso “*Design>Control Panel*”: per comodità, una volta iniziati i test, è comunque possibile richiamare il medesimo pannello direttamente dal file della prova (vedi illustrazione).

Figura 6.19. *Maschera di prova - interazione col pannello di controllo del reometro*



Infine si precisa che, l'evoluzione dei test può portare allo sviluppo istantaneo di diversi scenari sul campione, che possono essere intensi come “*stati momentanei prova/campione*”: ad ogni rilevazione, il software visualizza in default un codice identificativo dello stato istantaneo in corrispondenza della colonna “*Status*”. A pagina seguente si riporta quindi, per completezza, la lista dei codici che identificano lo stato di prova, fornita dalla casa produttrice del reometro.

Tabella 6.5. *Lista “Status” istantanei di test*

Status / Description	
<i>F+</i> :	The pre-set frequency has been limited to the maximum value.
<i>F-</i> :	The pre-set frequency has been limited to the minimum value.
<i>M+</i> :	The pre-set torque has been limited to the maximum value.
<i>n+</i> :	The pre-set speed has been limited to the maximum value.
<i>Pe+</i> :	The maximum pre-set temperature of the Peltier element has been reached (Software).
<i>Pe-</i> :	The minimum pre-set temperature of the Peltier element has been reached (Software).
<i>Th+</i> :	The maximum pre-set temperature of the temperature controller has been reached (Software).
<i>Th-</i> :	The minimum pre-set temperature of the temperature controller has been reached (Software).
<i>Nf+</i> :	The pre-set normal force has been limited to the maximum value.
<i>Nf-</i> :	The pre-set normal force has been limited to the minimum value.
<i>Vma</i> :	The pre-set lift motor speed has been limited to the maximum value (MCR only).
<i>Gmi</i> :	The pre-set gap has been limited to the minimum value (MCR only).
<i>Gma</i> :	The pre-set gap has been limited to the maximum value (MCR only).
<i>DAC</i> :	The pre-set voltage output for M1 / M2 has been limited to the maximum or minimum value.
<i>WE+</i> :	The maximum electrical torque has been reached during the adjusting time.
<i>We-</i> :	The minimum electrical torque has been reached during the adjusting time.
<i>WTn</i> :	The adjustment has been stopped because the pre-set adjusting time has been reached.
<i>Wma</i> :	The adjustment has been stopped because the maximum adjusting time has been reached (automatic settings).
<i>Mea</i> :	The time settings for the calculation of the mean value could not be kept; the available time is not sufficient for the pre-set number of raw values.
<i>MD+</i> :	The maximum electrical torque has been reached during adjustment (DSO only).
<i>taD</i> :	Tand has been limited because the minimum or maximum possible value has been reached.
<i>DSO</i> :	"Direct strain" has been enabled during strain controlled oscillation (MCR / UDS with DSO option only).
<i>Dy xxx%</i> :	The dynamic for the speed controller has been set to xxx % during a rotational measurement.
<i>DyAuto</i> :	The adaptive controller (speed control) has been used.
<i>Sdy</i> :	Steady state has been reached for the measuring point (rotational measurements only).
<i>TGC</i> :	TruGap™ is enabled and has been used (instruments with TruGap™ option only).
<i>TR</i> :	The maximum electrical torque has been reduced due to the level of the motor temperature.
<i>CS_xxx</i> :	The dynamic for the stress controller has been set to xxx % during a rotational measurement.
<i>TM+</i> :	The set temperature exceeds the maximum allowed value and has been limited.
<i>TM-</i> :	The set temperature exceeds the minimum allowed value and has been limited.
<i>WA+</i> :	The maximum deflection angle has been reached during adjustment, the electric torque has been reduced. The set value cannot be reached and the adjustment has been aborted.

Capitolo 7

Il protocollo sperimentale

Di seguito viene illustrato in dettaglio il protocollo sperimentale, compresa la caratterizzazione dei materiali utilizzati, la costituzione dei campioni, e l'elenco dettagliato di tutte le prove svolte.


7.1. Materiali utilizzati in laboratorio

7.1.1. Legante bituminoso

Il protocollo ha previsto l'utilizzo di bitume classificato 50/70, confezionato di volta in volta con diverse modalità, per dare origine a campioni di bitume vergine, invecchiato, additivato, o miscelato con differenti tipologie di filler per formare mastici. Per ottenere l'effetto di *aging*, si sono sottoposti i bitumi vergini ed additivati a procedura di invecchiamento P.A.V.: per esigenze di laboratorio, i materiali sono stati sottoposti al procedimento, già descritto in precedenza, presso il laboratorio stradale dell'Università degli Studi delle Marche, di Ancona.

Preliminarmente l'inizio del protocollo sperimentale, si è effettuata la caratterizzazione dei bitumi e dei mastici in laboratorio, sviluppando test di penetrazione e rammollimento (*palla/anello*) secondo le normative europee di riferimento. Di seguito si riportano le specifiche tecniche del bitume vergine fornite dalla casa produttrice: l'elenco completo dei risultati della caratterizzazione viene riportato in seguito, dopo avere definito l'elenco dei campioni confezionati per il protocollo.

Tabella 7.1. Bitume: specifiche tecniche – ENI

			
Bitume Stradale 50/70			
Caratteristica	Unità di misura	Valore	Metodo
Penetrazione a 25°C	0.1 mm	50 ÷ 70	EN 1426
Punto di rammollimento Palla Anello	°C	46 ÷ 54	EN 1427
Punto di rottura Fraass	°C	≤ - 8	EN 12593
Densità relativa 25/25°C	---	1.00 ÷ 1.10	EN ISO 3838
Punto di infiammabilità	°C	≥ 250	EN ISO 2592
Solubilità in solventi organici	% m	≥ 99.0	EN 12592
Contenuto in paraffina	% m	≤ 2.2	EN 12606-1
Duttilità a 25°C	cm	≥ 80	ASTM D 113
<i>Resistenza all'invecchiamento RTFOT:</i>			EN 12607-1
- variazione in massa (valore assoluto)	% m	≤ 0.5	
- penetrazione residua a 25°C	%	≥ 50	EN 1426
- incremento del punto di rammoll.	°C	≤ 11	EN 1427
*** I valori dichiarati sono rilevabili su campioni omogenei prelevati in contraddittorio alla consegna, secondo quanto prescritto nella normativa EN 58 e preparati per le analisi secondo quanto indicato dalla normativa EN 12594.			

7.1.2. Additivo W.M.A.

La modifica dei bitumi 50/70 è stata effettuata mediante l'utilizzo dell'additivo Evotherm®, prodotto dalla multinazionale con sede americana M.W.V.. Secondo quanto riportato dalla casa produttrice, l'additivo può essere utilizzato per la modifica dei tradizionali conglomerati bituminosi a caldo, con evidenti benefici nelle temperature di stesura, (che possono essere dai 35 ai 50 °C più basse rispetto a quelle medie, che si aggirano tra i 140 e i 160 °C), mantenendo ottime caratteristiche di lavorabilità e compattabilità, senza che siano richiesti particolari interventi sull'impianto di produzione. Il sito ufficiale della ditta produttrice riporta la seguente presentazione:

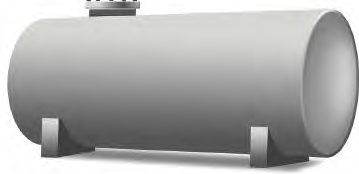


- “ Evotherm® is an innovative warm mix asphalt technology that includes additives to improve coating and workability, surfactants to enhance aggregate-binder adhesion, and agents to promote compaction. It is useful for producing warm mix asphalt based on all common formulation ingredients. Contractors can produce Evotherm® warm mix utilizing any mix plant and a wide variety of aggregates and recycled materials. Evotherm® has been used with a broad range of asphalt binders including binders modified with S.B.S., P.P.A., S.B.R., E.V.A., and ground tire rubber. ”
- “ Evotherm® è una tecnologia per lo sviluppo dell'innovativo confezionamento dei conglomerati warm mix, che include additivi che migliorano il rivestimento degli inerti e la lavorabilità, tensioattivi che favoriscono l'adesione bitume-aggregato, e agenti che promuovono la compattazione. E' utilizzabile per la produzione di conglomerati tiepidi costituiti con i componenti più comuni: le imprese possono produrre i conglomerati tiepidi con Evotherm® utilizzando qualsiasi impianto di miscelazione, con un'ampia scelta di aggregati e materiali riciclati. Evotherm® è stato impiegato con un larga varietà di leganti bituminosi, inclusi i bitumi modificati con polimeri S.B.S., P.P.A., S.B.R., E.V.A., e additivati con polveri di riciclo di pneumatico. ”

Per quanto riguarda le operazioni di confezionamento, all'impianto di miscelazione, si procede inizialmente a riscaldamento sino alle normali temperature di produzione: successivamente si inizia la graduale produzione del conglomerato tiepido, dapprima raffreddando l'impianto a temperature prossime ai +5.5 °C al di sopra di quelle previste come obiettivo per il conglomerato warm, e in seguito, con raffreddamento ulteriore fino al target. Si riportano alcuni dati forniti dai produttori.

Tabella 7.2. Dati - confronto bitume non modificato / modificato

Caratteristica	Bitume non modificato	Bitume modificato con polimeri
Dosaggio (peso % sul totale)	0.25 - 0.50	0.30 - 0.75
Range temperature di mix	> 220°F (>104°C)	> 235°F (>118°C)
Range compattazione iniziale	> 210°F (>99°C)	> 220°F (>104.4°C)
Range a fine compattazione/rullaggio	> 140°F (>60°C)	> 150°F (>66°C)

Tabella 7.3. Diverse metodologie di approvvigionamento

Al terminale	All'impianto	Soluzione intermedia
		
<p>Evotherm® può essere premiscelato da diversi produttori al terminale, e consegnato pronto per l'utilizzo</p>	<p>Evotherm® può essere spedito direttamente all'impianto, dove può essere stoccato in silos preesistenti</p>	<p>Evotherm® è disponibile anche in unità contenenti quantità intermedie, per essere inserite nella catena di produzione</p>

I processi di compattazione in situ del conglomerato tiepido sono identici a quelli tradizionali correntemente messi in opera nella costruzione stradale con conglomerati a caldo. Deve essere garantita, in situ, la presenza di un numero sufficiente di macchine rullanti, per assicurare la compattazione a velocità compatibili con l'avanzamento della stesura. Come per i conglomerati tradizionali, sono consigliate misurazioni sulle densità, per monitorare le percentuali di compattazione, durante le fasi di stesura e a lavoro ultimato, così da garantire un'adeguata durata delle operazioni di rullaggio fino all'ottenimento delle caratteristiche desiderate.

Si fa inoltre presente che esistono 2 diverse tipologie di Evotherm®:

- **Evotherm® 3G** può essere miscelato al bitume liquido al “terminale”, o aggiunto all'impianto di miscelazione, in entrambi i casi con sistemi di pompaggio semplici. Nel caso di trattamento all'impianto, si ha la possibilità di iniezione senza alcun requisito quantitativo, potendo così garantire produzioni anche giornaliere, quindi ampia flessibilità decisionale sulla programmazione dei lavori. Evotherm® 3G può essere utilizzato con qualsiasi tipo di impianto, e non provoca modificazioni sul grado P.G. (Performance Grade) tipico del bitume in utilizzo.
- **Evotherm® DAT** viene iniettato nell'asfalto liquido all'impianto mediante utilizzo di sistemi di dosaggio low-cost. E' compatibile con qualsiasi tipo di asfalto liquido, e come Evotherm® 3G, non provoca modificazioni sul grado P.G. (Performance Grade) tipico del bitume in utilizzo.

Di seguito, la scheda tecnica dei diversi prodotti.

Tabella 7.4. Specifiche tecniche da fornitore

Caratteristiche fisiche		
Evotherm J1 (3G)	Evotherm M1 (3G)	Evotherm H5 (DAT)
Viscosità per pompaggio e trasferimento alla linea		
40°F (4°C) = 8000 cP	40°F (4°C) = 4500 cP	40°F (4°C) = 600 cP
75°F (24°C) = 900 cP	75°F (24°C) = 700 cP	75°F (24°C) = 225 cP
100°F (38°C) = 350 cP	100°F (38°C) = 250 cP	100°F (38°C) = 125 cP
140°F (60°C) = 100cP	140°F (60°C) = 75 cP	140°F (60°C) = 90 cP
Conduttività a 77°F (25°C)		
4.3_MS/cm	2.2_MS/cm	6700_MS/cm
Gravità specifica a 77°F (25°C)		
SPG = 0.99	SPG = 0.97	SPG = 1.05

La ditta produttrice riporta anche i dati relativi alle esperienze maturate nell'utilizzo di Evotherm® con i R.A.P. (Recycled Asphalt Pavement).

- “ ... With Evotherm®, more reclaimed asphalt pavement content can successfully be repurposed as new roadways than with traditional hot mix asphalt. Evotherm lowers the needed production temperature of high-RAP content mixes, reducing fuel costs and lowering environmental emissions. Reclaimed asphalt usage lowers overall paving cost by reducing the amount of virgin asphalt and aggregate needed. Evotherm® can increase the percentage of RAP that can be used in mix designs by improving performance and workability. ”
- “ ... Con Evotherm®, può essere riproposto con successo un quantitativo superiore di contenuto riciclato per la costruzione di nuove strade, in confronto alla tecnica dei conglomerati a caldo. Abbassa la temperatura necessaria delle miscele ad alto contenuto di materiale riutilizzato, riducendo i costi relativi ai carburanti e le emissioni ambientali. L'utilizzo di conglomerati a base di riciclati riduce i costi per via della minore necessità di impiego di leganti e aggregati vergini. Evotherm® può aumentare le percentuali di R.A.P. che possono essere utilizzate nei mix-design, migliorando la lavorabilità e le performance. ”

Sono disponibili anche alcuni dati relativi a test di laboratorio eseguiti confrontando conglomerati R.A.P. con e senza Evotherm®: l'incremento della quantità di R.A.P. si è indagato secondo protocollo Superpave, utilizzando bitumi con P.G. 70-22 e filler calcarei, con conglomerati a caldo R.A.P. al 20%, e conglomerati warm R.A.P. al 35%, i quali hanno garantito le stesse proprietà dei mix tradizionali. Di seguito i dati desunti dalla sperimentazione.

Tabella 7.5. *Confronto R.A.P. tradizionali / warm*

Proprietà Bitume	Evotherm® 35% R.A.P.	H.M.A. 20% R.A.P.
Penetrazione	28	29
Viscosità	23 500	25 900
Duttilità	42	38
D.S.R. @ 64°C	7.56	7.35
M.S.C.R.	32	26
D.S.R. @ 70°C	3.59	3.48

7.1.3. I Filler

Il protocollo ha previsto l'utilizzo di due diverse tipologie di filler: il primo di tipo calcareo, comunemente utilizzato nelle sovrastrutture stradali, e il secondo costituito da scoria siderurgica, derivante da lavorazioni dell'acciaio con forno ad arco elettrico.

I filler sono stati selezionati in laboratorio mediante vagliatura al setaccio 0.063 mm, in quantità sufficienti agli scopi di laboratorio. La miscelazione con i bitumi è avvenuta, per i diversi inerti, mantenendo costante il rapporto in massa inerte/legante. Di fatto, il filler calcareo è stato miscelato con rapporto in peso 1 a 1 con il bitume: il filler di scoria, invece, caratterizzato da un maggiore peso specifico, è stato aggiunto con il rapporto legante/inerte in peso di 1 : 1.41. I valori sono stati calcolati, mediante i pesi specifici, al fine di mantenere costante un rapporto volumetrico bitume/filler di 2.75:1.

Figura 7.1. *Porzione di filler calcareo – 40 g*

Figura 7.2. *Porzione di filler di scoria E.A.F. – 40 g*



Di seguito si propone la caratterizzazione dettagliata degli inerti impiegati: le prove si sono eseguite in accordo con le prescrizioni normative UNI EN / A.S.T.M. di riferimento, e sono state sviluppate presso il dipartimento DICEA dell'Università degli Studi di Padova e in collaborazione con il laboratorio stradale dell'Università degli Studi delle Marche di Ancona.

7.1.3.1. Particle Grading

Si è deciso di indagare preliminarmente la granulometria della frazione fine effettuando la prova con il metodo del densimetro, normalizzata secondo A.S.T.M. D-1298. Il test è applicabile a frazioni di dimensioni inferiori a 0.075 mm: di conseguenza i filler, setacciati al vaglio 0.063 mm, rientrano nel campo di applicabilità del metodo. La grandezza e la distribuzione delle particelle vengono determinate indirettamente misurando il tempo di sedimentazione dei filler dispersi in un bagno d'acqua. In generale, il diametro del singolo grano viene determinato mediante la legge di Stokes, mutuata dal campo delle terre. La prova si esegue con il materiale che viene preliminarmente emulsionato mediante un dispositivo di dispersione automatico, dotato di un secchiello e di un'elica mescolante, nel quale si introducono (40 ± 1) g di filler e 125 g di soluzione emulsionante: il mescolamento deve durare 10 minuti, in modo da garantire la dispersione dei singoli grani nel bagno. Una volta ottenuta l'emulsione, tutto il contenuto del secchiello va travasato all'interno di un cilindro trasparente, di diametro pari a circa 70 mm e altezza pari a circa 330 mm, avendo cura di sciacquare tutti gli eventuali residui di materiale dal secchiello; il cilindro va riempito con acqua denaturata fino a raggiungere il volume di 1000 cm^3 . Si inserisce poi il tappo del cilindro e si capovolge il tutto per circa 30 secondi, in modo da uniformare la dispersione della

miscela. Dal momento in cui si appoggia il cilindro si fa partire un contasecondi, che fornirà i tempi di lettura a cui rilevare i valori di densità: l'operazione avviene inserendo nella dispersione un densimetro galleggiante, con bulbo e capillare graduato. Ogni lettura di densità sarà proporzionale alla quantità di grani ancora dispersi nel bagno d'acqua, a meno di quelli sedimentati. I tempi di rilevazione indicati sono a 30 secondi, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minuti e a 1, 2, 4, 8 ore, e così via, fino alla completa sedimentazione del materiale. La prova va effettuata cercando di garantire temperatura uniforme; la temperatura di test va rilevata nel bagno all'interno del cilindro, e sarà un ulteriore parametro da considerare ad ogni rilevazione di densità. Le letture vanno eseguite considerando il culmine del menisco che l'acqua crea sul capillare graduato. Si descrive di seguito la procedura di calcolo per identificare distribuzioni e dimensioni dei grani:

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot \eta_L}{\gamma_S - \gamma_L}} \cdot \sqrt{\frac{H_R}{\delta t \cdot 60}} \quad (7.1)$$

$$\eta_L = \frac{1.81 \cdot 10^{-5}}{1 + 0.034 T + 0.00022 T^2} \quad (7.2)$$

dove: D : diametro della sfera;
 η_L : viscosità dinamica del liquido [g·s/cm²];
 γ_S : peso specifico del grano [g/cm³];
 γ_L : densità del liquido [g/cm³];
 R : lettura di densità;
 R' : lettura di densità corretta, considerando il menisco;
 H_R : percorso di sedimentazione delle particelle, funzione della lettura R' [cm];
 δt : tempo misurato a partire dall'inizio prova corrispondente alla lettura H_R [min];
 T : temperatura relativa all'istante di misura della densità [°C];

Per la correzione della lettura secondo l'andamento del menisco e la correzione della temperatura di prova si rimanda alla normativa. La percentuale di terreno avente diametro inferiore al valore D rappresenta la percentuale di passanti all'ideale setaccio di apertura pari al diametro D calcolato e si determina come:

$$\% = (R + C_M + C_D + C_T) \cdot \frac{100}{P_S} \cdot \frac{\gamma_S}{\gamma_S - \gamma_L} \quad (7.3)$$

dove: P_s : peso secco del filler [(40 1)g];
 C_M : correzione del menisco;
 C_D : correzione del dispersivo;
 C_T : correzione della temperatura;

Di seguito si illustrano dimensioni e distribuzioni (%) ottenute per i due diversi filler analizzati.

Tabella 7.6. Risultati particle grading – Filler calcareo

ANALISI CON AEROMETRO								Peso lordo	g.	90,4
								Peso tara	g.	50
								Peso netto	g.	40,4
Data	T°	Ora	dt (")	R	Hr	d(mm)	X%	Aerometro	n.	1
25/09/2015	25,5	10,34	10	24,5	11,32	0,10320	99,78	Cilindro	n.	6
	25,5		20	24,0	11,44	0,07336	97,83	Dispersivo	cc	20
	25,5		30	23,5	11,56	0,06021	95,89	T.di agitaz.	(')	10
	25,5		60	23,0	11,68	0,04280	93,94			
	25,5		120	22,0	11,92	0,03057	90,04	Gs		2,74
	25,5		240	20,0	12,40	0,02205	82,24	k		3,8978
	25,5		480	18,5	12,76	0,01582	76,40			
	25,5		900	17,0	13,12	0,01171	70,55	< 200		100
	25,5		1800	14,5	13,72	0,00847	60,81			
	25,5		3600	10,5	14,68	0,00619	45,21	m		
	25,5		7200	8,0	15,28	0,00447	35,47			
	25,5		14400	5,0	16,00	0,00323	23,78	x		0,097
	25,5		28800	2,5	16,60	0,00233	14,03			
			86400							
			172800							
			259200							
			345600							

Tabella 7.7. Risultati particle grading – Filler scoria E.A.F.

ANALISI CON AEROMETRO								Peso lordo	g.	91,7
								Peso tara	g.	50
								Peso netto	g.	41,7
Data	T°	Ora	dt (")	R	Hr	d(mm)	X%	Aerometro	n.	1
16/09/2015	27	10,03	10	22,0	11,92	0,10263	75,74	Cilindro	n.	6
	27		20	20,0	12,40	0,07402	69,26	Dispersivo	cc	20
	27		30	16,5	13,24	0,06245	57,93	T.di agitaz.	(')	10
	27		60	11,0	14,56	0,04631	40,13			
	27		120	4,0	16,24	0,03458	17,48	Gs		3,86
	27		240	1,0	16,96	0,02499	7,77	k		3,2366
			480							
			900					< 200		100
			1800							
			3600					m		
			7200							
			14400					x		0,094
			28800							
			86400							
			172800							
			259200							
			345600							

Grafico 7.1. Assortimento granulometrico porzione fine – Filler calcareo

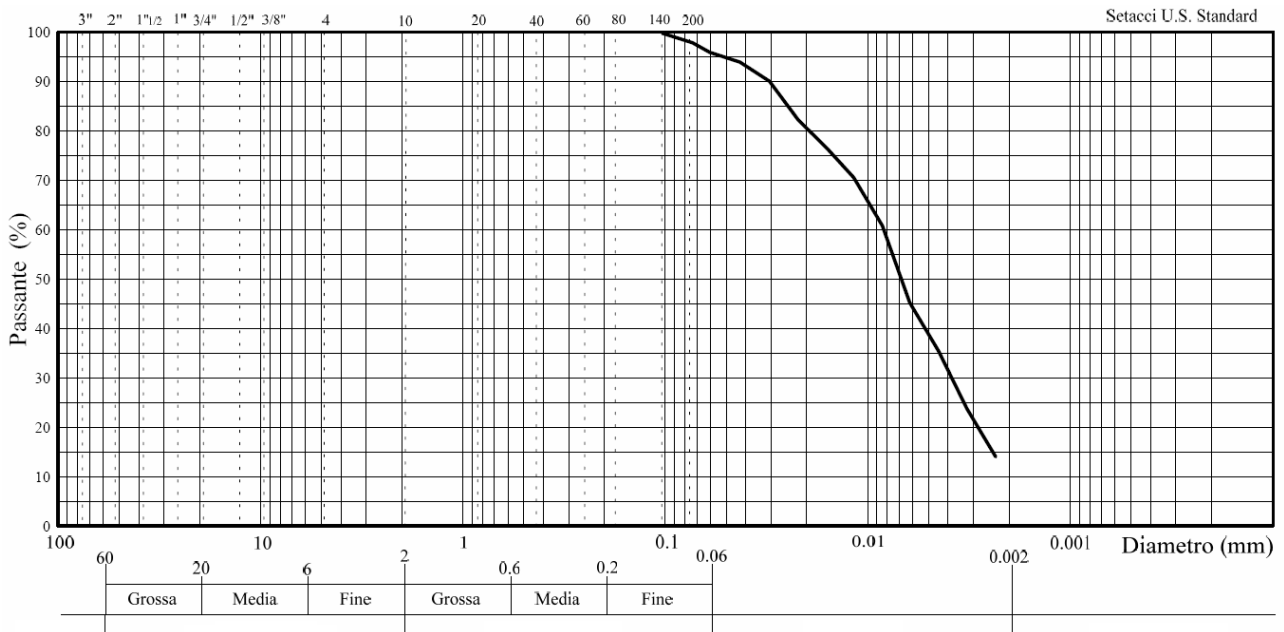
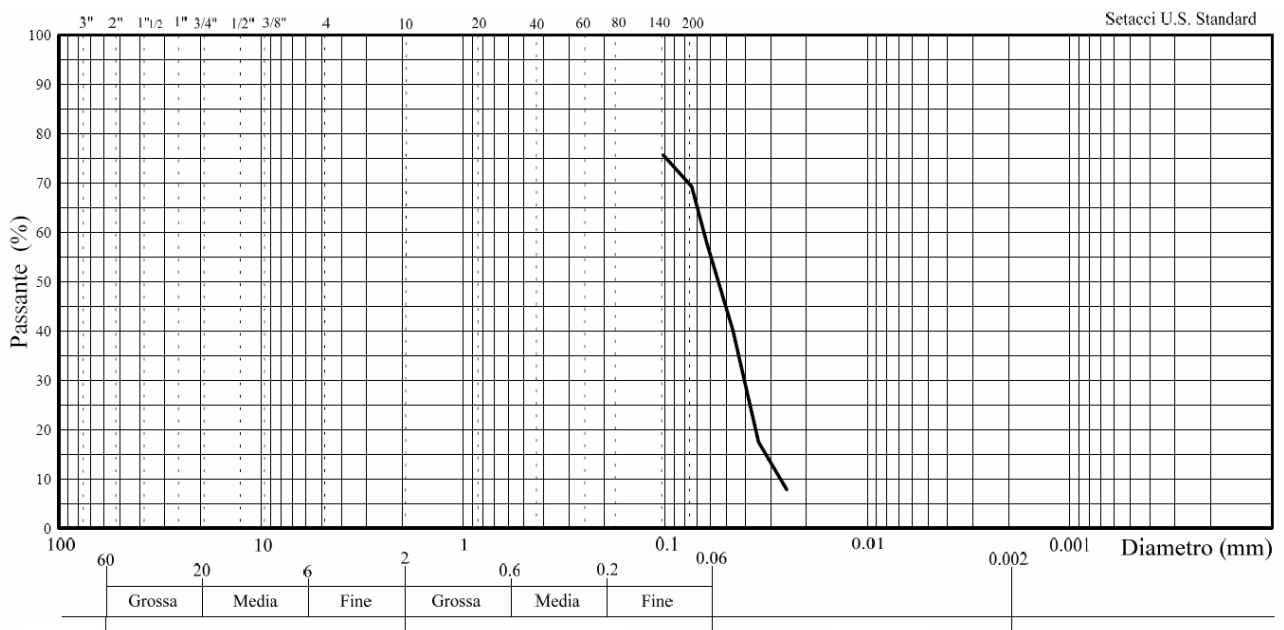


Grafico 7.2. Assortimento granulometrico porzione fine – Filler scoria E.A.F.



Analizzando le 2 curve granulometriche si notano marcate differenze tra i 2 filler: il calcare fornisce una distribuzione della porzione fine alquanto varia, con dimensioni tra i 0.10 e i 0.02 mm: la scoria E.A.F. possiede invece distribuzione granulometrica meno assortita, con grani più grossi. Il dato può essere importante per la valutazioni degli effetti degli inerti sulle miscele.

7.1.3.2. Particle Density

La normativa E.N. 1097-7 regola la determinazione della massa volumica del filler mediante “metodo con picnometro”: generalmente si utilizzano tre provini separati, un picnometro tarato e un liquido di massa volumica nota (il liquido deve risultare idoneo, evitando la dissoluzione o la reazione con il filler; si utilizza acqua denaturata o alcol etilico). Dopo avere costituito la porzione di prova, di massa minima di 50 g, si procede all’essiccazione del materiale a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, fino a massa costante, e a raffreddamento per almeno 90 min. Si procede quindi, per ognuna delle tre determinazioni, pesando il picnometro pulito e asciutto, con tappo (m_0), e il picnometro riempito con (10 ± 1) g di filler (m_1). Si aggiunge poi una quantità di liquido sufficiente ad immergere completamente il provino, si mette il tappo al picnometro e lo si pone nell’essiccatore a vuoto per almeno 30 minuti, evacuandolo mediante pompa a vuoto in circa 5 minuti, sino a valori di pressione inferiori ai 3.0 kPa. Dopo aver ripristinato la pressione d’aria nell’essiccatore, si estrae il picnometro e lo si riempie di liquido: di seguito si pone, senza tappo, in un bagno d’acqua a $(25.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, in modo che la sommità fuoriesca di circa 3 mm dal livello dell’acqua del bagno. Dopo 60 minuti, si rimette il tappo, facendo risalire, per capillarità, una certa quantità d’acqua: si asciuga quindi la sommità della capillarità e si rimuove il picnometro dal bagno, raffreddandolo tempestivamente per evitare che il liquido si espanda lungo la capillarità: una volta asciugatolo anche all’esterno si può procedere alla pesatura del picnometro contenente liquido e provino (m_2). La massa volumica del filler, espressa in megagrammi per metro cubo, può essere determinata come:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_1}} \quad (7.4)$$

dove:

- m_0 : massa del picnometro vuoto, con tappo [g];
- m_1 : massa del picnometro con la porzione di prova del filler [g];
- m_2 : massa del picnometro con filler e liquido [g]
- V : volume del picnometro [ml]
- ρ_1 : massa volumica del liquido a 25°C [g/cm^3]
- ρ_f : massa volumica del filler a 25°C [g/cm^3]

Il valore più accurato è fornito dalla media dei tre valori risultanti dagli altrettanti campioni.; i risultati della prova forniscono:

- $\rho_f(\text{Calcare}) : 2.74 \text{ g/cm}^3$
- $\rho_f(\text{Scoria}) : 3.86 \text{ g/cm}^3$

Il rapporto fornisce il valore di 1.41, che è il coefficiente da considerare per il corretto dosaggio della scoria con il bitume.

7.1.3.3. *Rigden Void*

La norma E.N. 1097-4 specifica il procedimento per determinare la porosità intergranulare del filler secco compattato per mezzo dell'apparecchio Rigden: si effettua su un campione ridotto a porzioni di prova di massa minima pari a 150.0 g, essiccati in forno a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ e lasciati raffreddare per almeno 90 minuti. L'apparecchiatura di compattazione è costituita da un sistema cilindro-pistone, con larghezza interna pari a $(65 \pm 5)\text{mm}$ e gioco consentito di $(0.20 \pm 0.05)\text{mm}$: il pistone, di massa $(350 \pm 1)\text{g}$, viene dapprima inserito nel cilindro vuoto, assieme a una carta da filtro, al fine di tarare lo zero dello strumento sul calibro presente

La massa m_0 viene registrata in presenza del solo elemento mobile di attacco del pistone e del disco di carta da filtro inserito all'interno del cilindro. E' quindi possibile inserire il filler all'interno del cilindro, in massa pari a $(10 \pm 1) \text{ g}$: in seguito si inserisce delicatamente il pistone nel cilindro, avendo cura che non si verifichino risalite laterali del filler stesso. La compattazione avviene alzando lungo le guide laterali l'elemento mobile che sorregge il cilindro e il pistone, fino all'arresto superiore, e lasciandolo cadere liberamente sulla base: la procedura deve essere ripetuta per 100 volte, ad intervalli di circa 1 s. Dopo i 100 urti, si può rilevare, allo 0.01 mm più prossimo, l'altezza (h) del filler compattato, appoggiando il calibro di profondità sulle colonne di guida: si può quindi andare a determinare la massa del cilindro con filler e carta da filtro (m_1) (con accuratezza di 0.01 g) e la massa del filler compattato m_2 (come differenza tra m_1 e m_0 iniziale).

Figura 7.3. *Apparecchiatura Rigden*

La porosità intergranulare si calcola, a partire dai diversi valori di m_2 e h , con accuratezza dello 0.1%, come:

$$v = \left(1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_f \cdot h}\right) \cdot 100 \quad (7.5)$$

dove:

- v : porosità intergranulare [%];
- m_2 : massa del filler compattato [g];
- ρ_f : massa volumica del filler [g/cm³]
- α : diametro interno del cilindro mobile [mm]
- h : altezza del filler compattato [mm]

In generale, la prova va ripetuta 3 volte, ripulendo di volta in volta l'attrezzatura e inserendo nuovo materiale: il valore di porosità più attendibile sarà quello medio tra i 3 risultati. Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

Tabella 7.8. Void rigden – Determinazione della porosità intergranulare (E.N. 1097-4)

Filler calcareo					Filler scoria E.A.F.				
		Prova 1	Prova 2	Prova 3			Prova 1	Prova 2	Prova 3
m_0	[g]	3089.4	3089.4	3089.4	m_0	[g]	3089.4	3089	3089.4
m_1	[g]	3099.6	3099.5	3099.9	m_1	[g]	3099.6	3104.5	3099.7
m_{filler}	[g]	10.2	10.1	10.5	m_{filler}	[g]	10.2	15.5	10.3
m_2	[g]	3096.5	3096.6	3097.4	m_2	[g]	3098.8	3102.5	3098.8
m_{finale}	[g]	7.1	7.2	8,0	m_{finale}	[g]	9.4	13.5	9.4
α	[mm]	25.22	25.22	25.22	α	[mm]	25.22	25.22	25.22
ρ_f	[g/cm ³]	2.74	2.74	2.74	ρ_f	[g/cm ³]	3.86	3.86	3.86
h	[mm]	7.8	8.1	8.3	h	[mm]	12,0	17,0	12.3

v	[%]	33.5%	35.1%	29.6%	v	[%]	59.4%	58.8%	60.4%
---	-----	-------	-------	-------	---	-----	-------	-------	-------

v (L100)	32.7%	v (S100)	59.5%
----------	-------	----------	-------

La scoria fornisce una porosità intergranulare piuttosto alta, doppia rispetto a quella rilevata nel filler calcareo. Il dato ci consente di stabilire che, a differenza di quanto si verifica per l'inerte calcareo, la scoria presenta distribuzione monogranulare: ciò sta ad indicare che l'assortimento granulometrico della parte fina non è molto ampio, e che le singole particelle possiedono dimensioni molto simili. I dati confermano peraltro quanto riscontrato nella costituzione delle curve granulometriche.

7.1.3.4. Delta Ring and Ball

La normativa di riferimento è la UNI EN 13179-1: il protocollo espone la metodologia di miscelazione con riscaldamento per la costituzione dei mastici, aggiungendo il filler al legante bituminoso: la determinazione del “delta” consiste nel calcolare il gradiente delle temperature di rammollimento, eseguite secondo normativa di riferimento, tra i mastici e il bitume originale: di fatto, i dati sono già stati esposti precedentemente nell’analisi dei punti di rammollimento di tutti i campioni soggetti al protocollo sperimentale.

7.2. Confezionamento dei provini

Il reometro D.S.R. richiede la costituzione di campioni di dimensioni variabili, a seconda delle teste di carico che si andranno ad utilizzare nei test: come già illustrato in precedenza si utilizzerà la testa PP08, da 8 mm, con configurazione del gap a 2 mm, e la testa PP20, con configurazione del gap a 1 mm. Nasce quindi l’esigenza di costituire piccoli campioni a forma di “pastiglia”, con dimensioni di 8 e 20 mm, con altezza prossima ai 2 mm (non è fondamentale ottenere misure esatte, dato che si andrà sempre a effettuare la procedura di “trimming”).

Si è quindi deciso di costituire le “pastiglie” mediante colatura in stampi siliconici, aventi approssimativamente le misure indicate. I diversi tipi di bitume sono stati scaldati a temperature prossime ai 140°C per ottenere una consistenza adeguata alle operazioni di versaggio: il processo di “aging”, per i campioni invecchiati, è stato eseguito mediante procedura P.A.V. Nei casi dei mastici, l’aggiunta dei filler è stata effettuata dopo il riscaldamento. Lo sviluppo dei test è durato circa tre mesi; al fine di non alterare le caratteristiche dei materiali, le serie di campioni sono state confezionate in più occasioni, compatibilmente con i tempi di prova: si è quindi reso necessario riscaldare una volta i bitumi e dividerli in piccoli contenitori, in modo da potere confezionare serie di campioni in momenti diversi, senza dovere riscaldare ogni volta lo stesso bitume (e penalizzare le serie sviluppate nell’ultima parte della sperimentazione).

La creazione degli stampi siliconici è avvenuta mediante l’utilizzo di siliconi RHODORSIL® RTV 3527 A e RHODORSIL® RTV 3527 B, che, mixati a temperatura ambiente in dosi corrette, danno vita ad un silicone bi-componente elastomerico, capace di indurire grazie ad una reazione di poliaddizione.

Tabella 7.9. Scheda tecnica RHODORSIL® RTV 3527 A e B

Characteristic	RHODORSIL® RTV 3527 A	RHODORSIL® RTV 3527 B
Appearance	Viscous liquid	Viscous liquid
Colour	Whitish	Whitish
Density (at 23°C, g/cm ³)	1.20	1.20
Viscosity (at 23°C, mPa s)	7.000	7.000
Mixing	100 parts	100 parts
RHODORSIL® RTV 3527 A e B		
Pot Life (at 23°C, min. approx.)		25
Time after which article can be handled (at 23°C, hours)		1
Shore hardness(approx. after 96h/4days)		28
Tensile strength at brake (MPa)		5
Elongation at brake (%)		400
Tear strength (KN/m)		15
Linear shrinkage		0.1

Figura 7.4. RHODORSIL® RTV 3527 A - RHODORSIL® RTV 3527 B



I siliconi sono stati miscelati con proporzioni 1:1 in massa a temperatura ambiente, e si sono versati in stampi di alluminio appositamente fabbricati, fino a coprire interamente la superficie disponibile: la solidificazione completa è avvenuta in circa 24 ore, dopo le quali è stato necessario attendere un'ulteriore giornata perché ne fosse possibile l'utilizzo.

Figura 7.5. *Forme alluminio per creazione stampi siliconici*

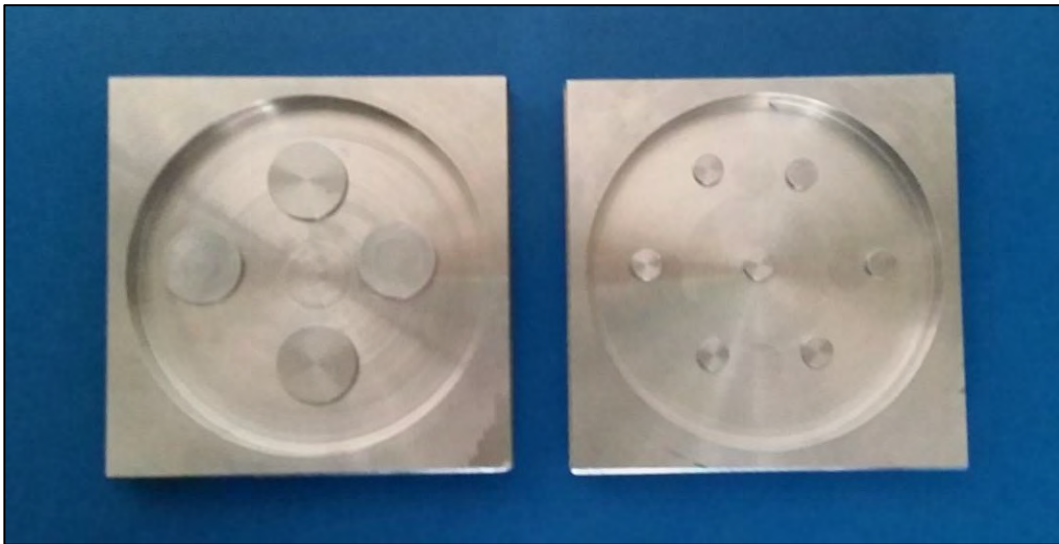
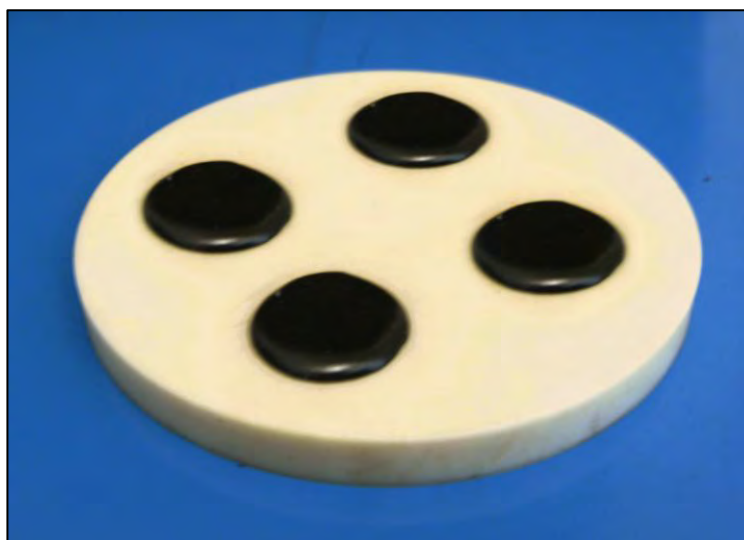


Figura 7.6. *Stampi siliconici a solidificazione avvenuta*



Una volta versate le “pastiglie” negli stampi siliconici, si sono attese circa 24 ore prima dei test, in modo da garantire raffreddamento e indurimento omogeni.

Figura 7.7. *Stampo siliconico - confezionamento campioni*

7.3. Programma sperimentale

Il programma sperimentale prevede 3 diversi test, eseguiti su diverse combinazioni dei materiali sin qui descritti. Di seguito si riporta l'elenco di tutte le prove eseguite

Tabella 7.10. *Legenda nomenclatura campioni e prove*

50/70:	Tipologia bitume	H:	Hot: a caldo	L100:	Additivazione con filler calcareo (limestone) al 100% in volume	8/20mm:	Testa di carico
PAV:	Bitume invecchiato secondo procedura P.A.V.	W:	Warm: tiepido	S100:	Additivazione con filler scoria (steel-slag) al 100% in volume	G1/G2:	Gap di test
AS:	Amplitude Sweep	FS:	Frequency sweep	MSCR:	Deformazione permanente		
50/70H_PAV_20mm_G1:							
Esempio: bitume 50/70 tradizionale, sottoposto a invecchiamento P.A.V., testato con testa da 20 mm e gap a 1 mm							
50/70W_S100_8mm_G2:							
Esempio: mastice 50/70 con additivo warm Evotherm®, additivato con scoria steel-slag al 100% in volume, testato con testa da 8 mm e gap impostato a 2 mm							

Tabella 7.11. Elenco test svolti in laboratorio

Prova	AS	FS									MSCR			
Testa Gap Temperatura	20mm G1 34°C	8mm G2				20mm G1					20mm G1			
		16°C	22°C	28°C	34°C	34°C	40°C	46°C	52°C	58°C	58°C	64°C	70°C	76°C
50/70H	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70H_L100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70H_S100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70H_PAV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70H_PAV_L100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70H_PAV_S100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W_L100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W_S100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W_PAV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W_PAV_L100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50/70W_PAV_S100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

7.3.1. Caratterizzazione dei bitumi e dei mastici

Dopo avere definito i campioni oggetto di studio, si riportano di seguito i risultati della caratterizzazione effettuata sui bitumi e sui mastici.

Tabella 7.12. Caratterizzazione bitumi e mastici: penetrazione (EN 1426)

Sample	PEN 1	PEN 2	PEN 3	PEN 4	PEN 5	Penetrazione Media [decimillimetri]
50/70H	39	39	43	38	41	40.0
50/70H_L100	37	38	36	35	29	35.0
50/70H_S100	25	26	26	27	23	25.4
50/70H_PAV	11	16	14	15	18	14.8
50/70H_PAV_L100	13	13	16	12	14	13.6
50/70H_PAV_S100	15	11	9	14	12	12.2
50/70W	37	33	40	38	39	37.4
50/70W_L100	32	33	37	32	35	33.8
50/70W_S100	23	26	25	27	28	25.8
50/70W_PAV	11	12	15	15	12	13.0
50/70W_PAV_L100	12	11	17	15	9	12.8
50/70W_PAV_S100	11	9	8	11	14	10.6

Tabella 7.13. *Caratterizzazione bitumi e mastici: rammollimento (EN 1427)*

Sample	P.A. 1	P.A. 2 [°C]	P.A. 3	P.A. Media [°C]
50/70H	52.2	52.7	52.9	52.6
50/70H_L100	57.8	58.2	59.3	58.4
50/70H_S100	73.6	75.2	75.3	74.7
50/70H_PAV	80.4	80.8	81.8	81.0
50/70H_PAV_L100	83.5	84.2	85.6	84.4
50/70H_PAV_S100	88.7	89.2	89.6	89.2
50/70W	57.9	58.4	58.5	58.3
50/70W_L100	64.6	65.0	65.1	64.9
50/70W_S100	76.3	77.8	80.1	78.1
50/70W_PAV	84.8	85.7	86.3	85.6
50/70W_PAV_L100	86.5	88.5	89.0	88.0
50/70W_PAV_S100	93.8	94.3	94.5	94.2

I dati evidenziano l'effetto di irrigidimento a cui sono soggetti i campioni: rispetto al bitume tradizionale (50/70H), i valori di penetrazione media risultano minori. L'aggiunta di filler, per la costituzione dei mastici, fornisce valori più bassi, in particolare modo per le miscele con scoria E.A.F.; anche l'additivo warm sembra irrigidire leggermente le miscele; tuttavia, il maggior decremento dei valori di penetrazione si riscontra per i campioni invecchiati tramite procedura P.A.V., notoriamente i più rigidi. I valori del punto di rammollimento confermano il trend riscontrato nella prova di penetrazione: i mastici, le miscele additivate e quelle invecchiate risultano via via più rigide, ossia caratterizzate da punti di rammollimento più alti.

7.4. I test

Si descrivono ora, in dettaglio, la teoria e lo sviluppo dei 3 test svolti.

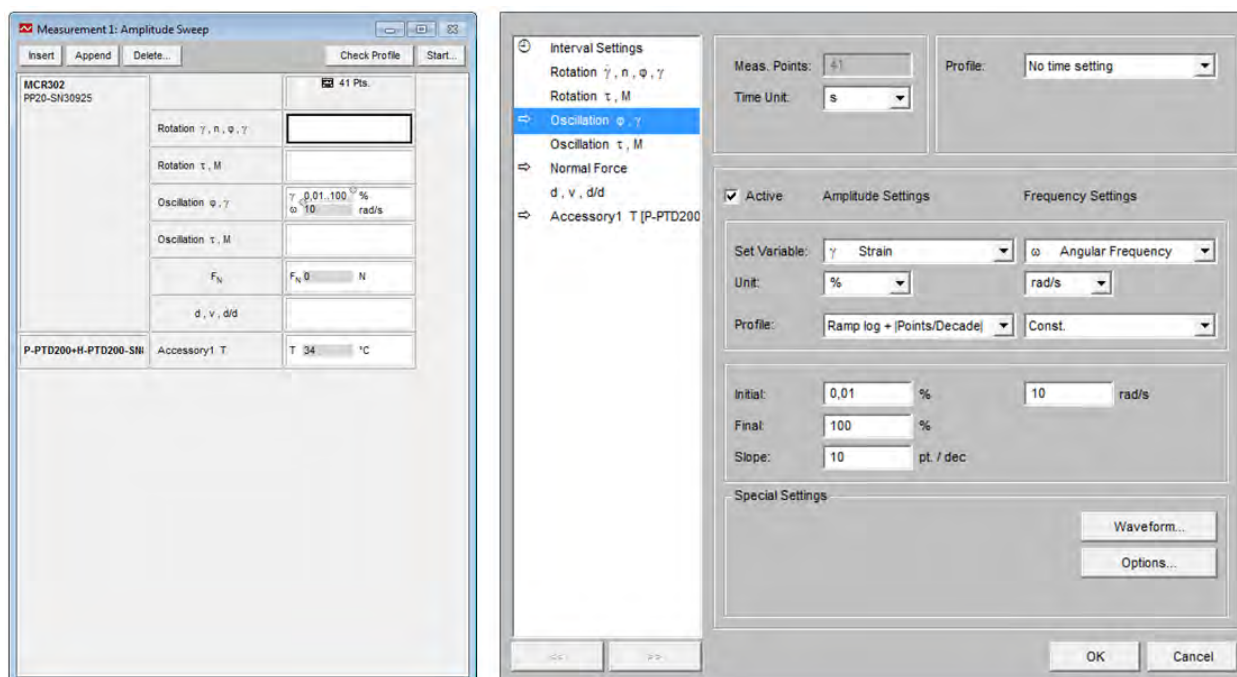
7.4.1. Prova di "amplitude sweep"

La prova "amplitude sweep" consiste in un test a deformazione controllata nel quale i campioni vengono portati alla deformazione del 100% mediante una sollecitazione oscillatoria con frequenza angolare di 10 radianti al secondo. Il parametro più importante deducibile dai risultati è rappresentato da limite elastico lineare del materiale. E' un valore senz'altro fondamentale per la caratterizzazione della risposta dei campioni, ma è altresì importante per la scelta delle

deformazioni da attribuire alle altre prove previste nel protocollo. Per esempio, la successiva prova “frequency sweep” deve svolgersi in campo elastico, di conseguenza diventa fondamentale conoscere la deformazione a cui il materiale cambia comportamento e comincia a registrare deformazioni non più lineari. La temperatura di test è stata impostata sui 34 °C, che sarà una sorta di temperatura di riferimento, che si può approssimativamente pensare come quella che discrimina le basse dalle alte temperature; le successive prove “frequency sweep”, previste sia ad alte, sia a basse temperature, saranno eseguite in due diversi momenti: la temperatura di 34 °C, presa come riferimento, sarà testata sia nella prova alle basse, sia nella prova alle alte temperature.

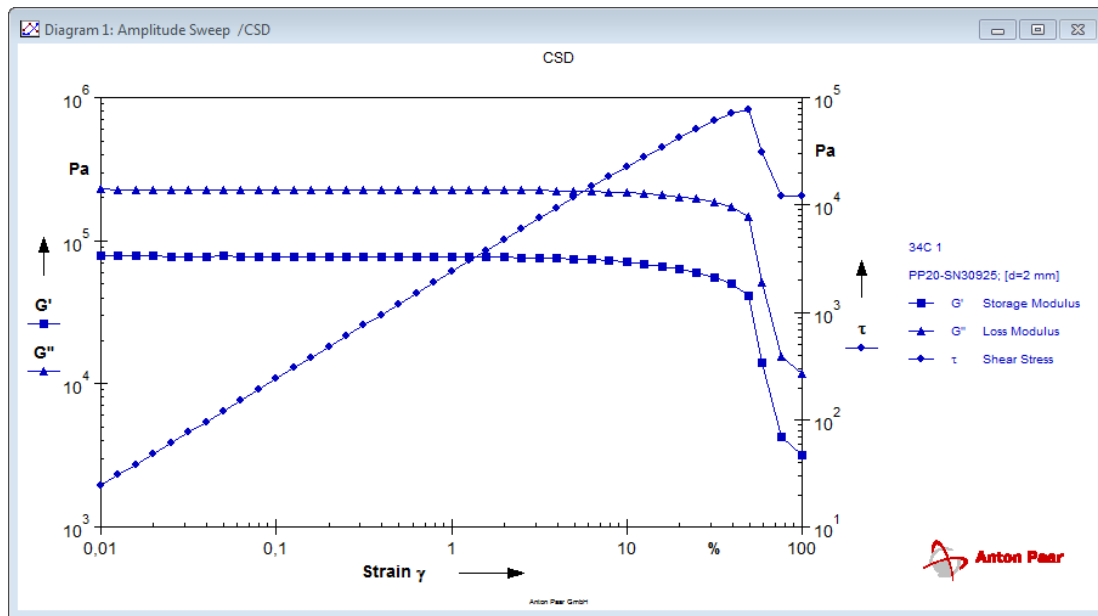
I parametri di impostazione del software “*RheoPlus*” sono indicati in figura: si dovranno settare i campi relativi alla deformazione (che controlla la prova), alle modalità di sollecitazione (frequenza dell’oscillazione sollecitante), alla temperatura, e allo sforzo normale N (che viene impostato costante e pari a 0). Si è deciso di effettuare la rilevazione con 41 punti equi-distribuiti: non sono da impostare parametri sulla durata, in quanto si è in controllo di deformazione e il test sarà completo una volta raggiunto il valore di deformazione finale impostato (100%).

Figura 7.8. Parametri di impostazione software “*RheoPlus*”



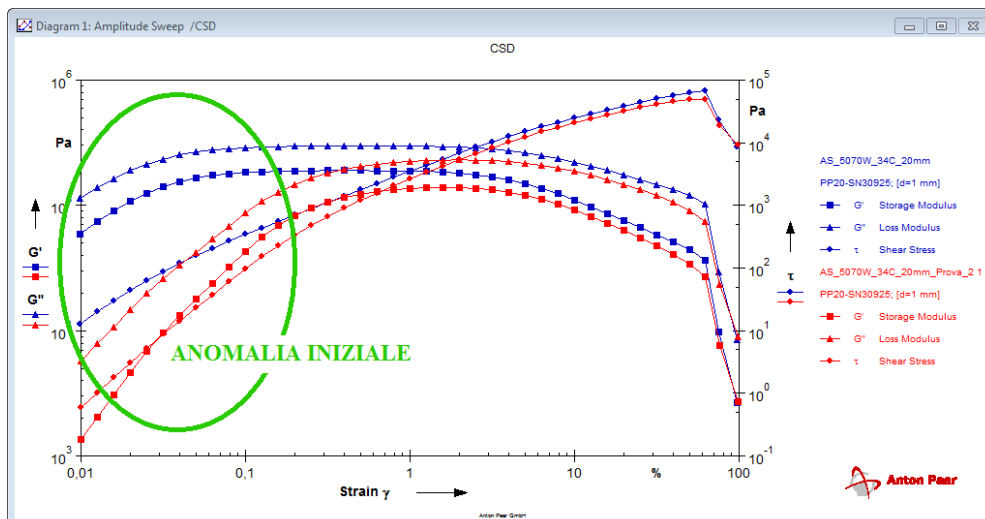
Si riporta di seguito un esempio di tipica curva modulo-deformazione ottenuta da test “amplitude sweep”.

Grafico 7.3. Esempio “amplitude sweep”: curva modulo - deformazione



Come già accennato nel capitolo precedente, è importante che la fase che precede il test sia effettuata a regola d'arte: per come si è scelto di impostare la prova di “amplitude sweep”, non è presente alcun periodo preliminare di stabilizzazione/controllo della temperatura o tensione. Diventa quindi fondamentale dare l'avvio al test solo quando la “pastiglia” ha raggiunto uno stato tensionale senza compressione e quando possiede la temperatura di prova, che deve essere raggiunta e mantenuta per alcuni minuti prima dello start. Se così non fosse si assisterebbero delle anomalie nei risultati nella parte iniziale del test: si riporta l'esempio di 2 prove ripetute (a 34°C) in cui è stato effettuato il riscaldamento a 70 °C per consentire il raggiungimento del gap di test e si è subito dato avvio alla prova senza attendere la stabilizzazione della tensione e della temperatura.

Grafico 7.4. Test anomalo – errore nella fase iniziale

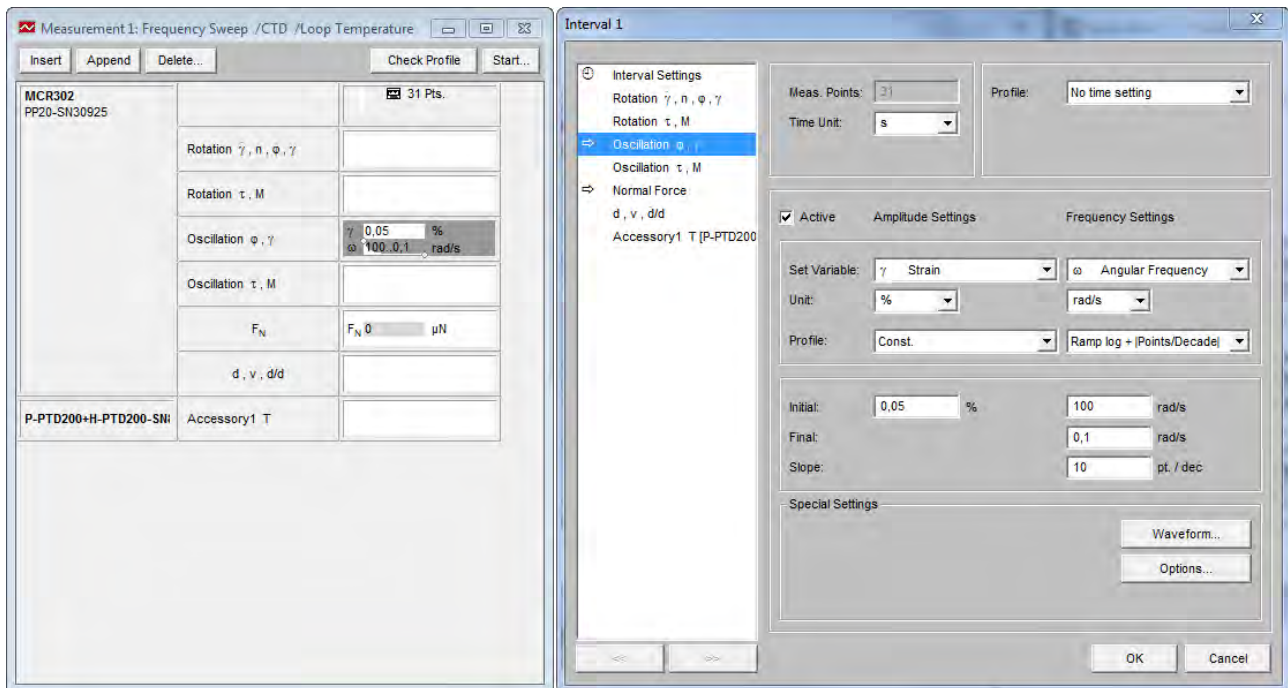


7.4.2. Prova di “frequency sweep”

La prova “frequency sweep” consiste in un test in controllo di tensione a deformazione costante, nel quale i campioni vengono sottoposti ad una sollecitazione oscillatoria con frequenza angolare variabile. Si è deciso di imporre un range di frequenza da 100 rad/s fino a 0.1 rad/s: la deformazione costante da attribuire al campione deve rientrare nel campo elastico lineare, per cui può essere decisa con esattezza solo dopo la prova “amplitude sweep”, mediante la quale, come visto, è possibile individuare la deformazione limite oltre la quale il materiale assume comportamento non più elastico lineare. Inizialmente, dopo alcune prove “amplitude sweep” si era deciso di impostare il valore allo 0.5%: con il progredire del protocollo si sono però notate marcate differenze sui comportamenti lineari dei diversi campioni testati. Si è quindi deciso di rieseguire le prove di “frequency sweep” imponendo un valore costante di deformazione pari allo 0.05%. ben più cautelativo rispetto al precedente, di modo da avere la certezza di sviluppare l’analisi in ambito di elasticità lineare.

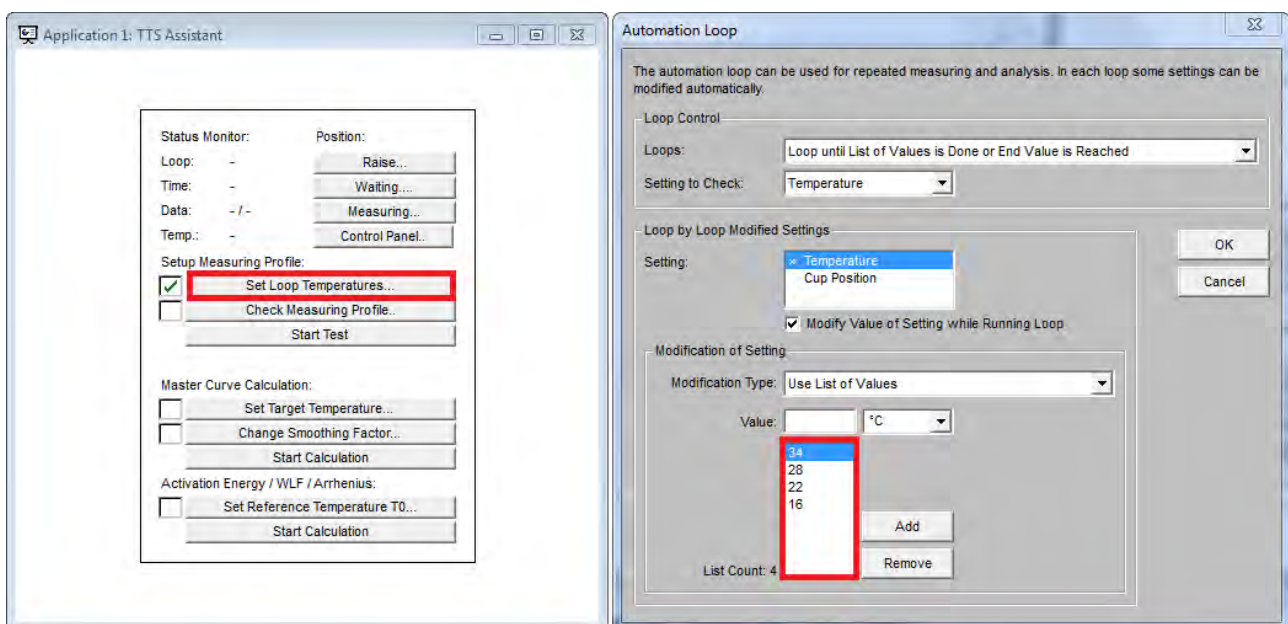
Le prove di “frequency sweep” si articolano in 2 test diversi: il test alle basse temperature copre un range dai 34 ai 16°C: lo stesso campione viene mantenuto alla deformazione imposta (0.05%) e subisce, per ogni temperatura, lo spettro di sollecitazioni oscillatorie a frequenza variabile preimpostate: di conseguenza la prova si divide in più step, ognuno dei quali ripetuto per ogni temperatura. Si è deciso di analizzare le basse temperature progressivamente ai 34, 28, 22 e 16 °C, con testa di carico da 8 mm e impostazione di gap a 2 mm (tipica per le basse temperature). Per la prova ad alte temperature si sono seguite le medesime modalità, impostando ogni step alle temperature in un range dai 34 ai 58°C (precisamente a 34, 40, 46, 52 e 58 °C, con testa di carico da 20 mm e impostazione di gap a 1 mm). Si è inoltre inserita, in ogni caso, l’impostazione dello sforzo normale N pari a 0. Non si sono utilizzate differenti impostazioni tra bitumi e filler. La figura successiva illustra i parametri di configurazione del software “RheoPlus”.

Figura 7.9. Parametri di impostazione software “RheoPlus”



Nella prova “frequency sweep”, essendo le temperature progressive, non vengono inserite nella maschera di configurazione dei parametri, bensì nella fase precedente allo start: con l’apposito pulsante si può impostare il loop desiderato, come illustrato in figura.

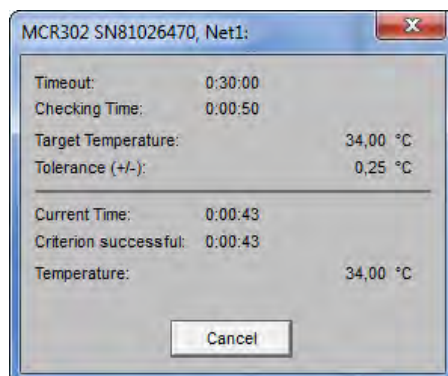
Figura 7.10. Prova “frequency sweep” - impostazioni delle temperature



La temperatura, quindi, risulta un parametro rilevante per lo svolgimento della prova; all’inizio di ogni step il software visualizza una maschera che riporta il suo monitoraggio: ogni temperatura

settata viene mantenuta costante (con uno scarto tollerato di 0.25°C) per un periodo di 1 minuto, al fine di garantire, a inizio step, caratteristiche di consistenza omogenee in tutto il campione.

Figura 7.11. Monitoraggio temperatura pre-test



Lo scopo principale della prova “frequency sweep” è la determinazione delle “*mater curves*”, costruite dagli output dei parametri reologici delle prove: consentono di studiare l’andamento del modulo complesso G^* e dell’angolo di fase δ in funzione della frequenza sollecitante.

7.4.3. Prova M.S.C.R.

La prova M.S.C.R. (Multiple Stress Creep Recovery) si pone lo scopo di determinare le percentuali di deformazione recuperabile e non recuperabile dei materiali presi in esame. La percentuale di deformazione recuperabile viene analizzata come indice per la determinazione della risposta elastica di strati di binder a legante bituminoso, sia esso tradizionale o additivato con polimeri che ne aumentino le prestazioni, e viene comunemente considerata come un indicatore del comportamento degli strati nei confronti di fenomeni di degrado da ormaiamento.

La norma di riferimento è la A.S.T.M. 7405, nella parte D7405-10a, dal titolo “Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer”. Il protocollo è applicabile a provini aventi modulo complesso dinamico di valore compreso tra i 100 Pa e i 10 MPa: questo range di valori è tipicamente ottenibile per materiale soggetto a temperature che variano tra i 6 e gli 88 °C. Il bitume deve essere costituito da particelle la cui dimensione massima non superi i 250 nanometri. Lo standard prevede campioni dello spessore di 1 mm e diametro di 25 mm, o in alternativa, dello spessore di 2 mm e diametro di

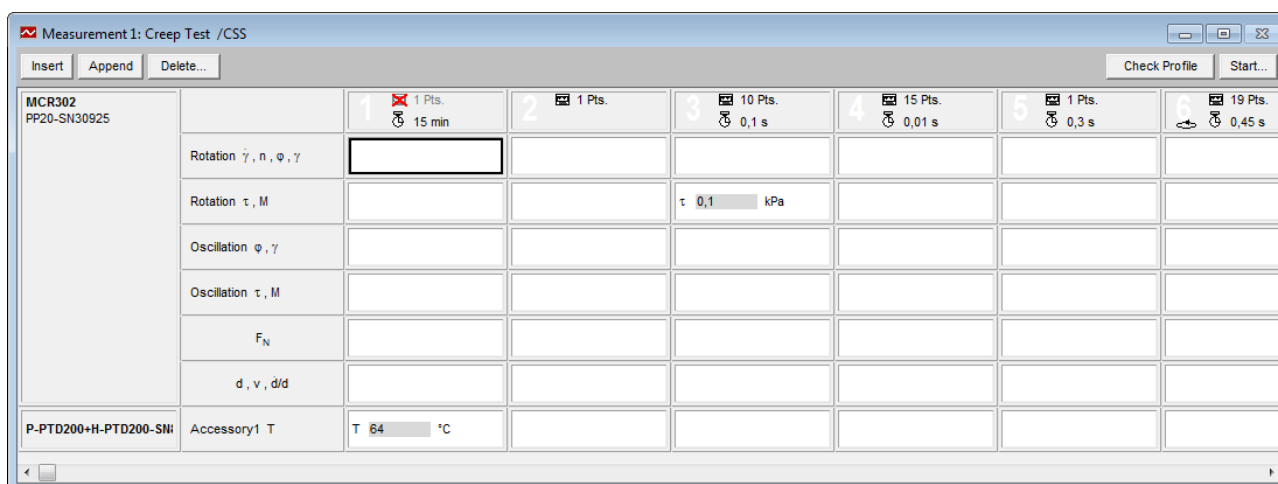
8 mm: per esigenze di laboratorio, come già accennato, si utilizzeranno campioni da 20 mm, in sostituzione di quelli da 25 mm.

La prova si effettua mantenendo costante la temperatura (con tolleranza accettata di ± 0.1 °C): si è quindi deciso di testare i diversi materiali in un range di temperature alte, tipiche dei fenomeni di ormaiamento; in particolare si sono analizzate le risposte ai 58, 64, 70, e 76 °C, testando i materiali con geometria di carico da 20 mm e gap di 1 mm (configurazione tipica per le temperature più alte). La presenza della deformazione non recuperabile impone che, per ogni temperatura, si effettui un test su un nuovo campione, senza possibilità di riutilizzo dello stesso provino, che a fine prova risulta ampiamente deformato. Il test si sviluppa imprimendo una serie di tensioni tangenziali (τ) prefissate, intervallate da periodi di scarico: si articola in 2 serie da 10 cicli di carico-scarico: in particolare, i primi 10 cicli vengono effettuati per un carico di intensità costante pari a $\tau = 0.1$ kPa, mentre i secondi 10 per un carico di intensità costante di $\tau = 3.2$ kPa. Ogni ciclo è suddiviso in due fasi: durante la prima fase, il campione è sollecitato istantaneamente dal carico prefissato, per la durata di 1.0 secondi. Segue istantaneamente la seconda fase, durante la quale il campione è lasciato a riposo, per una durata di 9.0 secondi, durante la quale può recuperare parzialmente la deformazione conseguita nella prima fase. Conseguentemente, la durata di 1 singolo ciclo è pari a 10.0 secondi: non essendovi pause tra un ciclo e l'altro, la durata dei primi 10 cicli, con carico imposto costante a $\tau = 0.1$ kPa, dura 100.0 secondi. Non esiste pausa nemmeno tra i primi 10 cicli e i secondi 10 cicli (questa volta con carico costante imposto pari a $\tau = 3.2$ kPa): i secondi 10 cicli seguono gli stessi intervalli di carico dei primi 10. Conseguentemente, anche i secondi 10 cicli durano 100.0 secondi; la durata totale del test risulta quindi complessivamente pari a 200.0 secondi. Per le prove con i mastici si è deciso di aggiungere un'ulteriore serie di 10 cicli, erogata con le medesime modalità, ma con tensione pari a $\tau = 10$ kPa, con lo scopo di testare il materiale sotto condizioni più gravose, tenendo conto della nota proprietà irrigidente dei filler.

Operativamente, si è deciso di precedere l'inizio della sollecitazione con un periodo di 15 minuti, per consentire al campione di stabilizzarsi alla temperatura di prova e di garantire la stabilizzazione dello sforzo normale nei pressi dello 0. Durante la fase che precede il "trimming", infatti, la testa di carico comprime la "pastiglia" per portarsi al gap stabilito: una volta raggiunta la distanza di prova, il campione risulta ancora compresso, ed è necessario qualche minuto perché possa avvenire il rilassamento del materiale e la scomparsa dello sforzo di compressione.

Di seguito si riportano le impostazioni di prova inserite nel software "RheoPlus".

Figura 7.12. Configurazioni prova M.S.C.R. software “RheoPlus”



Si è deciso di effettuare la rilevazione dei punti in diverse fasi: la fase di sollecitazione viene monitorata con 10 punti in 1 secondo. La fase immediatamente successiva alla fine della tensione, essendo significativa, viene illustrata mediante 15 punti in 0.15 secondi (1 punto ogni 0.01 secondi): la fase di scarico invece viene schematizzata con 19 punti in 9 secondi (1 punto circa ogni 0.45 secondi, ossia il valore minimo suggerito da normativa). I tipici andamenti, per bitumi e mastici, sono sotto illustrati.

Grafico 7.5. Tipica deformazione: bitume 50/70 (tensioni $\tau = 0.1kPa$ e $\tau = 3.2kPa$)

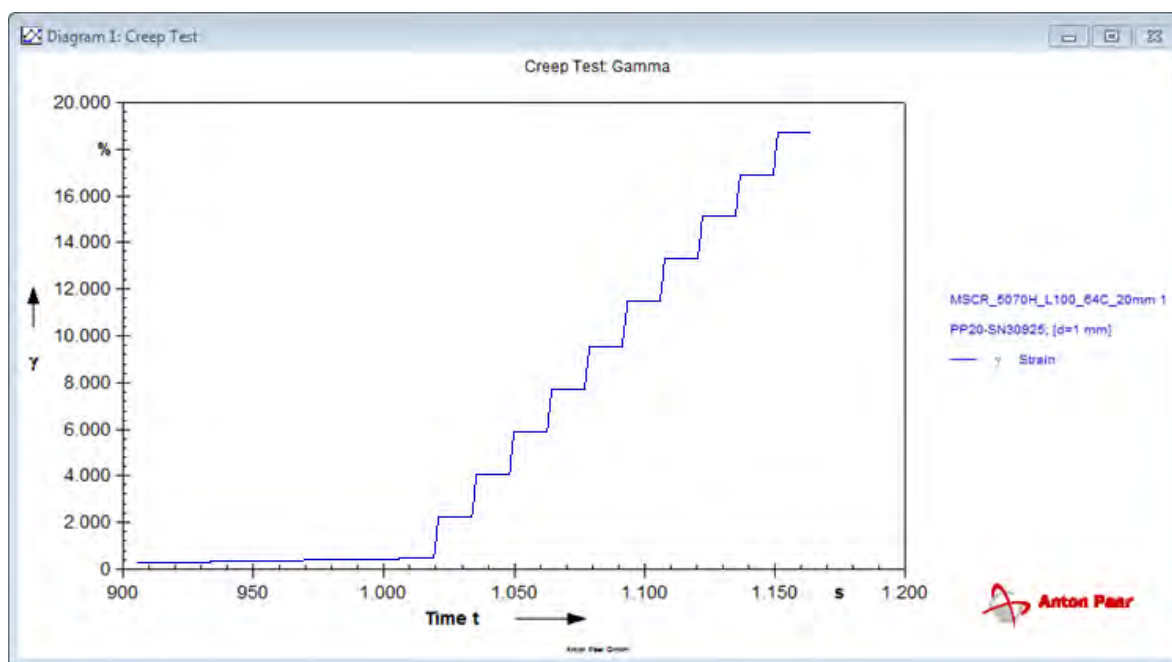


Grafico 7.6. Tipica deformazione: mastice 50/70 con aggiunta di filler calcareo al 100% in volume (tensioni $\tau = 0.1\text{kPa}$; $\tau = 3.2\text{kPa}$; $\tau = 10\text{kPa}$)

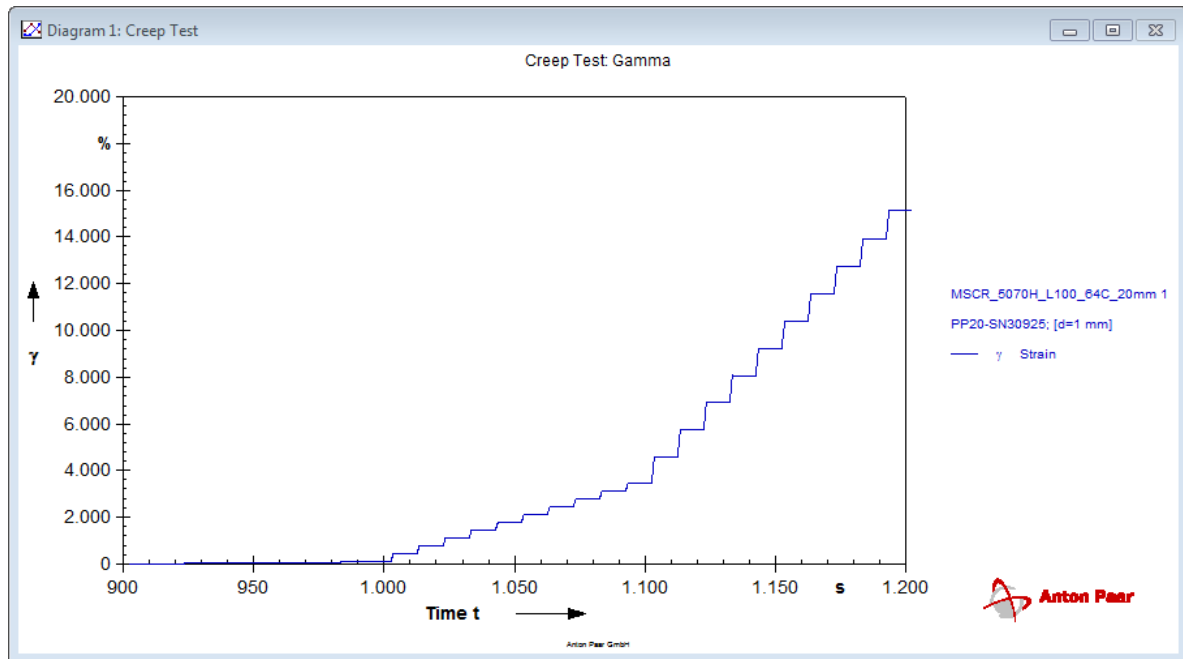
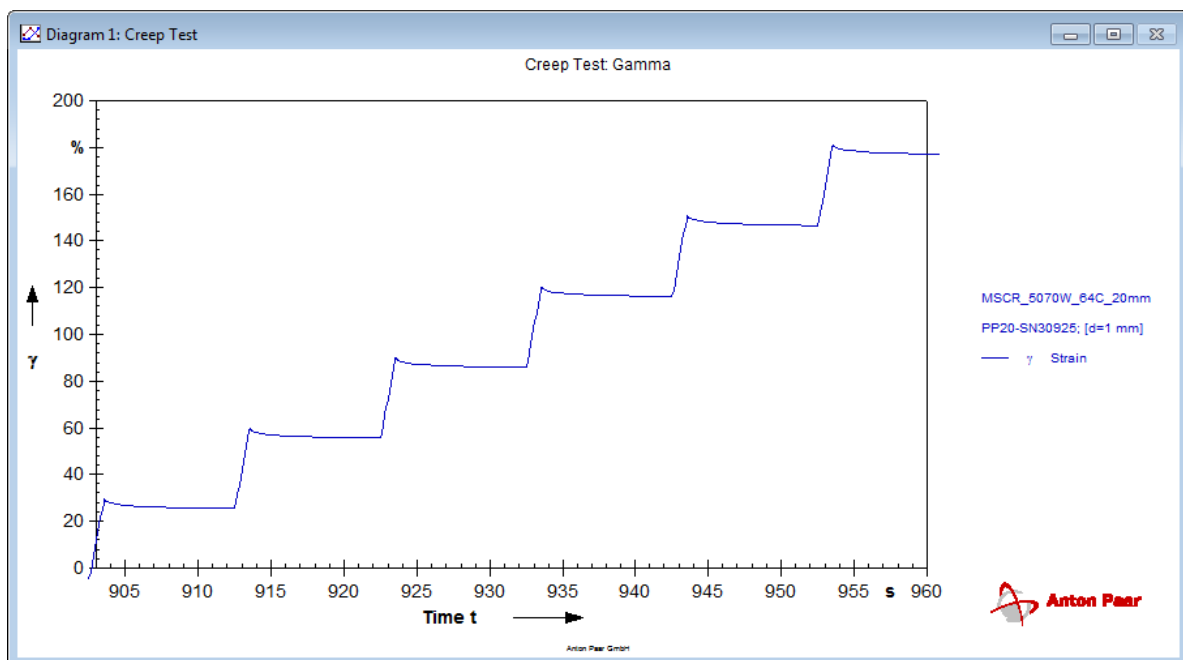


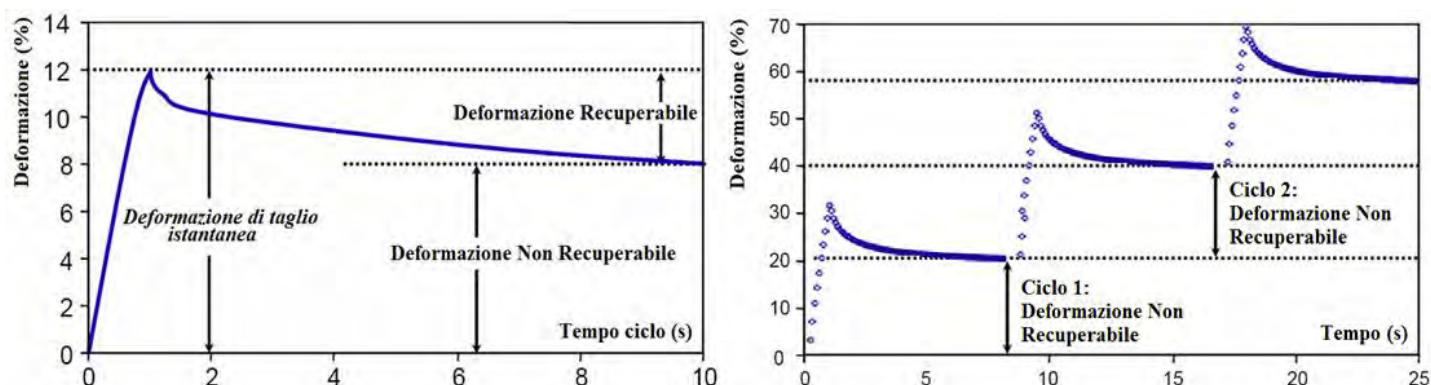
Grafico 7.7. Dettaglio: deformazione ciclica in fase di test



L'analisi dei risultati si effettua considerando principalmente il parametro J_{nr} , definito come:

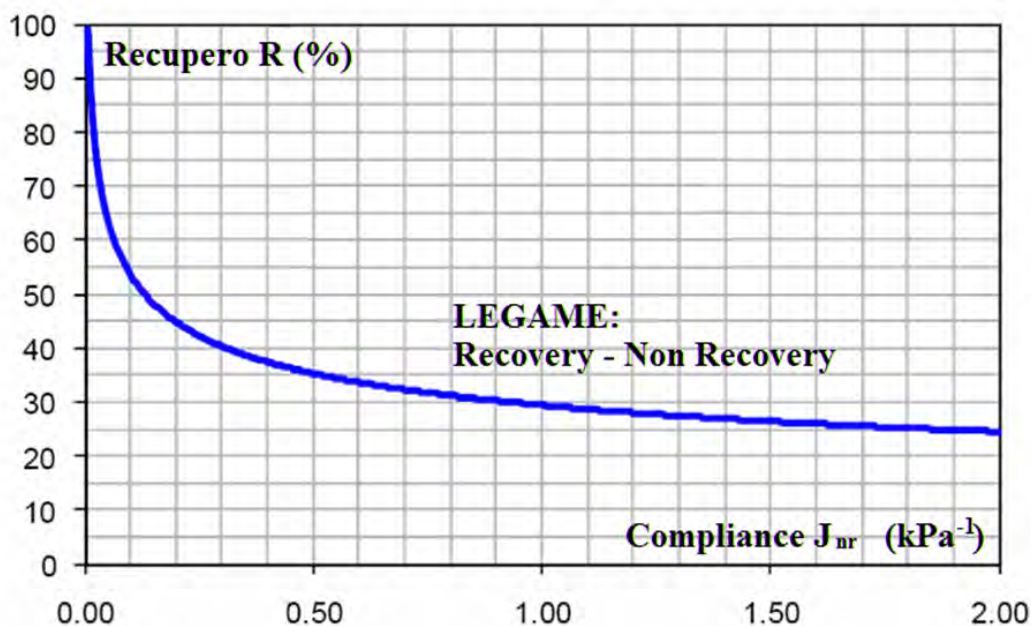
$$J_{nr} : \quad \text{“compliance” non recuperabile:} \quad \frac{\text{deformazione non recuperabile}}{\text{tensione di taglio applicata}}$$

Grafici 7.8. *Deformazione recuperabile. non recuperabile*



Nella trattazione dei risultati può essere utile anche rappresentare la correlazione tra parametri J_{nr} e la deformazione recuperata: il grafico ne riporta l'andamento teorico.

Grafico 7.9. *Legame Recovery R - Compliance J_{nr}*



L'utilizzo del test M.S.C.R. è stato dimostrato essere maggiormente correlato alla resistenza ai fenomeni di ormaiamento rispetto alla classica trattazione del modulo complesso G^* e dell'angolo di fase δ : in altre parole, il parametro J_{nr} risulta essere maggiormente indicativo della resistenza ai fenomeni di degrado da ormaiamento. La prova risulta altresì utile in termini di confronto tra bitumi tradizionali e bitumi modificati: la deformazione recuperabile può identificare e quantificare gli effetti sul conglomerato prodotti da eventuali polimeri.

Capitolo 8

Analisi dei dati

Il seguente capitolo riporta in primo luogo i dati ottenuti dai test: in seguito vengono proposte le elaborazioni effettuate per le diverse prove.

8.1. Risultati dei test

Al fine di favorire l'interpretazione dei dati desunti dalla sperimentazione di laboratorio, si è deciso di raggruppare i diversi risultati per tipologia di campione, ovvero illustrando consecutivamente tutte le diverse prove relative al medesimo campione.

Per motivi di brevità, si riporta l'intera raccolta dati solamente per il primo campione (bitume 50/70): per i successivi campioni si illustrano solo le rappresentazioni grafiche dei risultati (i dati numerici saranno comunque consultabili nella sezione di elaborazione dati).

8.1.1. Serie 5070H

Campione di bitume 50/70 per miscele tradizionali a caldo.

Tabella 8.1. Risultati Amplitude Sweep Test

Amplitude Sweep Test	
Name:	AS_5070H_34C_20mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(30,0)d
Measuring Date/Time:	19/06/2015; 14:38
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818

- Norm. Css [Pa/mNm]:	638,48							
- Start Delay Time [s]:	13,853							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	41							
Time Setting:	41 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,01 ... 100 % log; Slope = 10 Pt. / dec Angular Frequency omega = 10 1/s							
Normal Force	FN = 0 N							
Results								
Meas. Pts.	Strain	Shear Stress	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Deflection Angle	Torque	Status
	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[1]	[mrad]	[µNm]	[]
1	0,01	2,42E+01	7,83E+04	2,28E+05	2,92E+00	1,00E-02	3,78E+01	DSO
2	0,0126	3,03E+01	7,82E+04	2,28E+05	2,92E+00	1,26E-02	4,75E+01	DSO
3	0,0159	3,82E+01	7,82E+04	2,28E+05	2,91E+00	1,59E-02	5,98E+01	DSO
4	0,02	4,80E+01	7,79E+04	2,27E+05	2,92E+00	2,00E-02	7,51E+01	DSO
5	0,0251	6,03E+01	7,78E+04	2,27E+05	2,92E+00	2,52E-02	9,45E+01	DSO
6	0,0316	7,59E+01	7,77E+04	2,27E+05	2,92E+00	3,17E-02	1,19E+02	DSO
7	0,0398	9,55E+01	7,77E+04	2,27E+05	2,92E+00	3,99E-02	1,50E+02	DSO
8	0,0501	1,20E+02	7,79E+04	2,27E+05	2,91E+00	5,02E-02	1,88E+02	DSO
9	0,0631	1,51E+02	7,78E+04	2,27E+05	2,92E+00	6,32E-02	2,37E+02	DSO
10	0,0794	1,91E+02	7,77E+04	2,27E+05	2,92E+00	7,95E-02	2,98E+02	DSO
11	0,1	2,40E+02	7,77E+04	2,27E+05	2,92E+00	1,00E-01	3,75E+02	DSO
12	0,126	3,02E+02	7,77E+04	2,27E+05	2,92E+00	1,26E-01	4,72E+02	DSO
13	0,158	3,79E+02	7,76E+04	2,26E+05	2,92E+00	1,59E-01	5,94E+02	DSO
14	0,2	4,77E+02	7,75E+04	2,26E+05	2,92E+00	2,00E-01	7,47E+02	DSO
15	0,251	6,00E+02	7,74E+04	2,26E+05	2,92E+00	2,51E-01	9,40E+02	DSO
16	0,316	7,54E+02	7,73E+04	2,26E+05	2,92E+00	3,17E-01	1,18E+03	DSO
17	0,398	9,49E+02	7,72E+04	2,25E+05	2,92E+00	3,99E-01	1,49E+03	DSO
18	0,501	1,19E+03	7,71E+04	2,25E+05	2,92E+00	5,02E-01	1,87E+03	DSO
19	0,631	1,50E+03	7,71E+04	2,25E+05	2,92E+00	6,32E-01	2,35E+03	DSO
20	0,794	1,89E+03	7,70E+04	2,25E+05	2,92E+00	7,95E-01	2,96E+03	DSO
21	1	2,38E+03	7,70E+04	2,25E+05	2,93E+00	1,00E+00	3,73E+03	DSO
22	1,26	3,00E+03	7,69E+04	2,25E+05	2,93E+00	1,26E+00	4,69E+03	DSO
23	1,58	3,77E+03	7,67E+04	2,25E+05	2,94E+00	1,59E+00	5,91E+03	DSO
24	2	4,74E+03	7,65E+04	225.000	2,94E+00	2,00E+00	7,43E+03	DSO
25	2,51	5,96E+03	7,62E+04	2,25E+05	2,95E+00	2,51E+00	9,33E+03	DSO
26	3,16	7,48E+03	7,58E+04	2,24E+05	2,95E+00	3,17E+00	1,17E+04	DSO
27	3,98	9,39E+03	7,54E+04	2,23E+05	2,96E+00	3,99E+00	1,47E+04	DSO
28	5,01	1,18E+04	7,47E+04	2,22E+05	2,98E+00	5,02E+00	1,84E+04	DSO
29	6,31	1,47E+04	7,38E+04	2,21E+05	2,99E+00	6,32E+00	2,30E+04	DSO

30	7,94	1,83E+04	7,26E+04	2,19E+05	3,02E+00	7,95E+00	2,87E+04	DSO
31	10	2,28E+04	7,08E+04	2,16E+05	3,05E+00	1,00E+01	3,57E+04	DSO
32	12,6	2,81E+04	6,87E+04	2,13E+05	3,1	12,6	44.100	DSO
33	15,8	3,46E+04	6,60E+04	2,08E+05	3,15	15,9	54.200	DSO
34	19,9	4,23E+04	6,29E+04	2,02E+05	3,22	20	66.200	DSO
35	25,1	5,13E+04	5,93E+04	1,95E+05	3,3	25,1	80.300	DSO
36	31,6	6,14E+04	5,51E+04	1,86E+05	3,38	31,7	96.200	DSO
37	39,7	7,14E+04	4,96E+04	1,73E+05	3,48	39,8	112.000	DSO
38	49,7	7,64E+04	4,15E+04	1,48E+05	3,58	50,2	120.000	DSO
39	58,8	3,08E+04	1,40E+04	5,06E+04	3,61	63,9	48.300	WMa,DSO
40	76,2	1,22E+04	4,27E+03	1,54E+04	3,61	86,3	19.100	WMa,DSO
41	99,9	1,22E+04	3,20E+03	1,18E+04	3,67	113	19.100	DSO

Grafico 8.1. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

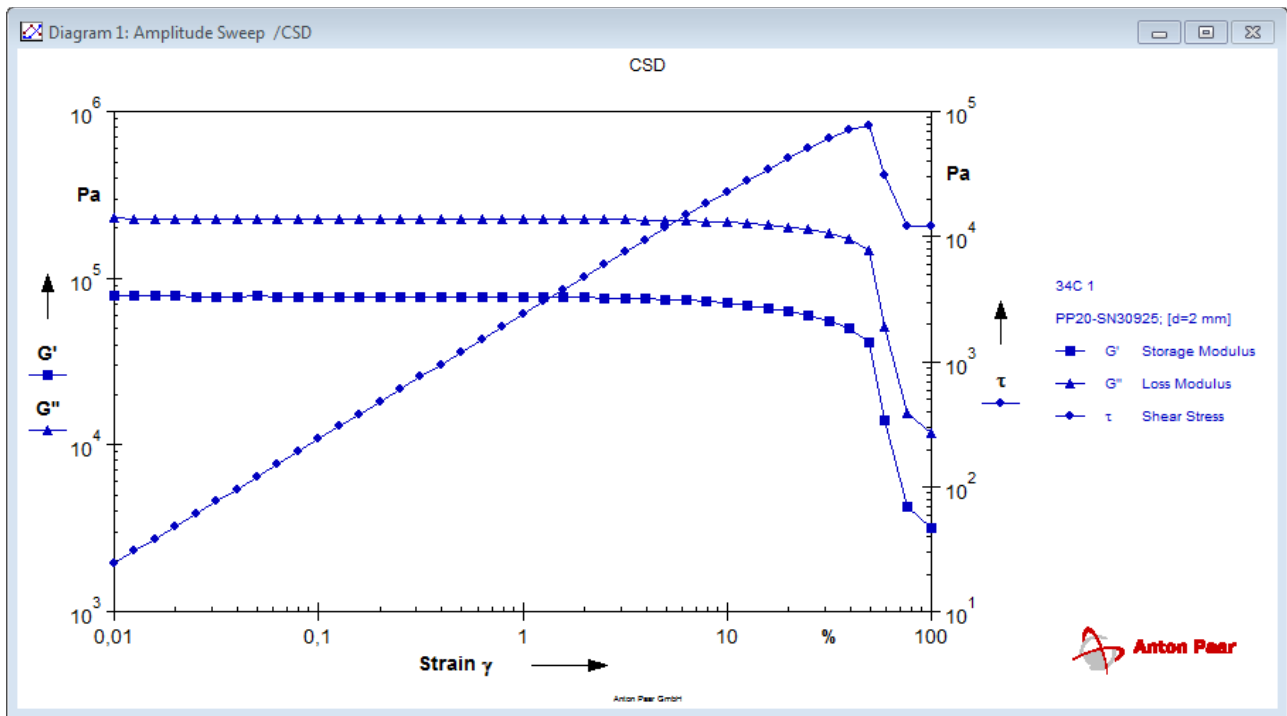


Tabella 8.2. Risultati Frequency Sweep Test - Basse temperature

Data Series Information	
Name:	FS_5070H_34C_8mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(2,-1); Adj(54,0)d
Measuring Date/Time:	07/07/2015; 15:48
Measuring System:	PP08-SN26896; [d=2 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	0,41726634

- Norm. Css [Pa/mNm]:	10.062,96							
- Start Delay Time [s]:	62,073							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	31							
Time Setting:	31 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec							
Normal Force	FN = 0 µN							
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	8,83E+05	1,47E+06	1,66E+00	1,71E+04	2,51E-01	8,53E+01	DSO
2	79,4	7,33E+05	1,27E+06	1,73E+00	1,84E+04	2,50E-01	7,26E+01	DSO
3	63,1	6,11E+05	1,09E+06	1,79E+00	1,98E+04	2,51E-01	6,21E+01	DSO
4	50,1	5,10E+05	9,36E+05	1,84E+00	2,13E+04	2,51E-01	5,30E+01	DSO
5	39,8	4,26E+05	8,03E+05	1,88E+00	2,28E+04	2,51E-01	4,52E+01	DSO
6	31,6	3,56E+05	6,87E+05	1,93E+00	2,45E+04	2,51E-01	3,85E+01	DSO
7	25,1	2,97E+05	5,87E+05	1,98E+00	2,62E+04	2,51E-01	3,27E+01	DSO
8	20	2,47E+05	5,01E+05	2,03E+00	2,80E+04	2,51E-01	2,78E+01	DSO
9	15,8	2,06E+05	4,28E+05	2,08E+00	3,00E+04	2,51E-01	2,36E+01	DSO
10	12,6	1,71E+05	3,64E+05	2,12E+00	3,20E+04	2,51E-01	2,00E+01	DSO
11	10	1,42E+05	3,10E+05	2,17E+00	3,41E+04	2,51E-01	1,69E+01	DSO
12	7,94	1,18E+05	2,63E+05	2,23E+00	3,63E+04	2,51E-01	1,43E+01	DSO
13	6,31	9,81E+04	2,23E+05	2,28E+00	3,87E+04	2,51E-01	1,21E+01	DSO
14	5,01	8,13E+04	1,89E+05	2,33E+00	4,11E+04	2,51E-01	1,02E+01	DSO
15	3,98	6,72E+04	1,60E+05	2,39E+00	4,37E+04	2,51E-01	8,64E+00	DSO
16	3,16	5,55E+04	1,36E+05	2,44E+00	4,63E+04	2,51E-01	7,28E+00	DSO
17	2,51	4,58E+04	1,15E+05	2,50E+00	4,92E+04	2,51E-01	6,14E+00	DSO
18	2	3,77E+04	9,69E+04	2,57E+00	5,21E+04	2,51E-01	5,17E+00	DSO
19	1,58	3,11E+04	8,17E+04	2,63E+00	5,52E+04	2,51E-01	4,34E+00	DSO
20	1,26	2,55E+04	6,89E+04	2,70E+00	5,83E+04	2,51E-01	3,65E+00	DSO
21	1	2,09E+04	5,81E+04	2,78E+00	6,17E+04	2,51E-01	3,07E+00	DSO
22	0,794	1,70E+04	4,88E+04	2,87E+00	6,51E+04	2,51E-01	2,57E+00	DSO
23	0,631	1,40E+04	4,11E+04	2,93E+00	6,88E+04	2,51E-01	2,16E+00	DSO
24	0,501	1,14E+04	3,46E+04	3	7,27E+04	2,51E-01	1,81E+00	DSO
25	0,398	9,30E+03	2,91E+04	3,13E+00	7,68E+04	2,51E-01	1,52E+00	DSO
26	0,316	7,45E+03	2,44E+04	3,27E+00	8,05E+04	2,51E-01	1,27E+00	DSO
27	0,251	6,10E+03	2,05E+04	3,35E+00	8,50E+04	2,51E-01	1,06E+00	DSO
28	0,2	4,97E+03	1,71E+04	3,43E+00	8,91E+04	2,51E-01	8,84E-01	DSO
29	0,158	4,09E+03	1,44E+04	3,53E+00	9,47E+04	2,51E-01	7,46E-01	DSO

30	0,126	3,37E+03	1,20E+04	3,57E+00	9,92E+04	2,51E-01	6,20E-01	DSO
31	0,1	2,72E+03	1,02E+04	3,76E+00	1,06E+05	2,51E-01	5,25E-01	DSO
Data Series Information								
Name:	FS_5070H_28C_8mm							
Number of Intervals:	1							
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024							
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(2,-1); Adj(54,0)d							
Measuring Date/Time:	07/07/2015; 16:13							
Measuring System:	PP08-SN26896; [d=2 mm]							
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097							
Calculating Constants:								
- Norm. Csr [min/s]:	0,41726634							
- Norm. Css [Pa/mNm]:	10.062,96							
- Start Delay Time [s]:	62,073							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	31							
Time Setting:	31 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec							
Normal Force	FN = 0 µN							
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	2,25E+06	3,24E+06	1,44	3,95E+04	2,51E-01	1,96E+02	DSO
2	79,4	1,92E+06	2,84E+06	1,48	4,31E+04	2,51E-01	1,70E+02	DSO
3	63,1	1,63E+06	2,48E+06	1,52	4,70E+04	2,51E-01	1,47E+02	DSO
4	50,1	1,39E+06	2,16E+06	1,55	5,13E+04	2,51E-01	1,28E+02	DSO
5	39,8	1,18E+06	1,88E+06	1,59	5,58E+04	2,51E-01	1,10E+02	DSO
6	31,6	1,01E+06	1,63E+06	1,62	6,06E+04	2,51E-01	9,52E+01	DSO
7	25,1	8,54E+05	1,41E+06	1,66	6,58E+04	2,51E-01	8,21E+01	DSO
8	20	7,24E+05	1,23E+06	1,69	7,13E+04	2,51E-01	7,07E+01	DSO
9	15,8	6,14E+05	1,06E+06	1,73	7,72E+04	2,51E-01	6,08E+01	DSO
10	12,6	5,20E+05	9,15E+05	1,76	8,36E+04	2,51E-01	5,23E+01	DSO
11	10	4,40E+05	7,89E+05	1,79	9,03E+04	2,51E-01	4,49E+01	DSO
12	7,94	3,72E+05	6,80E+05	1,83	9,75E+04	2,51E-01	3,85E+01	DSO
13	6,31	3,14E+05	5,85E+05	1,86	1,05E+05	2,51E-01	3,30E+01	DSO
14	5,01	2,65E+05	5,03E+05	1,9	1,13E+05	2,51E-01	2,82E+01	DSO
15	3,98	2,24E+05	4,32E+05	1,93	1,22E+05	2,51E-01	2,42E+01	DSO
16	3,16	1,89E+05	3,70E+05	1,96	1,31E+05	2,51E-01	2,07E+01	DSO

17	2,51	1,59E+05	3,17E+05	2	1,41E+05	2,51E-01	1,76E+01	DSO
18	2	1,34E+05	2,72E+05	2,03	1,52E+05	2,51E-01	1,51E+01	DSO
19	1,58	1,12E+05	2,32E+05	2,07	1,63E+05	2,51E-01	1,28E+01	DSO
20	1,26	9,47E+04	1,99E+05	2,1	1,75E+05	2,51E-01	1,10E+01	DSO
21	1	8,01E+04	1,71E+05	2,13	1,88E+05	2,51E-01	9,36E+00	DSO
22	0,794	6,75E+04	1,46E+05	2,16	2,02E+05	2,51E-01	7,99E+00	DSO
23	0,631	5,72E+04	1,24E+05	2,17	2,17E+05	2,51E-01	6,79E+00	DSO
24	0,501	4,77E+04	1,06E+05	2,23	2,32E+05	2,51E-01	5,78E+00	DSO
25	0,398	4,08E+04	9,01E+04	2,21	2,49E+05	2,51E-01	4,92E+00	DSO
26	0,316	3,44E+04	7,65E+04	2,22	2,65E+05	2,51E-01	4,17E+00	DSO
27	0,251	2,93E+04	6,49E+04	2,22	2,83E+05	2,51E-01	3,54E+00	DSO
28	0,2	2,47E+04	5,52E+04	2,23	3,03E+05	2,51E-01	3,01E+00	DSO
29	0,158	2,11E+04	4,67E+04	2,21	3,23E+05	2,51E-01	2,55E+00	DSO
30	0,126	1,82E+04	3,97E+04	2,18	3,47E+05	2,51E-01	2,17E+00	DSO
31	0,1	1,56E+04	3,36E+04	2,15	3,71E+05	2,51E-01	1,84E+00	DSO
Data Series Information								
Name:	FS 5070H 22C 8mm							
Number of Intervals:	1							
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024							
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(2,-1); Adj(54,0)d							
Measuring Date/Time:	07/07/2015; 16:38							
Measuring System:	PP08-SN26896; [d=2 mm]							
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097							
Calculating Constants:								
- Norm. Csr [min/s]:	0,41726634							
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	10.062,96							
- Start Delay Time [s]:	62,073							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	31							
Time Setting:	31 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec							
Normal Force	FN = 0 µN							
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	6,23E+06	7,16E+06	1,15	9,49E+04	2,52E-01	4,73E+02	DSO
2	79,4	5,40E+06	6,39E+06	1,18	1,05E+05	2,51E-01	4,15E+02	DSO
3	63,1	4,68E+06	5,69E+06	1,22	1,17E+05	2,51E-01	3,66E+02	DSO

4	50,1	4,05E+06	5,05E+06	1,25	1,29E+05	2,51E-01	3,22E+02	DSO
5	39,8	3,49E+06	4,48E+06	1,28	1,43E+05	2,51E-01	2,82E+02	DSO
6	31,6	3,01E+06	3,96E+06	1,31	1,57E+05	2,51E-01	2,47E+02	DSO
7	25,1	2,59E+06	3,49E+06	1,35	1,73E+05	2,51E-01	2,16E+02	DSO
8	20	2,23E+06	3,08E+06	1,38	1,90E+05	2,51E-01	1,89E+02	DSO
9	15,8	1,91E+06	2,70E+06	1,41	2,09E+05	2,51E-01	1,65E+02	DSO
10	12,6	1,64E+06	2,37E+06	1,45	2,29E+05	2,51E-01	1,43E+02	DSO
11	10	1,40E+06	2,08E+06	1,48	2,51E+05	2,51E-01	1,25E+02	DSO
12	7,94	1,20E+06	1,82E+06	1,51	2,74E+05	2,51E-01	1,08E+02	DSO
13	6,31	1,03E+06	1,59E+06	1,54	2,99E+05	2,51E-01	9,39E+01	DSO
14	5,01	8,77E+05	1,38E+06	1,57	3,27E+05	2,51E-01	8,13E+01	DSO
15	3,98	7,49E+05	1,20E+06	1,61	3,56E+05	2,51E-01	7,04E+01	DSO
16	3,16	6,40E+05	1,05E+06	1,64	3,88E+05	2,51E-01	6,09E+01	DSO
17	2,51	5,45E+05	9,09E+05	1,67	4,22E+05	2,51E-01	5,26E+01	DSO
18	2	4,65E+05	7,88E+05	1,7	4,59E+05	2,51E-01	4,55E+01	DSO
19	1,58	3,96E+05	6,84E+05	1,73	4,98E+05	2,51E-01	3,93E+01	DSO
20	1,26	3,38E+05	5,92E+05	1,75	5,41E+05	2,51E-01	3,39E+01	DSO
21	1	2,89E+05	5,14E+05	1,78	5,89E+05	2,51E-01	2,93E+01	DSO
22	0,794	2,45E+05	4,43E+05	1,81	6,38E+05	2,51E-01	2,52E+01	DSO
23	0,631	2,09E+05	3,83E+05	1,83	6,91E+05	2,51E-01	2,17E+01	DSO
24	0,501	1,78E+05	3,31E+05	1,85	7,50E+05	2,51E-01	1,87E+01	DSO
25	0,398	1,52E+05	2,86E+05	1,88	8,14E+05	2,51E-01	1,61E+01	DSO
26	0,316	1,28E+05	2,47E+05	1,93	8,81E+05	2,51E-01	1,38E+01	DSO
27	0,251	1,11E+05	2,13E+05	1,92	9,57E+05	2,51E-01	1,19E+01	DSO
28	0,2	9,47E+04	1,82E+05	1,93	1,03E+06	2,51E-01	1,02E+01	DSO
29	0,158	7,96E+04	1,57E+05	1,97	1,11E+06	2,51E-01	8,76E+00	DSO
30	0,126	6,82E+04	1,37E+05	2	1,22E+06	2,51E-01	7,60E+00	DSO
31	0,1	5,85E+04	1,17E+05	2	1,31E+06	2,51E-01	6,50E+00	DSO

Data Series Information

Name:	FS_5070H_16C_8mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(2,-1); Adj(54,0)d
Measuring Date/Time:	07/07/2015; 17:03
Measuring System:	PP08-SN26896; [d=2 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	0,41726634
- Norm. Css [Pa/mNm]:	10.062,96
- Start Delay Time [s]:	62,073
- Substance Density [rho]:	1.000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	1

Number of Data Points:		31						
Time Setting:		31 Meas. Pts.						
Measuring Profile:								
- Strain		Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec						
Normal Force		FN = 0 µN						
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	1,69E+07	1,52E+07	0,9	2,28E+05	2,52E-01	1,13E+03	DSO
2	79,4	1,50E+07	1,39E+07	0,924	2,58E+05	2,51E-01	1,01E+03	DSO
3	63,1	1,33E+07	1,26E+07	0,949	2,91E+05	2,51E-01	9,11E+02	DSO
4	50,1	1,18E+07	1,15E+07	0,974	3,28E+05	2,51E-01	8,16E+02	DSO
5	39,8	1,04E+07	1,04E+07	1	3,69E+05	2,51E-01	7,30E+02	DSO
6	31,6	9,15E+06	9,40E+06	1,03	4,15E+05	2,51E-01	6,52E+02	DSO
7	25,1	8,04E+06	8,48E+06	1,05	4,65E+05	2,51E-01	5,81E+02	DSO
8	20	7,06E+06	7,64E+06	1,08	5,21E+05	2,51E-01	5,17E+02	DSO
9	15,8	6,18E+06	6,86E+06	1,11	5,83E+05	2,51E-01	4,59E+02	DSO
10	12,6	5,40E+06	6,15E+06	1,14	6,50E+05	2,51E-01	4,07E+02	DSO
11	10	4,71E+06	5,50E+06	1,17	7,24E+05	2,51E-01	3,60E+02	DSO
12	7,94	4,10E+06	4,91E+06	1,2	8,06E+05	2,51E-01	3,18E+02	DSO
13	6,31	3,56E+06	4,38E+06	1,23	8,94E+05	2,51E-01	2,80E+02	DSO
14	5,01	3,09E+06	3,89E+06	1,26	9,92E+05	2,51E-01	2,47E+02	DSO
15	3,98	2,67E+06	3,45E+06	1,29	1,10E+06	2,51E-01	2,17E+02	DSO
16	3,16	2,31E+06	3,06E+06	1,32	1,21E+06	2,51E-01	1,91E+02	DSO
17	2,51	2,00E+06	2,70E+06	1,35	1,34E+06	2,51E-01	1,67E+02	DSO
18	2	1,72E+06	2,39E+06	1,39	1,48E+06	2,51E-01	1,46E+02	DSO
19	1,58	1,48E+06	2,10E+06	1,42	1,62E+06	2,51E-01	1,28E+02	DSO
20	1,26	1,28E+06	1,85E+06	1,45	1,79E+06	2,51E-01	1,12E+02	DSO
21	1	1,10E+06	1,63E+06	1,48	1,96E+06	2,51E-01	9,74E+01	DSO
22	0,794	9,45E+05	1,42E+06	1,51	2,15E+06	2,51E-01	8,49E+01	DSO
23	0,631	8,10E+05	1,25E+06	1,54	2,36E+06	2,51E-01	7,39E+01	DSO
24	0,501	6,96E+05	1,09E+06	1,57	2,59E+06	2,51E-01	6,44E+01	DSO
25	0,398	6,02E+05	9,54E+05	1,58	2,83E+06	2,51E-01	5,61E+01	DSO
26	0,316	5,11E+05	8,31E+05	1,62	3,09E+06	2,51E-01	4,85E+01	DSO
27	0,251	4,41E+05	7,28E+05	1,65	3,39E+06	2,51E-01	4,23E+01	DSO
28	0,2	3,77E+05	6,40E+05	1,7	3,72E+06	2,51E-01	3,69E+01	DSO
29	0,158	3,26E+05	5,60E+05	1,72	4,09E+06	2,51E-01	3,22E+01	DSO
30	0,126	2,81E+05	4,90E+05	1,74	4,49E+06	2,51E-01	2,81E+01	DSO
31	0,1	2,39E+05	4,23E+05	1,77	4,86E+06	2,51E-01	2,42E+01	DSO

Grafico 8.2. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

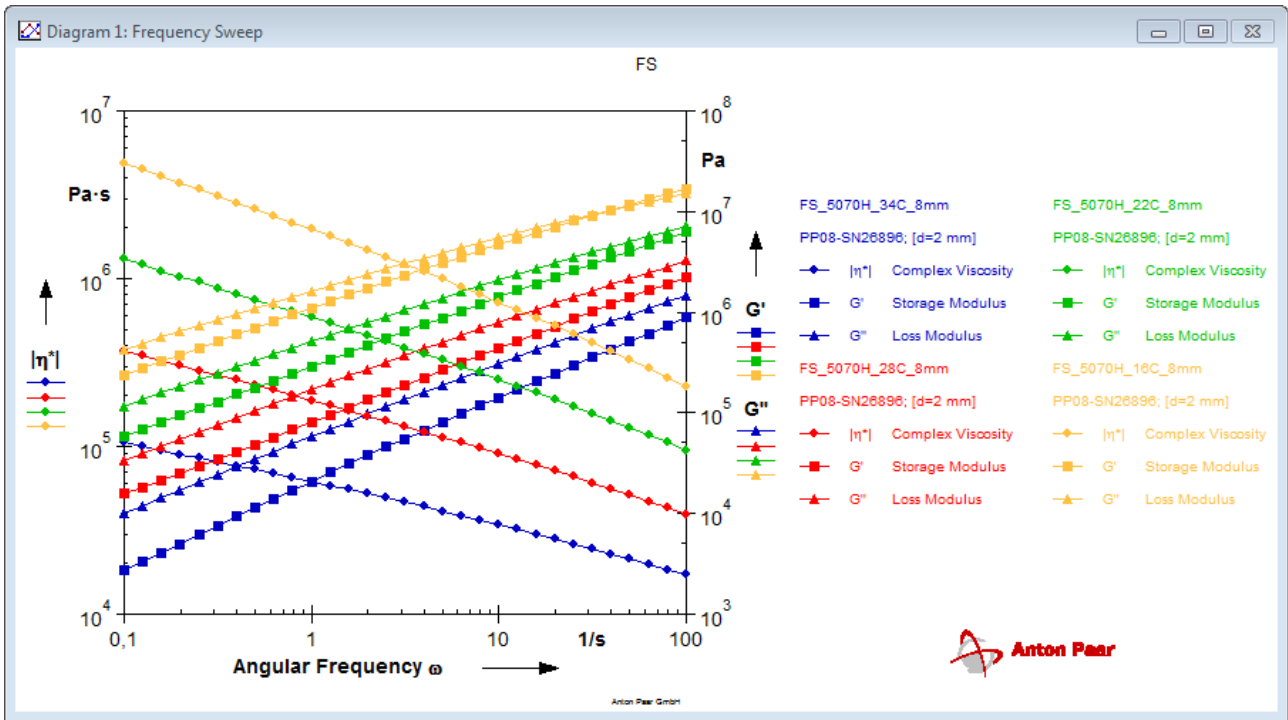


Tabella 8.3. Risultati Frequency Sweep Test - Alte temperature

Data Series Information	
Name:	FS_5070H_34C_20mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(43,0)d
Measuring Date/Time:	02/07/2015; 14:18
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818
- Norm. Css [Pa/mNm]:	638,48
- Start Delay Time [s]:	62,166
- Substance Density [rho]:	1.000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	1
Number of Data Points:	31
Time Setting:	31 Meas. Pts.
Measuring Profile:	
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec
Normal Force	FN = 0 μN

Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[μNm]	---
1	100	5,63E+05	1,22E+06	2,16E+00	1,34E+04	5,01E-02	1,05E+03	DSO
2	79,4	4,64E+05	1,03E+06	2,23E+00	1,43E+04	4,98E-02	8,84E+02	DSO
3	63,1	3,83E+05	8,76E+05	2,29E+00	1,52E+04	5,02E-02	7,51E+02	DSO
4	50,1	3,13E+05	7,41E+05	2,37E+00	1,61E+04	5,00E-02	6,30E+02	DSO
5	39,8	2,56E+05	6,25E+05	2,44E+00	1,70E+04	5,01E-02	5,29E+02	DSO
6	31,6	2,10E+05	5,27E+05	2,52E+00	1,79E+04	5,01E-02	4,44E+02	DSO
7	25,1	1,71E+05	4,44E+05	2,59E+00	1,89E+04	5,01E-02	3,72E+02	DSO
8	20	1,39E+05	3,73E+05	2,67E+00	1,99E+04	5,00E-02	3,11E+02	DSO
9	15,8	1,13E+05	3,12E+05	2,75E+00	2,10E+04	5,00E-02	2,60E+02	DSO
10	12,6	9,21E+04	2,62E+05	2,84E+00	2,20E+04	5,01E-02	2,17E+02	DSO
11	10	7,46E+04	2,19E+05	2,93E+00	2,31E+04	5,00E-02	1,81E+02	DSO
12	7,94	6,04E+04	1,83E+05	3,02E+00	2,42E+04	5,00E-02	1,51E+02	DSO
13	6,31	4,88E+04	1,52E+05	3,12E+00	2,53E+04	5,00E-02	1,25E+02	DSO
14	5,01	3,93E+04	1,27E+05	3,22E+00	2,65E+04	5,00E-02	1,04E+02	DSO
15	3,98	3,16E+04	1,05E+05	3,34E+00	2,76E+04	5,00E-02	8,62E+01	DSO
16	3,16	2,54E+04	8,75E+04	3,45E+00	2,88E+04	5,00E-02	7,13E+01	DSO
17	2,51	2,02E+04	7,24E+04	3,58E+00	2,99E+04	5,00E-02	5,89E+01	DSO
18	2	1,61E+04	5,99E+04	3,71E+00	3,11E+04	5,00E-02	4,86E+01	DSO
19	1,58	1,28E+04	4,95E+04	3,86E+00	3,22E+04	5,00E-02	4,00E+01	DSO
20	1,26	1,01E+04	4,08E+04	4,03E+00	3,34E+04	5,00E-02	3,29E+01	DSO
21	1	7,99E+03	3,36E+04	4,21E+00	3,46E+04	5,00E-02	2,71E+01	DSO
22	0,794	6,30E+03	2,77E+04	4,39E+00	3,57E+04	5,00E-02	2,22E+01	DSO
23	0,631	4,93E+03	2,28E+04	4,62E+00	3,69E+04	5,00E-02	1,83E+01	DSO
24	0,501	3,85E+03	1,87E+04	5	3,81E+04	5,00E-02	1,50E+01	DSO
25	0,398	3,00E+03	1,53E+04	5,12E+00	3,93E+04	5,00E-02	1,22E+01	DSO
26	0,316	2,31E+03	1,26E+04	5,43E+00	4,04E+04	5,00E-02	1,00E+01	DSO
27	0,251	1,77E+03	1,02E+04	5,77E+00	4,13E+04	5,00E-02	8,12E+00	DSO
28	0,2	1,36E+03	8,31E+03	6,09E+00	4,22E+04	5,00E-02	6,60E+00	DSO
29	0,158	1,03E+03	6,78E+03	6,58E+00	4,32E+04	5,00E-02	5,37E+00	DSO
30	0,126	7,68E+02	5,47E+03	7,13E+00	4,39E+04	5,00E-02	4,33E+00	DSO
31	0,1	5,98E+02	4,45E+03	7,45E+00	4,49E+04	5,00E-02	3,52E+00	DSO
Data Series Information								
Name:	FS_5070H_40C_20mm							
Number of Intervals:	1							
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024							
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-); Adj(43,0)d							
Measuring Date/Time:	02/07/2015; 14:41							
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]							
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097							
Calculating Constants:								
- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818							

- Norm. Csx [Pa/mNm]:	638,48							
- Start Delay Time [s]:	62,166							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	31							
Time Setting:	31 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec							
Normal Force	FN = 0 µN							
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	2,07E+05	5,43E+05	2,62	5,81E+03	5,02E-02	4,56E+02	DSO
2	79,4	1,68E+05	4,54E+05	2,7	6,09E+03	4,98E-02	3,77E+02	DSO
3	63,1	1,36E+05	3,79E+05	2,78	6,39E+03	5,00E-02	3,16E+02	DSO
4	50,1	1,10E+05	3,16E+05	2,88	6,67E+03	5,00E-02	2,62E+02	DSO
5	39,8	8,81E+04	2,62E+05	2,97	6,95E+03	5,01E-02	2,17E+02	DSO
6	31,6	7,08E+04	2,17E+05	3,07	7,23E+03	5,00E-02	1,79E+02	DSO
7	25,1	5,67E+04	1,80E+05	3,17	7,51E+03	5,00E-02	1,48E+02	DSO
8	20	4,54E+04	1,49E+05	3,28	7,80E+03	5,00E-02	1,22E+02	DSO
9	15,8	3,63E+04	1,23E+05	3,39	8,09E+03	5,00E-02	1,00E+02	DSO
10	12,6	2,89E+04	1,02E+05	3,51	8,38E+03	5,00E-02	8,26E+01	DSO
11	10	2,30E+04	8,37E+04	3,64	8,68E+03	5,00E-02	6,80E+01	DSO
12	7,94	1,82E+04	6,89E+04	3,78	8,97E+03	5,00E-02	5,58E+01	DSO
13	6,31	1,44E+04	5,67E+04	3,94	9,27E+03	5,00E-02	4,58E+01	DSO
14	5,01	1,13E+04	4,66E+04	4,1	9,56E+03	5,00E-02	3,75E+01	DSO
15	3,98	8,92E+03	3,82E+04	4,28	9,85E+03	5,00E-02	3,07E+01	DSO
16	3,16	6,99E+03	3,13E+04	4,48	1,01E+04	5,00E-02	2,51E+01	DSO
17	2,51	5,45E+03	2,56E+04	4,7	1,04E+04	5,00E-02	2,05E+01	DSO
18	2	4,21E+03	2,08E+04	4,95	1,07E+04	5,00E-02	1,66E+01	DSO
19	1,58	3,24E+03	1,69E+04	5,24	1,09E+04	5,00E-02	1,35E+01	DSO
20	1,26	2,49E+03	1,38E+04	5,53	1,11E+04	5,00E-02	1,10E+01	DSO
21	1	1,90E+03	1,12E+04	5,88	1,13E+04	5,00E-02	8,87E+00	DSO
22	0,794	1,45E+03	9,04E+03	6,26	1,15E+04	5,00E-02	7,17E+00	DSO
23	0,631	1,09E+03	7,32E+03	6,7	1,17E+04	5,00E-02	5,79E+00	DSO
24	0,501	8,24E+02	5,91E+03	7,17	1,19E+04	5,00E-02	4,68E+00	DSO
25	0,398	6,17E+02	4,77E+03	7,74	1,21E+04	5,00E-02	3,77E+00	DSO
26	0,316	4,64E+02	3,85E+03	8,29	1,23E+04	5,00E-02	3,04E+00	DSO
27	0,251	3,44E+02	3,09E+03	8,99	1,24E+04	5,00E-02	2,44E+00	DSO
28	0,2	2,48E+02	2,47E+03	9,97	1,24E+04	5,00E-02	1,94E+00	DSO
29	0,158	1,81E+02	1,98E+03	11	1,26E+04	5,00E-02	1,56E+00	DSO

30	0,126	1,34E+02	1,58E+03	11,8	1,26E+04	5,00E-02	1,24E+00	DSO
31	0,1	9,74E+01	1,27E+03	13	1,27E+04	5,00E-02	9,96E-01	DSO
Data Series Information								
Name:	FS_5070H_46C_20mm							
Number of Intervals:	1							
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024							
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(43,0)d							
Measuring Date/Time:	02/07/2015; 15:04							
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]							
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097							
Calculating Constants:								
- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818							
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	638,48							
- Start Delay Time [s]:	62,166							
- Substance Density [rho]:	1.000							
- Measurement Type:	1							
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06							
- Position [m]:	1,00E-06							
Interval:	1							
Number of Data Points:	31							
Time Setting:	31 Meas. Pts.							
Measuring Profile:								
- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec							
Normal Force	FN = 0 µN							
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	6,56E+04	2,15E+05	3,27	2,24E+03	5,02E-02	1,76E+02	DSO
2	79,4	5,25E+04	1,78E+05	3,38	2,33E+03	4,99E-02	1,44E+02	DSO
3	63,1	4,20E+04	1,47E+05	3,49	2,42E+03	5,01E-02	1,19E+02	DSO
4	50,1	3,33E+04	1,21E+05	3,62	2,50E+03	5,01E-02	9,80E+01	DSO
5	39,8	2,63E+04	9,90E+04	3,76	2,57E+03	5,00E-02	8,03E+01	DSO
6	31,6	2,08E+04	8,12E+04	3,9	2,65E+03	5,00E-02	6,57E+01	DSO
7	25,1	1,64E+04	6,66E+04	4,06	2,73E+03	5,00E-02	5,37E+01	DSO
8	20	1,30E+04	5,45E+04	4,21	2,81E+03	5,00E-02	4,39E+01	DSO
9	15,8	1,02E+04	4,46E+04	4,39	2,89E+03	5,00E-02	3,58E+01	DSO
10	12,6	7,94E+03	3,65E+04	4,59	2,96E+03	5,00E-02	2,92E+01	DSO
11	10	6,19E+03	2,98E+04	4,81	3,04E+03	5,00E-02	2,38E+01	DSO
12	7,94	4,81E+03	2,43E+04	5,05	3,11E+03	5,00E-02	1,94E+01	DSO
13	6,31	3,72E+03	1,98E+04	5,32	3,19E+03	5,00E-02	1,57E+01	DSO
14	5,01	2,86E+03	1,61E+04	5,62	3,26E+03	5,00E-02	1,28E+01	DSO
15	3,98	2,19E+03	1,30E+04	5,96	3,32E+03	5,00E-02	1,04E+01	DSO
16	3,16	1,67E+03	1,06E+04	6,33	3,39E+03	5,00E-02	8,39E+00	DSO

17	2,51	1,27E+03	8,57E+03	6,74	3,45E+03	5,00E-02	6,79E+00	DSO
18	2	9,64E+02	6,94E+03	7,19	3,51E+03	5,00E-02	5,49E+00	DSO
19	1,58	7,23E+02	5,60E+03	7,74	3,56E+03	5,00E-02	4,42E+00	DSO
20	1,26	5,41E+02	4,50E+03	8,32	3,60E+03	5,00E-02	3,55E+00	DSO
21	1	3,98E+02	3,62E+03	9,09	3,64E+03	5,00E-02	2,85E+00	DSO
22	0,794	2,96E+02	2,90E+03	9,81	3,67E+03	5,00E-02	2,28E+00	DSO
23	0,631	2,16E+02	2,33E+03	10,8	3,70E+03	5,00E-02	1,83E+00	DSO
24	0,501	1,50E+02	1,86E+03	12,4	3,73E+03	5,00E-02	1,46E+00	DSO
25	0,398	1,12E+02	1,48E+03	13,3	3,73E+03	5,00E-02	1,16E+00	DSO
26	0,316	8,38E+01	1,20E+03	14,3	3,80E+03	5,00E-02	9,40E-01	DSO
27	0,251	5,69E+01	9,49E+02	16,7	3,78E+03	5,00E-02	7,44E-01	DSO
28	0,2	4,55E+01	7,58E+02	16,7	3,81E+03	5,00E-02	5,95E-01	DSO
29	0,158	3,12E+01	6,04E+02	19,3	3,82E+03	5,00E-02	4,74E-01	DSO
30	0,126	1,79E+01	4,85E+02	27	3,85E+03	5,00E-02	3,80E-01	DSO
31	0,1	1,01E+01	3,83E+02	38	3,83E+03	5,00E-02	3,00E-01	DSO

Data Series Information

Name:	FS 5070H 52C 20mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(43,0)d
Measuring Date/Time:	02/07/2015; 15:27
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818
- Norm. Css [Pa/mNm]:	638,48
- Start Delay Time [s]:	62,166
- Substance Density [rho]:	1.000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	1
Number of Data Points:	31
Time Setting:	31 Meas. Pts.

Measuring Profile:

- Strain	Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec
Normal Force	FN = 0 µN

Results

Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	2,18E+04	8,83E+04	4,06	9,09E+02	5,01E-02	7,14E+01	DSO
2	79,4	1,71E+04	7,24E+04	4,23	9,37E+02	4,98E-02	5,81E+01	DSO
3	63,1	1,33E+04	5,95E+04	4,47	9,67E+02	4,99E-02	4,76E+01	DSO

4	50,1	1,06E+04	4,85E+04	4,57	9,90E+02	5,00E-02	3,88E+01	DSO
5	39,8	8,27E+03	3,95E+04	4,78	1,01E+03	5,00E-02	3,16E+01	DSO
6	31,6	6,41E+03	3,21E+04	5,01	1,04E+03	5,00E-02	2,57E+01	DSO
7	25,1	4,96E+03	2,61E+04	5,26	1,06E+03	5,00E-02	2,08E+01	DSO
8	20	3,83E+03	2,12E+04	5,54	1,08E+03	5,00E-02	1,69E+01	DSO
9	15,8	2,93E+03	1,72E+04	5,87	1,10E+03	5,00E-02	1,37E+01	DSO
10	12,6	2,25E+03	1,39E+04	6,2	1,12E+03	5,00E-02	1,11E+01	DSO
11	10	1,71E+03	1,13E+04	6,6	1,14E+03	5,00E-02	8,94E+00	DSO
12	7,94	1,30E+03	9,11E+03	7,03	1,16E+03	5,00E-02	7,21E+00	DSO
13	6,31	9,79E+02	7,35E+03	7,51	1,18E+03	5,00E-02	5,81E+00	DSO
14	5,01	7,38E+02	5,92E+03	8,02	1,19E+03	5,00E-02	4,68E+00	DSO
15	3,98	5,49E+02	4,77E+03	8,68	1,21E+03	5,00E-02	3,76E+00	DSO
16	3,16	4,07E+02	3,84E+03	9,44	1,22E+03	5,00E-02	3,02E+00	DSO
17	2,51	3,02E+02	3,08E+03	10,2	1,23E+03	5,00E-02	2,43E+00	DSO
18	2	2,25E+02	2,48E+03	11	1,25E+03	5,00E-02	1,95E+00	DSO
19	1,58	1,64E+02	1,98E+03	12,1	1,26E+03	5,00E-02	1,56E+00	DSO
20	1,26	1,19E+02	1,59E+03	13,4	1,27E+03	5,00E-02	1,25E+00	DSO
21	1	8,51E+01	1,27E+03	14,9	1,27E+03	5,00E-02	9,96E-01	DSO
22	0,794	6,19E+01	1,02E+03	16,4	1,28E+03	5,00E-02	7,97E-01	DSO
23	0,631	4,56E+01	8,14E+02	17,9	1,29E+03	5,00E-02	6,38E-01	DSO
24	0,501	3,17E+01	6,49E+02	20,5	1,30E+03	5,00E-02	5,09E-01	DSO
25	0,398	2,23E+01	5,14E+02	23	1,29E+03	5,00E-02	4,03E-01	DSO
26	0,316	1,49E+01	4,08E+02	27,3	1,29E+03	5,00E-02	3,19E-01	DSO
27	0,251	8,86E+00	3,25E+02	36,6	1,29E+03	5,00E-02	2,54E-01	DSO
28	0,2	8,38E+00	2,57E+02	30,6	1,29E+03	5,00E-02	2,01E-01	DSO
29	0,158	5,31E+00	2,03E+02	38,3	1,28E+03	5,00E-02	1,59E-01	DSO
30	0,126	3,30E+00	1,62E+02	49,1	1,29E+03	5,00E-02	1,27E-01	DSO
31	0,1	2,07E+00	1,27E+02	61,6	1,27E+03	5,00E-02	9,98E-02	DSO

Data Series Information

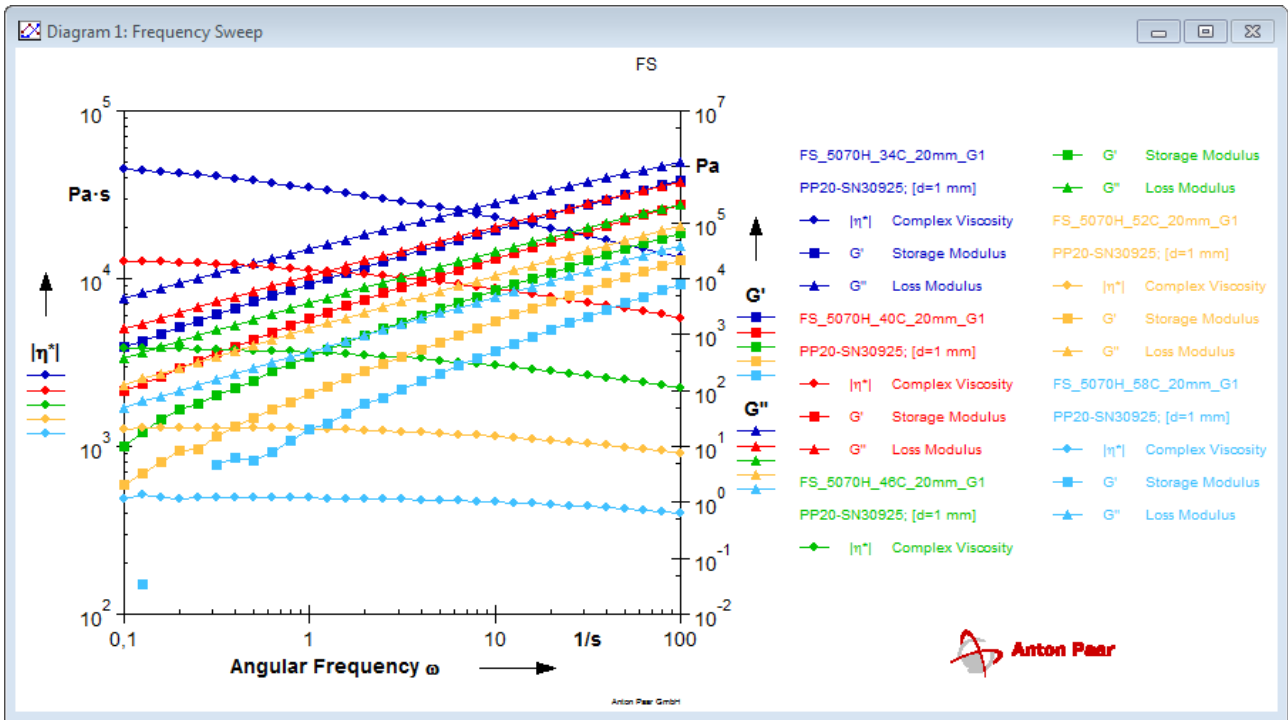
Name:	FS_5070H_58C_20mm
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(43,0)d
Measuring Date/Time:	02/07/2015; 15:50
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	638,48
- Start Delay Time [s]:	62,166
- Substance Density [rho]:	1.000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	1

Number of Data Points:		31						
Time Setting:		31 Meas. Pts.						
Measuring Profile:								
- Strain		Amplitude gamma = 0,05 % Angular Frequency omega = 100 ... 0,1 rad/s log; Slope = 10 Pt. / dec						
Normal Force		FN = 0 µN						
Results								
Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[µNm]	---
1	100	7,96E+03	3,91E+04	4,91	3,99E+02	5,01E-02	3,13E+01	DSO
2	79,4	6,12E+03	3,18E+04	5,19	4,08E+02	5,00E-02	2,53E+01	DSO
3	63,1	4,64E+03	2,59E+04	5,58	4,17E+02	5,00E-02	2,06E+01	DSO
4	50,1	3,61E+03	2,10E+04	5,81	4,24E+02	5,00E-02	1,66E+01	DSO
5	39,8	2,75E+03	1,70E+04	6,17	4,31E+02	5,00E-02	1,35E+01	DSO
6	31,6	2,09E+03	1,37E+04	6,57	4,38E+02	5,00E-02	1,09E+01	DSO
7	25,1	1,58E+03	1,11E+04	6,99	4,45E+02	5,00E-02	8,75E+00	DSO
8	20	1,19E+03	8,91E+03	7,49	4,50E+02	5,00E-02	7,04E+00	DSO
9	15,8	8,97E+02	7,18E+03	8	4,56E+02	5,00E-02	5,67E+00	DSO
10	12,6	6,66E+02	5,77E+03	8,67	4,61E+02	5,00E-02	4,55E+00	DSO
11	10	5,05E+02	4,63E+03	9,18	4,66E+02	5,00E-02	3,65E+00	DSO
12	7,94	3,75E+02	3,72E+03	9,91	4,70E+02	5,00E-02	2,93E+00	DSO
13	6,31	2,78E+02	2,98E+03	10,7	4,74E+02	5,00E-02	2,34E+00	DSO
14	5,01	2,00E+02	2,38E+03	11,9	4,77E+02	5,00E-02	1,87E+00	DSO
15	3,98	1,46E+02	1,90E+03	13	4,80E+02	5,00E-02	1,50E+00	DSO
16	3,16	1,02E+02	1,53E+03	14,9	4,84E+02	5,00E-02	1,20E+00	DSO
17	2,51	7,48E+01	1,22E+03	16,3	4,86E+02	5,00E-02	9,57E-01	DSO
18	2	5,66E+01	9,70E+02	17,1	4,87E+02	5,00E-02	7,61E-01	DSO
19	1,58	3,76E+01	7,73E+02	20,6	4,88E+02	5,00E-02	6,06E-01	DSO
20	1,26	2,63E+01	6,14E+02	23,4	4,88E+02	5,00E-02	4,82E-01	DSO
21	1	2,00E+01	4,91E+02	24,5	4,91E+02	5,00E-02	3,84E-01	DSO
22	0,794	1,29E+01	3,90E+02	30,3	4,92E+02	5,00E-02	3,06E-01	DSO
23	0,631	7,98E+00	3,12E+02	39,1	4,95E+02	5,00E-02	2,44E-01	DSO
24	0,501	5,48E+00	2,51E+02	45,7	5,00E+02	5,00E-02	1,96E-01	DSO
25	0,398	6,30E+00	1,97E+02	31,3	4,96E+02	5,00E-02	1,55E-01	DSO
26	0,316	4,72E+00	1,56E+02	33	4,93E+02	5,00E-02	1,22E-01	DSO
27	0,251	0,00E+00	1,24E+02	1,00E+30	4,93E+02	5,00E-02	9,69E-02	ME-,taD
28	0,2	0,00E+00	9,78E+01	1,00E+30	4,90E+02	5,00E-02	7,66E-02	ME-,taD
29	0,158	0,00E+00	7,91E+01	1,00E+30	4,99E+02	5,00E-02	6,20E-02	ME-,taD
30	0,126	3,32E-02	6,55E+01	1,970	5,20E+02	5,00E-02	5,13E-02	ME-,DSO
31	0,1	0,00E+00	4,87E+01	1,00E+30	4,87E+02	5,00E-02	3,82E-02	ME-,taD

Grafico 8.3. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



Per quanto riguarda i test M.S.C.R., per motivi di brevità si riportano soltanto 2 stralci dei risultati di una singola temperatura. I test vengono comunque sviluppati a 4 temperature diverse per ogni campione: l'influenza della temperatura è apprezzabile nel grafico successivo.

Tabella 8.4a. Risultati M.S.C.R. Test - [T = 58 °C] - Parte 1 [Ciclo 1 - τ = 0.1 kPa]

Data Series Information	
Name:	MSCR_5070H_58C_20mm
Number of Intervals:	82
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005813-33024
Device:	MCR302 SN81026470; FW3.70; Slot(3,-1); Adj(54,0)d
Measuring Date/Time:	13/07/2015; 16:47
Measuring System:	PP20-SN30925; [d=1 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD200-SN81028641-81023097
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	1,0461818
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	638,48
- Start Delay Time [s]:	11,794
- Substance Density [rho]:	1.000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	1
Number of Data Points:	0
Time Setting:	1 Meas. Pts., Reject Meas. Pt. Duration 15 min
Measuring Profile:	
Temperature	T[-1] = 58 °C
Interval:	2
Number of Data Points:	1

Time Setting:			1 Meas. Pts.				
Measuring Profile:							
Results							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	903	9,01E+02	0,00E+00	-3,39E-02	0,00E+00	0,00E+00	M-
Interval:			3,00E+00				
Number of Data Points:			1,00E+01				
Time Setting:			10 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,1 s				
Measuring Profile:							
Shear Stress			tau=0,1 kPa				
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	903	9,03E+02	1,00E+02	-2,16E-02	-2,16E-04	1,57E+02	
2	903	9,03E+02	1,00E+02	-3,64E-03	-3,64E-05	1,57E+02	
3	903	9,03E+02	1,00E+02	1,37E-02	1,37E-04	1,57E+02	
4	903	9,03E+02	1,00E+02	3,06E-02	3,06E-04	1,57E+02	
5	903	9,03E+02	1,00E+02	4,75E-02	4,75E-04	1,57E+02	
6	903	9,03E+02	1,00E+02	6,42E-02	6,42E-04	1,57E+02	
7	903	9,03E+02	1,00E+02	0	8,10E-04	1,57E+02	
8	903	9,03E+02	1,00E+02	9,76E-02	9,76E-04	1,57E+02	
9	903	9,03E+02	1,00E+02	1,14E-01	1,14E-03	1,57E+02	
10	904	9,03E+02	1,00E+02	1,31E-01	1,31E-03	1,57E+02	
Interval:			4,00E+00				
Number of Data Points:			1,50E+01				
Time Setting:			15 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,01 s				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	904	9,04E+02	5,02E-03	1,36E-01	27,1	0,00786	M-
2	904	9,04E+02	2,54E-08	1,36E-01	5.380.000	3,97E-08	M-
3	904	9,04E+02	1,28E-13	1,36E-01	0	2,01E-13	M-
4	904	9,04E+02	6,48E-19	1,36E-01	0	1,01E-18	M-
5	904	904	3,28E-24	0,136	0	5,13E-24	M-
6	904	904	1,66E-29	0,135	0	2,59E-29	M-
7	904	904	0,00	0,135	0	0	M-
8	904	904	0	0,135	0	0	M-
9	904	904	0	0,134	0	0	M-
10	904	904	0	0,134	0	0	M-
11	904	904	0,00E+00	0,134	0	0	M-
12	904	904	0,00E+00	0,134	0	0	M-
13	904	904	0	0,134	0	0	M-
14	904	904	0	0,134	0	0	M-
15	904	904	0	0,134	0	0	M-
Interval:			5				
Number of Data Points:			1				
Time Setting:			1 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,3 s				
Measuring Profile:							

Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μ Nm]	[]
1	904	9,04E+02	0,00E+00	0,132	0,00E+00	0,00E+00	M-
Interval:			6,00E+00				
Number of Data Points:			1,90E+01				
Time Setting:			19 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,45 s				
Event Control:			Standard Mode				
10 Loop(s) over 4 interval(s),if end of interval				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μ Nm]	[]
1	904	9,04E+02	0,00E+00	0,13	0,00E+00	0,00E+00	M-
2	905	9,05E+02	0,00E+00	0,13	0,00E+00	0,00E+00	M-
3	905	9,05E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
4	906	9,06E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
5	906	9,06E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
6	907	9,07E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
7	907	9,07E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
8	908	9,07E+02	0,00E+00	0,129	0,00E+00	0,00E+00	M-
9	908	9,08E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
10	908	9,08E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
11	909	9,09E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
12	909	9,09E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
13	910	9,10E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
14	910	9,10E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
15	911	9,11E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
16	911	9,11E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
17	912	9,11E+02	0,00E+00	0,128	0,00E+00	0,00E+00	M-
18	912	912	0	0,128	0	0	M-
19	913	912	0	0,128	0	0	M-
.....							

Tabella 8.4b. Risultati M.S.C.R. Test - [$T = 58 \text{ }^\circ\text{C}$] - Parte 2 [Ciclo 1 - $\tau = 3.2 \text{ kPa}$]

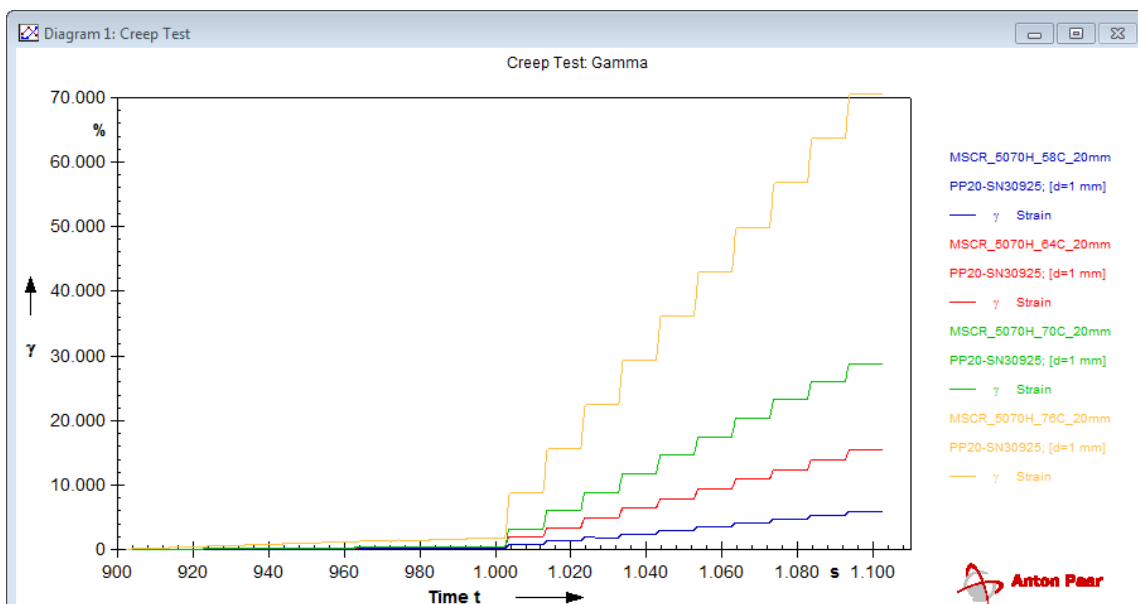
Interval:			43 (7)				
Number of Data Points:			10				
Time Setting:			10 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,1 s				
Measuring Profile:							
Shear Stress			tau = 3,2 kPa				
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μ Nm]	[]
1	1.000	1.000	3.200	1,99	0,000621	5.010	
2	1.000	1.000	3.200	2,57	0,000804	5.010	
3	1.000	1.000	3.200	3,14	0,000982	5.010	
4	1.000	1.000	3.200	3,71	0,00116	5.010	
5	1.000	1.000	3.200	4,28	0,00134	5.010	
6	1.000	1.000	3.200	4,84	0,00151	5.010	
7	1.000	1.000	3.200	5,42	0,00169	5.010	
8	1.000	1.000	3.200	5,98	0,00187	5.010	
9	1.000	1.000	3.200	6,55	0,00205	5.010	

10	1.000	1.000	3.200	7,13	0,00223	5.010	
Interval:			44 (8)				
Number of Data Points:			15				
Time Setting:			15 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,01 s				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	1.000	1.000	0,181	7,32	40,3	0,284	
2	1.000	1.000	0,00000917	7,33	7.990.000	0,00000144	M-
3	1.000	1.000	4,63E-12	7,33	0	7,26E-12	M-
4	1.000	1.000	2,34E-17	7,32	0	3,67E-17	M-
5	1.000	1.000	1,18E-22	7,31	0	1,85E-22	M-
6	1.000	1.000	5,99E-28	7,3	0	9,38E-28	M-
7	1.000	1.000	0	7,3	0	0	M-
8	1.000	1.000	0	7,29	0	0	M-
9	1.000	1.000	0	7,29	0	0	M-
10	1.000	1.000	0	7,29	0	0	M-
11	1.000	1.000	0	7,28	0	0	M-
12	1.000	1.000	0	7,28	0	0	M-
13	1.000	1.000	0	7,28	0	0	M-
14	1.000	1.000	0	7,28	0	0	M-
15	1.000	1.000	0	7,28	0	0	M-
Interval:							
Number of Data Points:			45 (9)				
Time Setting:			1 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,3 s				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	1.000	1.000	0	7,25	0	0	M-
Interval:							
Number of Data Points:			46 (10)				
Time Setting:			19 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,45 s				
Event Control:			Standard Mode				
10 Loop(s) over 4 interval(s),if end of interval				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μNm]	[]
1	1.000	1.000	0	7,24	0	0	M-
2	1.000	1.000	0	7,23	0	0	M-
3	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
4	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
5	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
6	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
7	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
8	1.010	1.010	0	7,23	0	0	M-
9	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-
10	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-
11	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-

12	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
13	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
14	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
15	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
16	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
17	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
18	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
19	1.010	1.010	0	7,22	0	0	M-		
Interval:			47 (7)						
Number of Data Points:			10						
Time Setting:			10 Meas. Pts.						
			Meas. Pt. Duration 0,1 s						
Measuring Profile:									
Shear Stress			tau = 3,2 kPa						
Meas. Pts.			Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[µNm]	[]		
1	1.010	1.010	3.200	7,62	0,00238	5.010			
2	1.010	1.010	3.200	8,21	0,00257	5.010			
3	1.010	1.010	3.200	8,78	0,00274	5.010			
4	1.010	1.010	3.200	9,35	0,00292	5.010			
5	1.010	1.010	3.200	9,92	0,0031	5.010			
6	1.010	1.010	3.200	10,5	0,00328	5.010			
7	1.010	1.010	3.200	11,1	0,00346	5.010			
8	1.010	1.010	3.200	11,6	0,00364	5.010			
9	1.010	1.010	3.200	12,2	0,00382	5.010			
10	1.010	1.010	3.200	12,8	0,004	5.010			
Interval:			48 (8)						
Number of Data Points:			15						
Time Setting:			15 Meas. Pts.						
			Meas. Pt. Duration 0,01 s						
Measuring Profile:									
Meas. Pts.			Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[µNm]	[]		
1	1.010	1.010	0,181	13	71,6	0,284			
2	1.010	1.010	0,000000917	13	14.200.000	0,00000144	M-		
3	1.010	1.010	4,63E-12	13	0	7,26E-12	M-		
4	1.010	1.010	2,34E-17	13	0	3,67E-17	M-		
5	1.010	1.010	1,18E-22	13	0	1,85E-22	M-		
6	1.010	1.010	5,99E-28	13	0	9,38E-28	M-		
7	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
8	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
9	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
10	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
11	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
12	1.010	1.010	0	13	0	0	M-		
13	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-		
14	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-		
15	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-		
Interval:			49 (9)						
Number of Data Points:			1						
Time Setting:			1 Meas. Pts.						
			Meas. Pt. Duration 0,3 s						

Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μ Nm]	[]
1	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-
Interval:			50 (10)				
Number of Data Points:			19				
Time Setting:			19 Meas. Pts.				
			Meas. Pt. Duration 0,45 s				
Event Control:			Standard Mode				
10 Loop(s) over 4 interval(s),...			...if end of interval				
Measuring Profile:							
Meas. Pts.	Time	Average Time	Shear Stress	Strain	Creep Compliance	Torque	Status
	[s]	[s]	[Pa]	[1]	[1/Pa]	[μ Nm]	[]
1	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-
2	1.010	1.010	0	12,9	0	0	M-
3	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
4	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
5	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
6	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
7	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
8	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
9	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
10	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
11	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
12	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
13	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
14	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
15	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
16	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
17	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
18	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-
19	1.020	1.020	0	12,9	0	0	M-

Grafico 8.4. *Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature*



8.1.2. Serie 50/70H_L100

Grafico 8.5. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

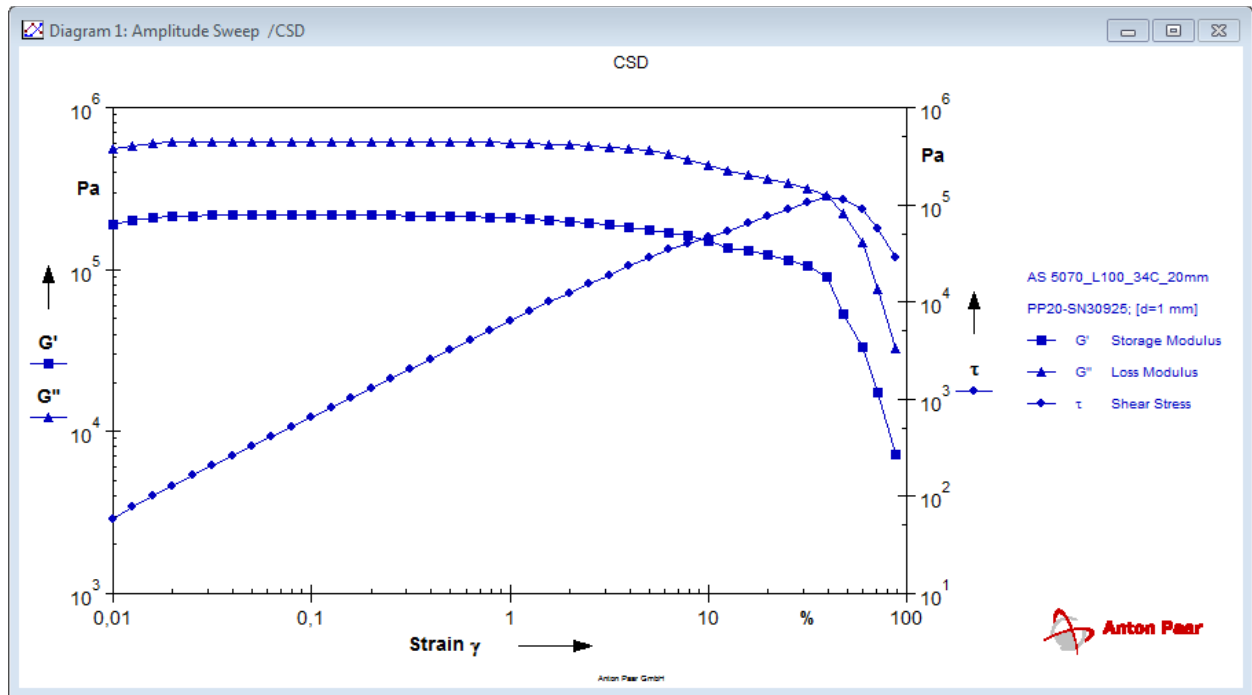


Grafico 8.6. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

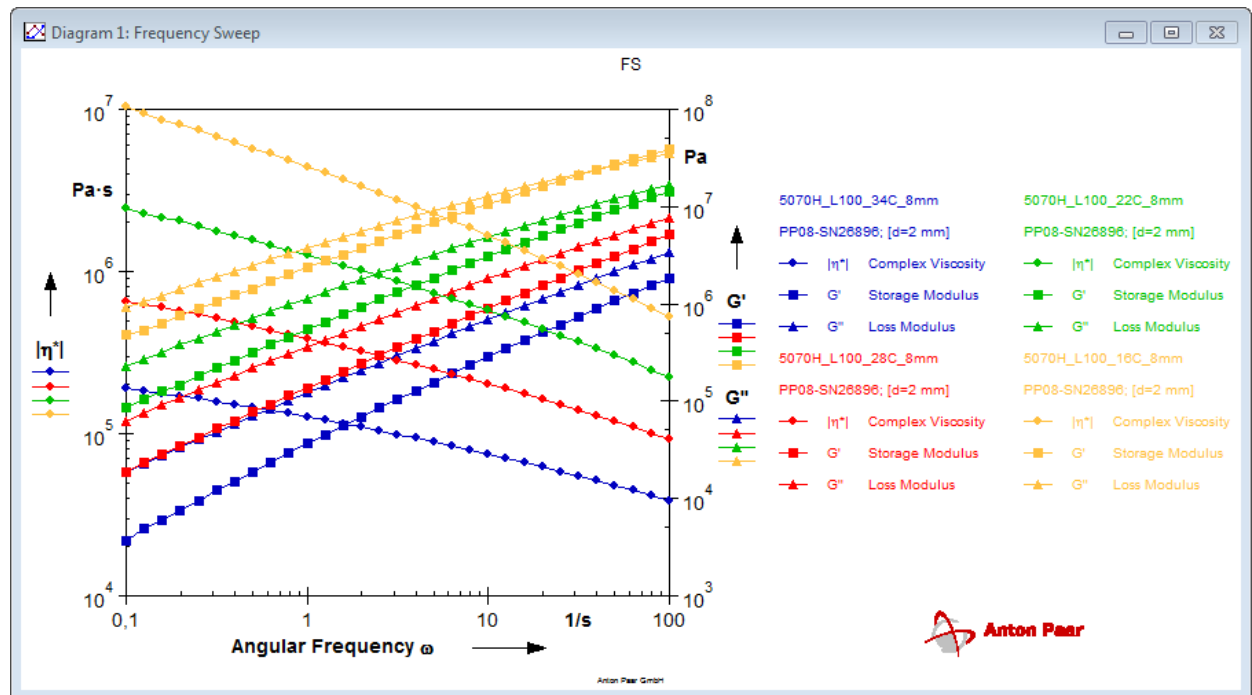


Grafico 8.7. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature

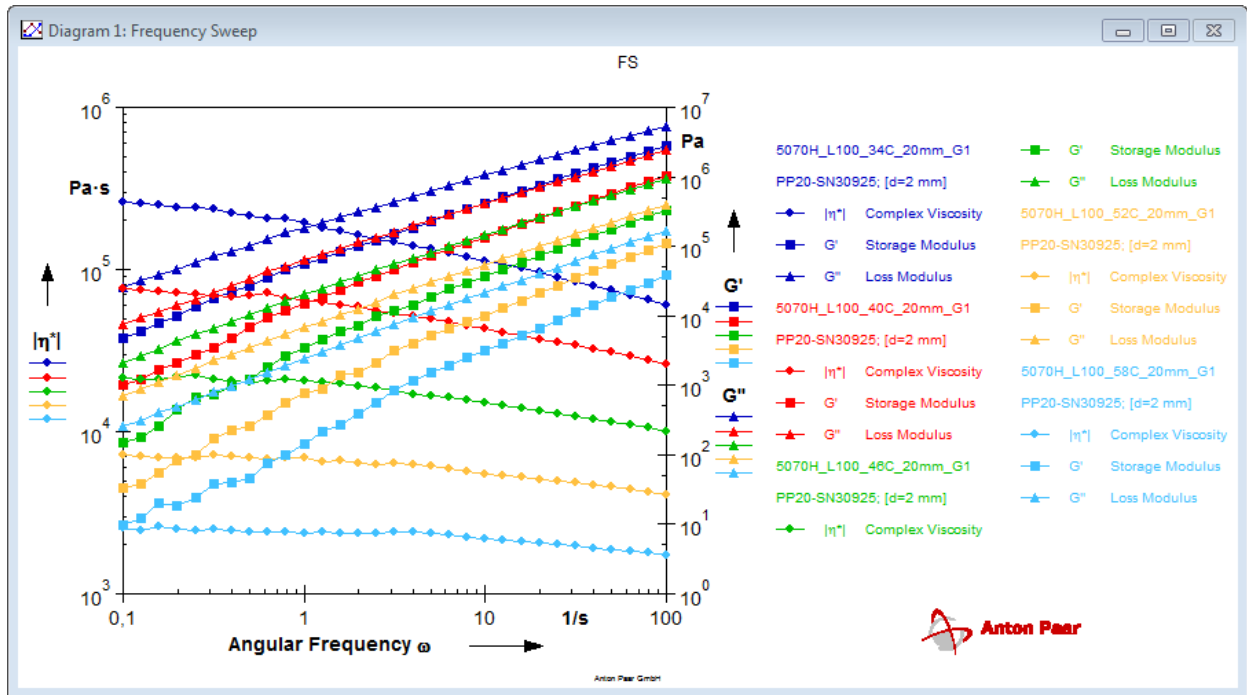
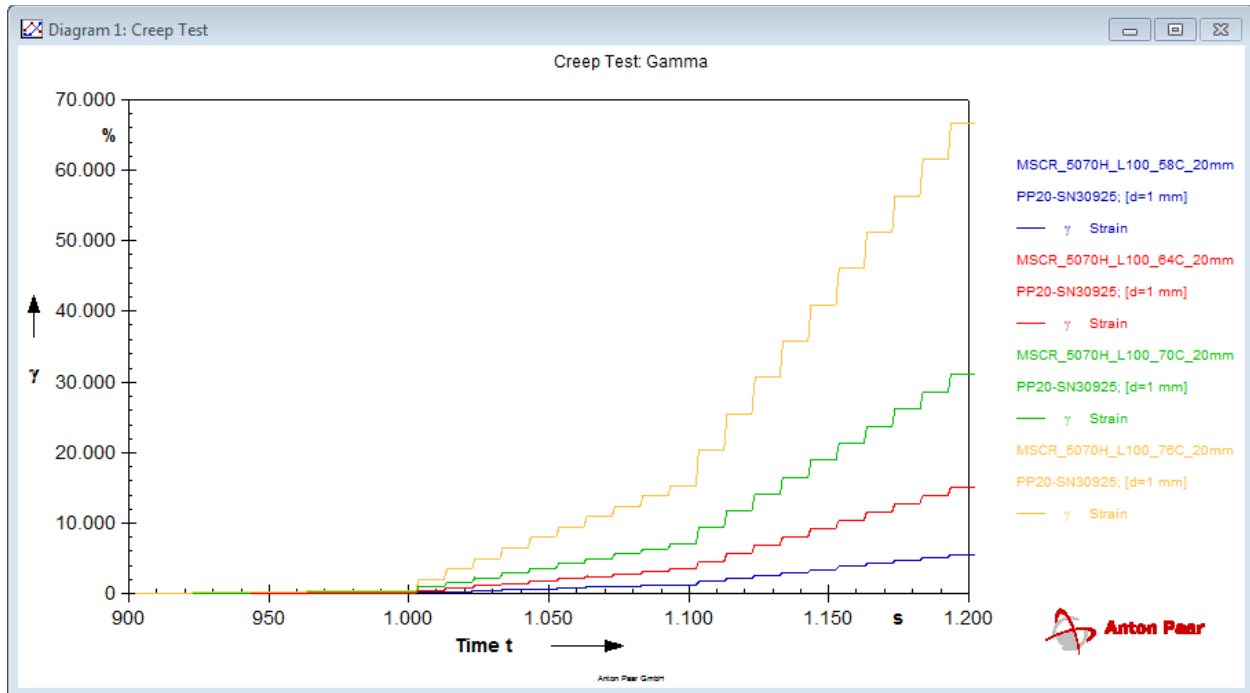


Grafico 8.8. Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature



8.1.3. Serie 50/70H_S100

Grafico 8.9. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

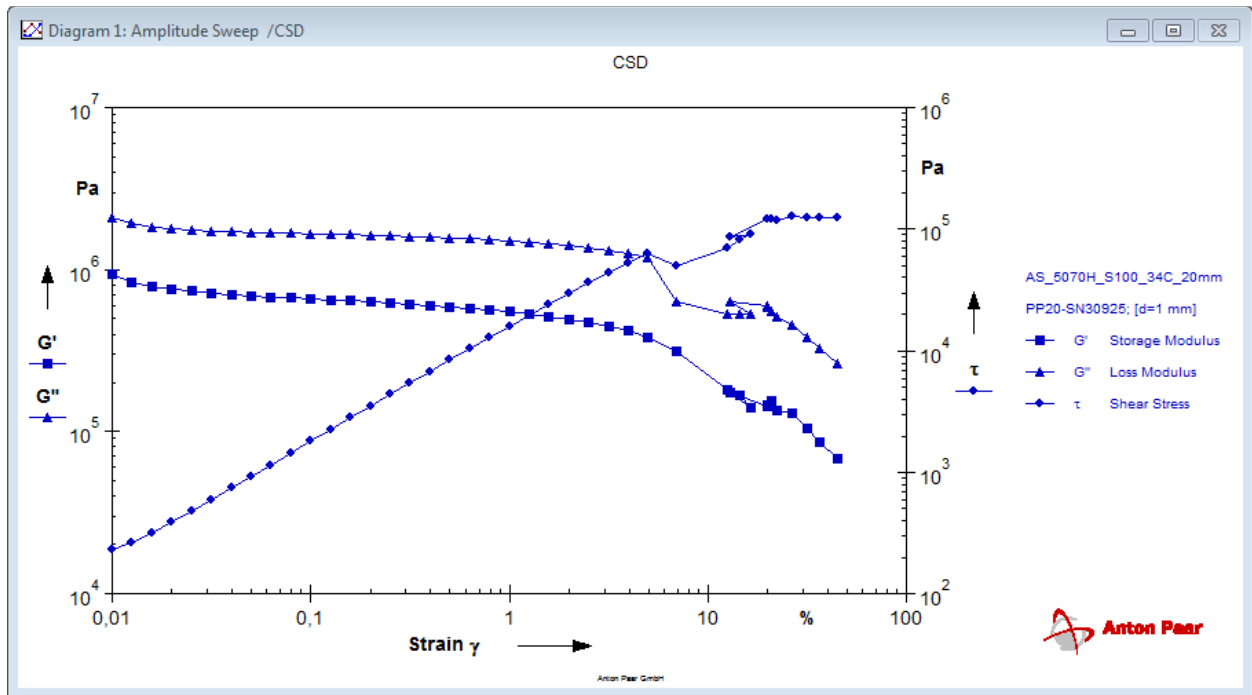


Grafico 8.10. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

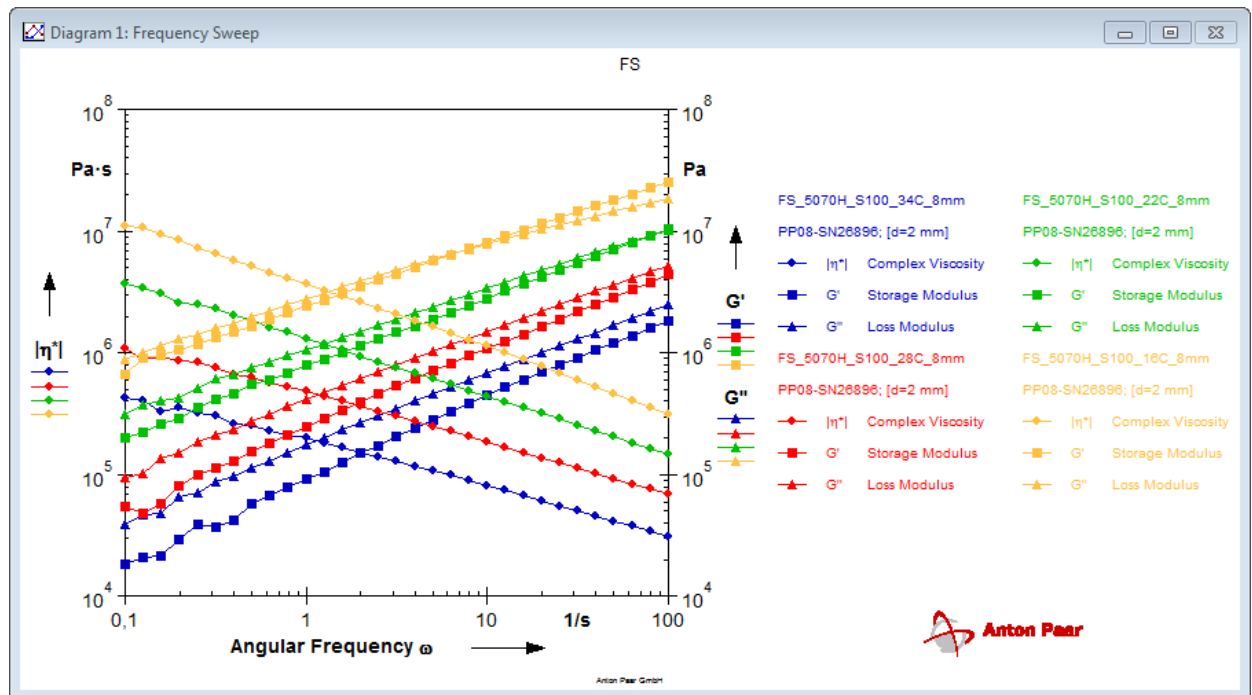


Grafico 8.11. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature

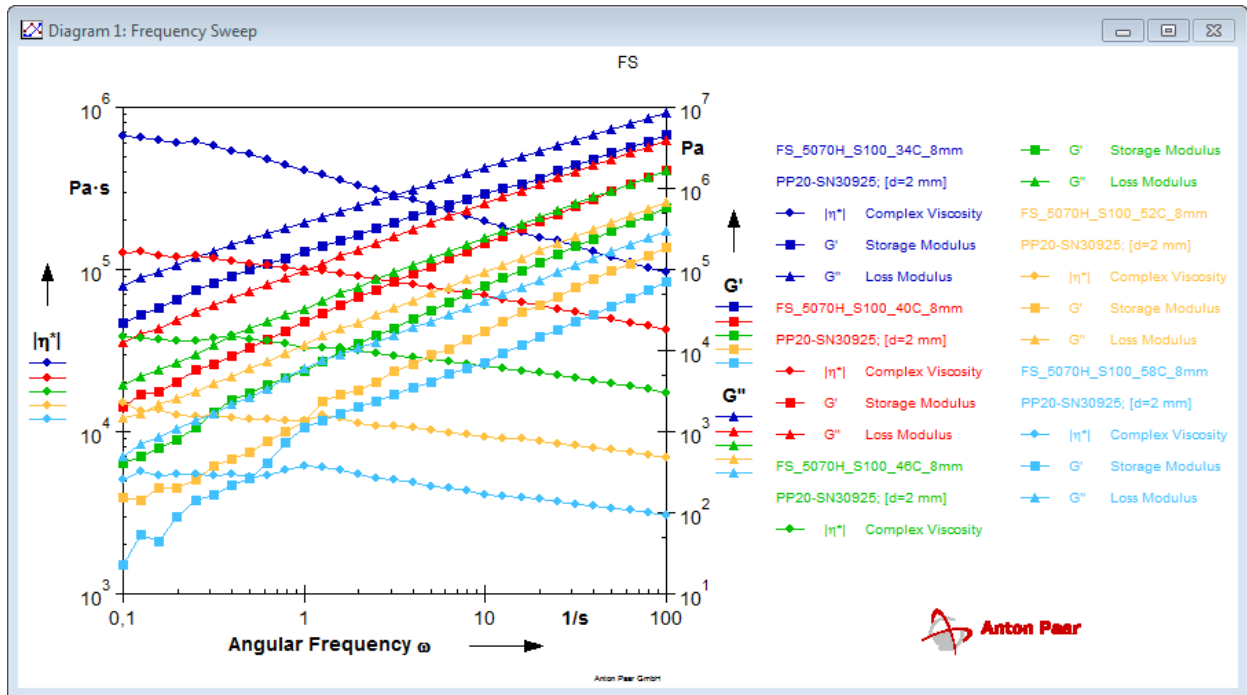
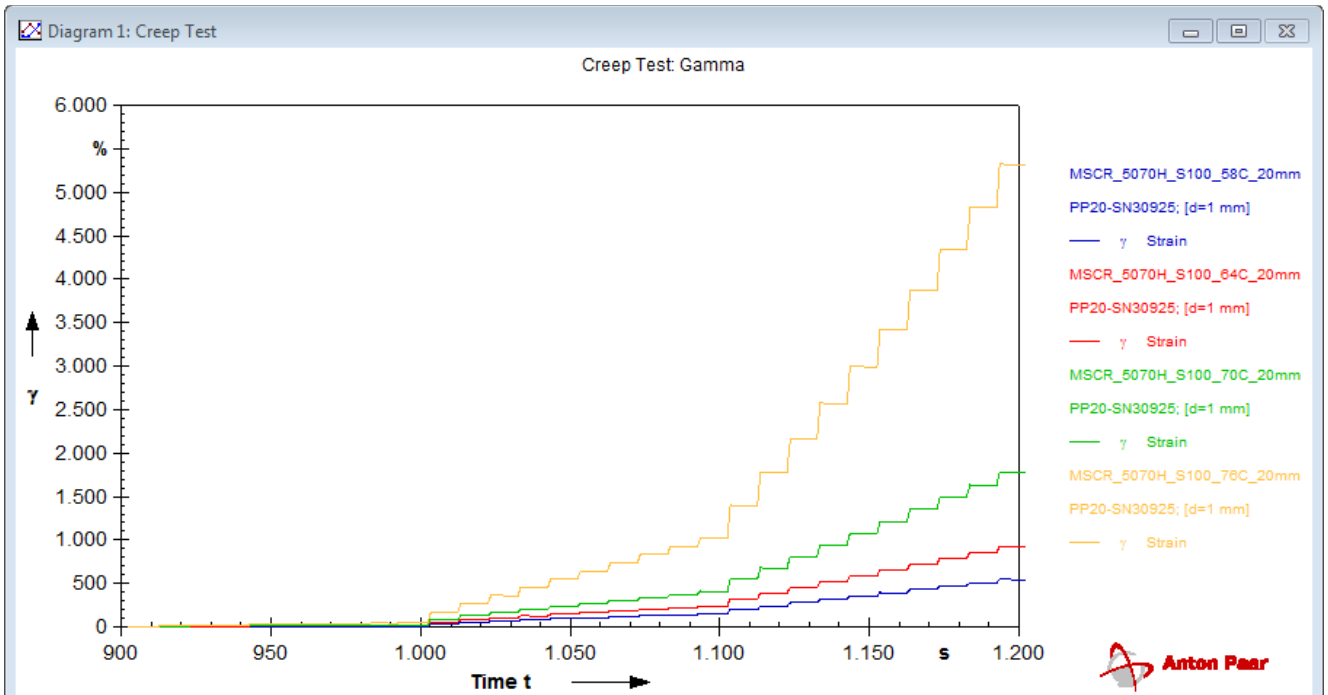


Grafico 8.12. Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature



8.1.4. Serie 50/70H_PAV

Grafico 8.13. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

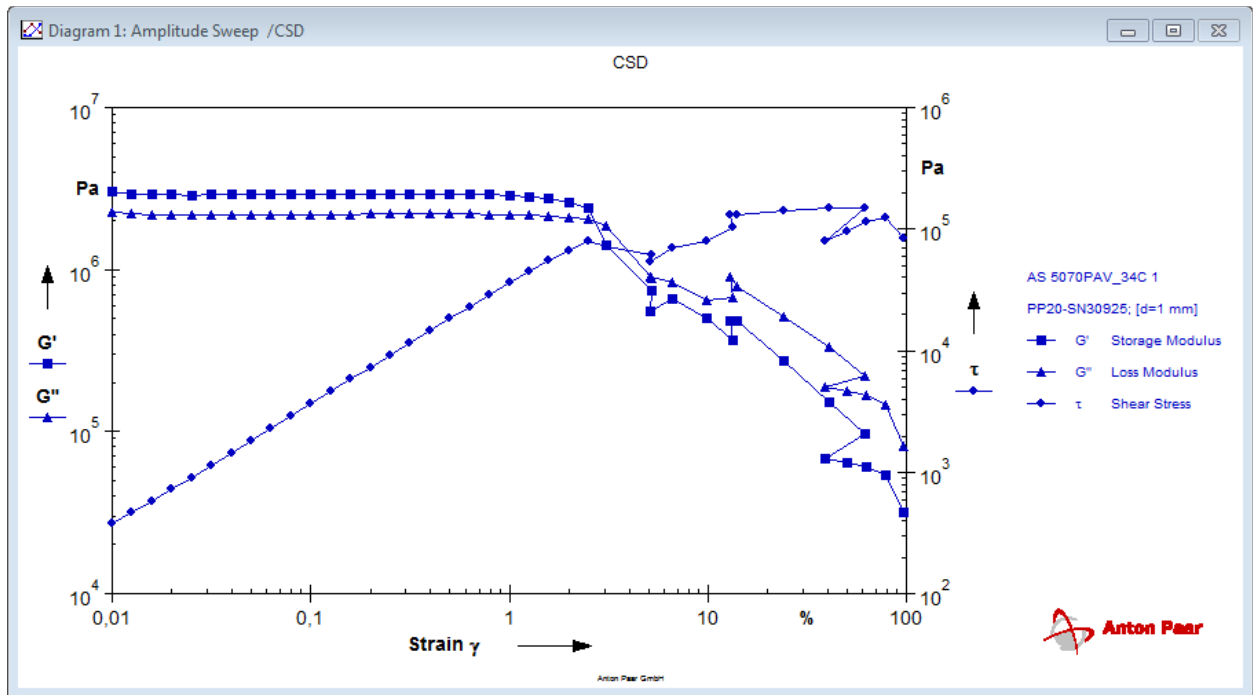


Grafico 8.14. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

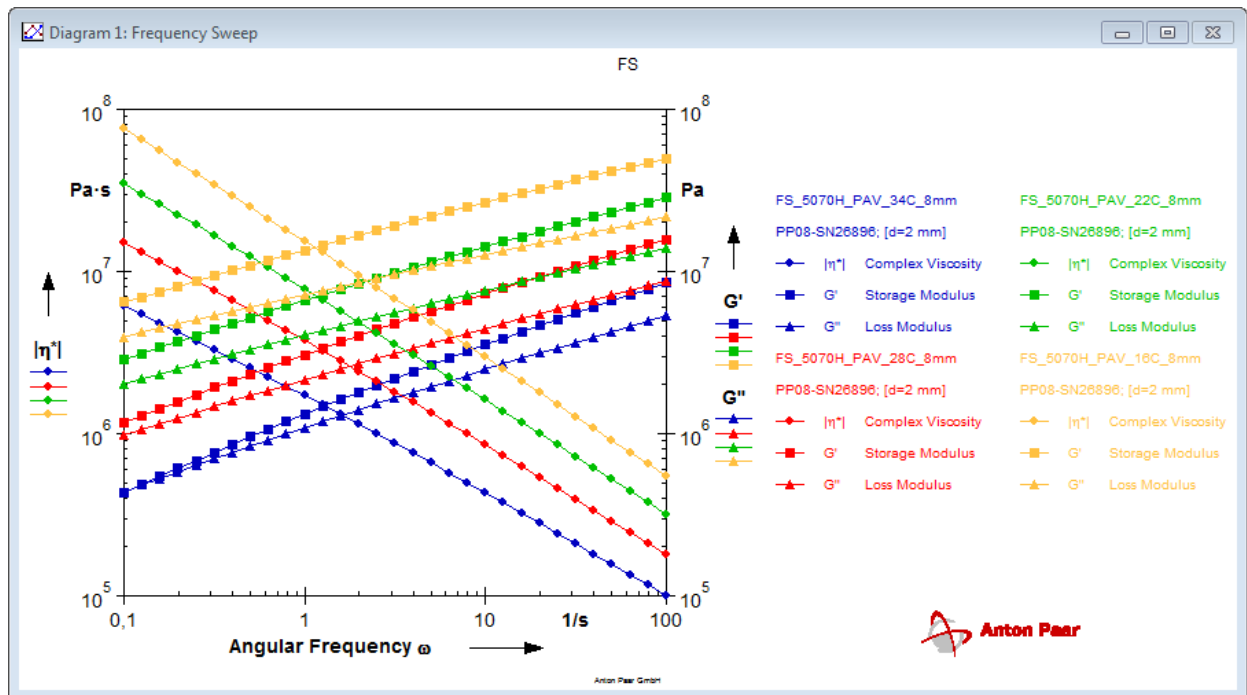
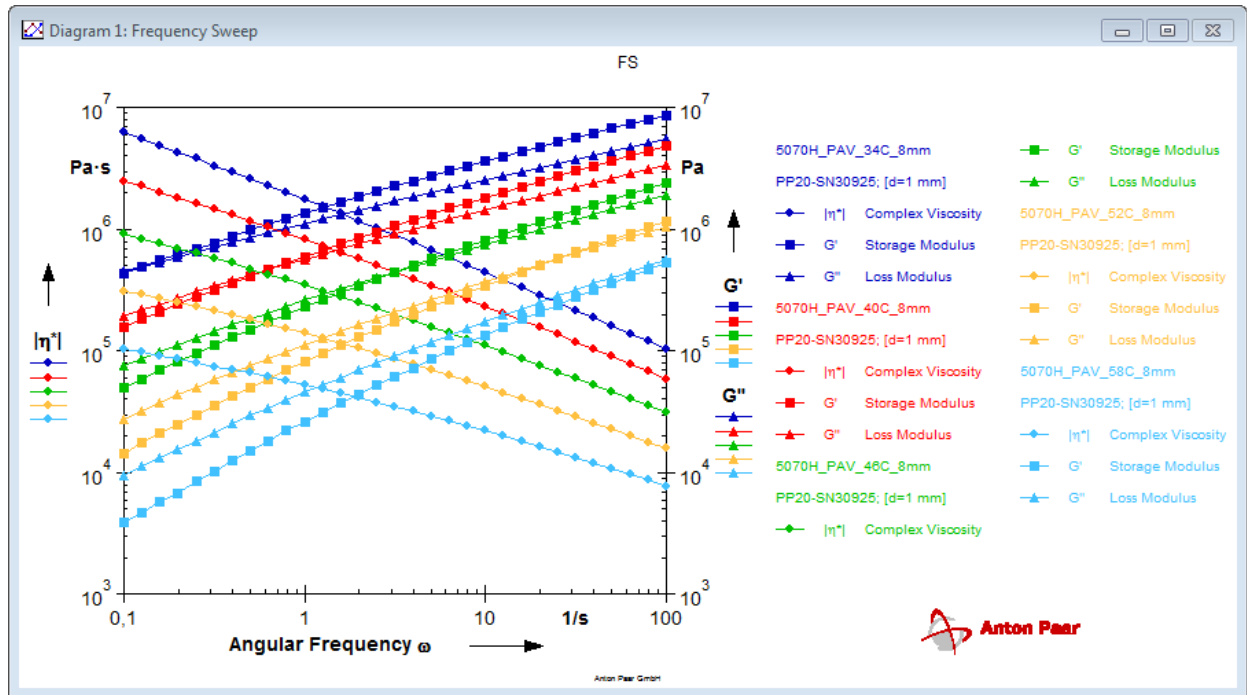


Grafico 8.15. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



8.1.5. Serie 50/70H_PAV_L100

Grafico 8.16. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

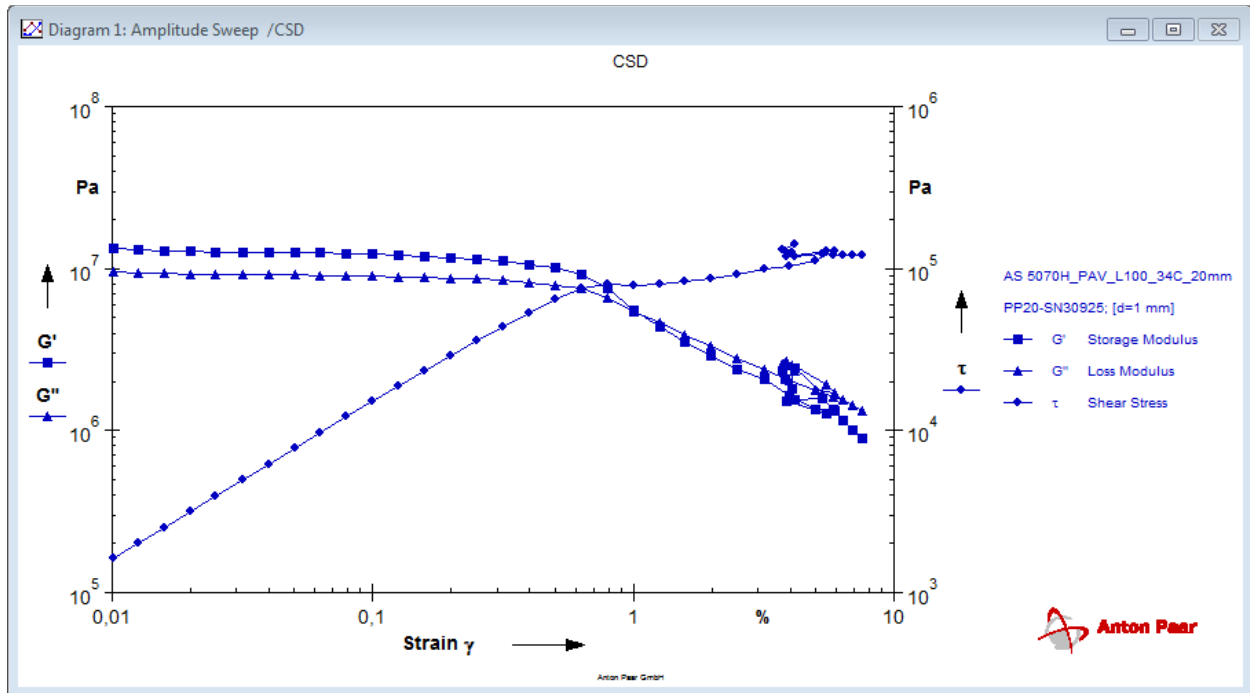


Grafico 8.17. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

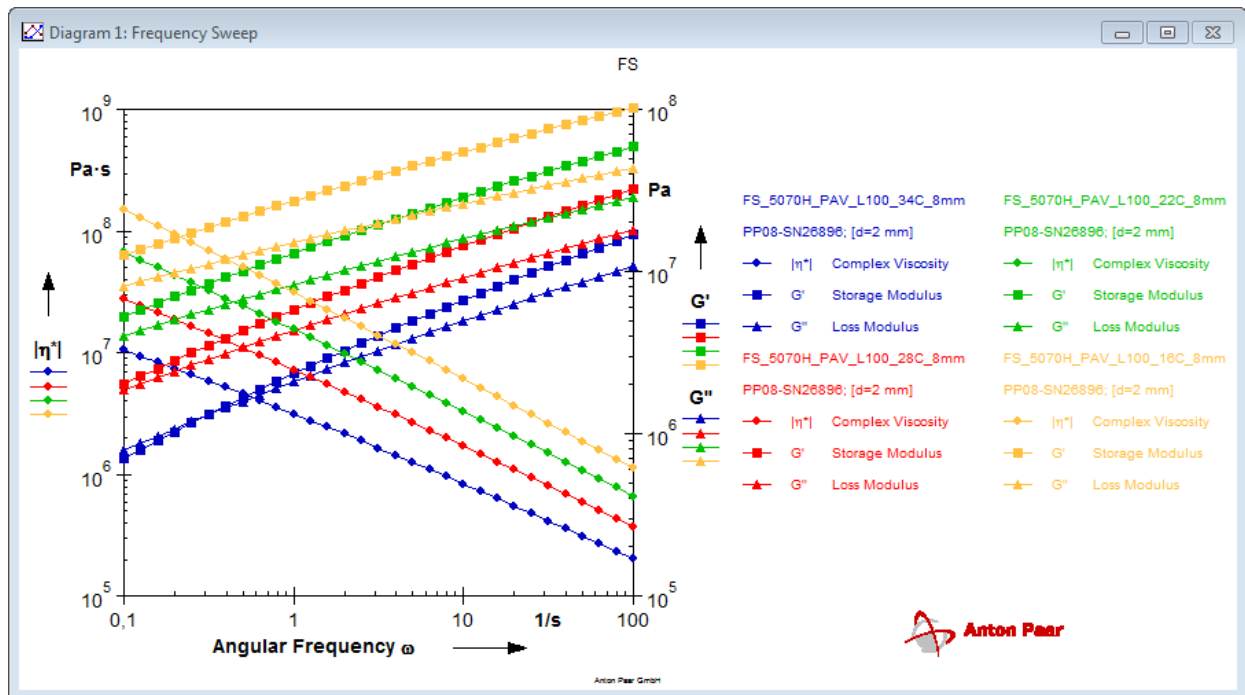
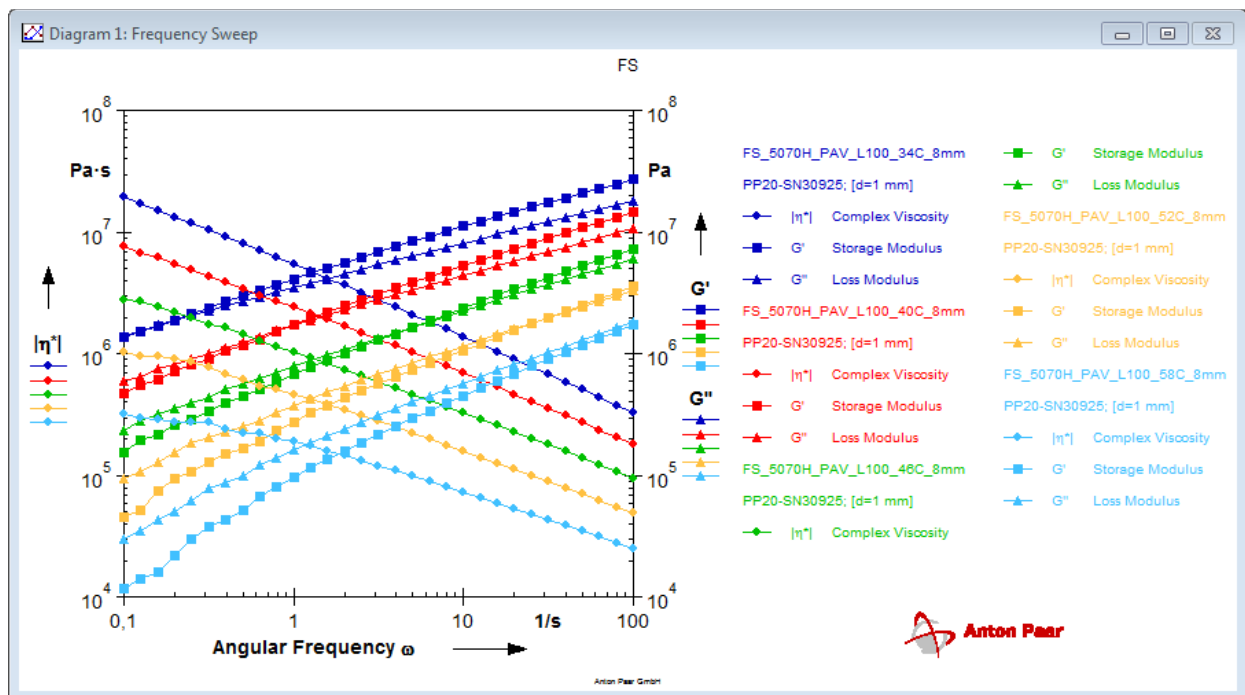


Grafico 8.18. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



8.1.6. Serie 50/70H_PAV_S100

Grafico 8.19. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

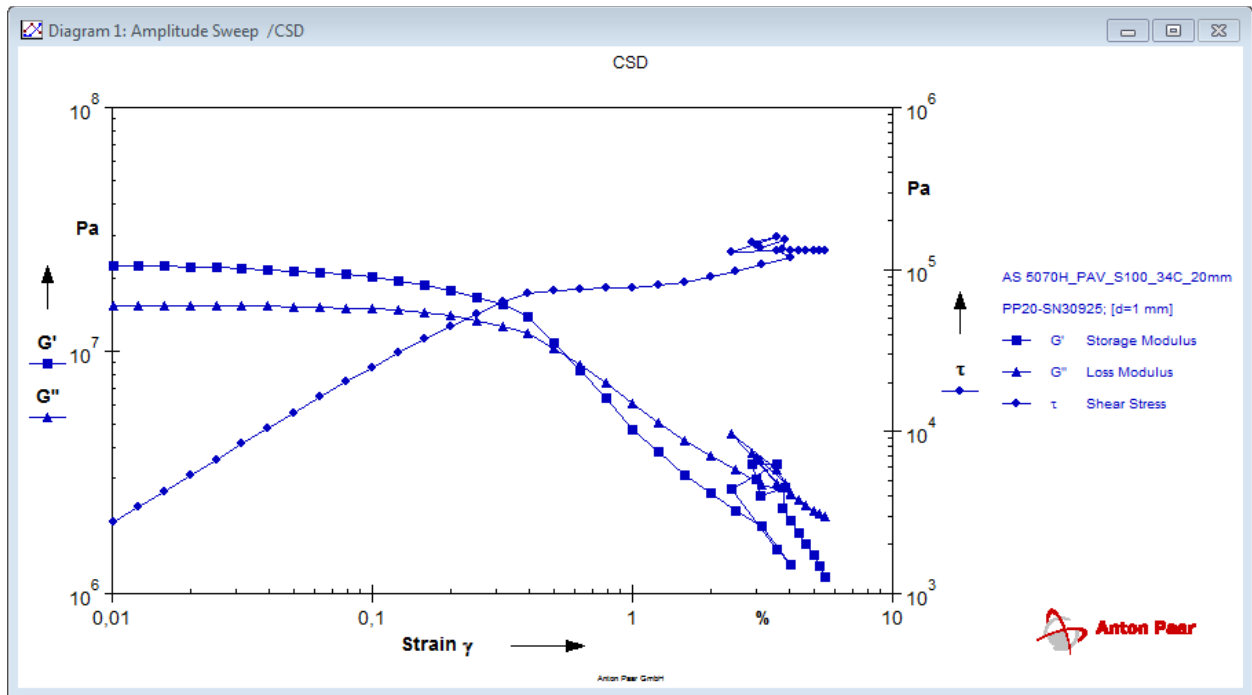


Grafico 8.20. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

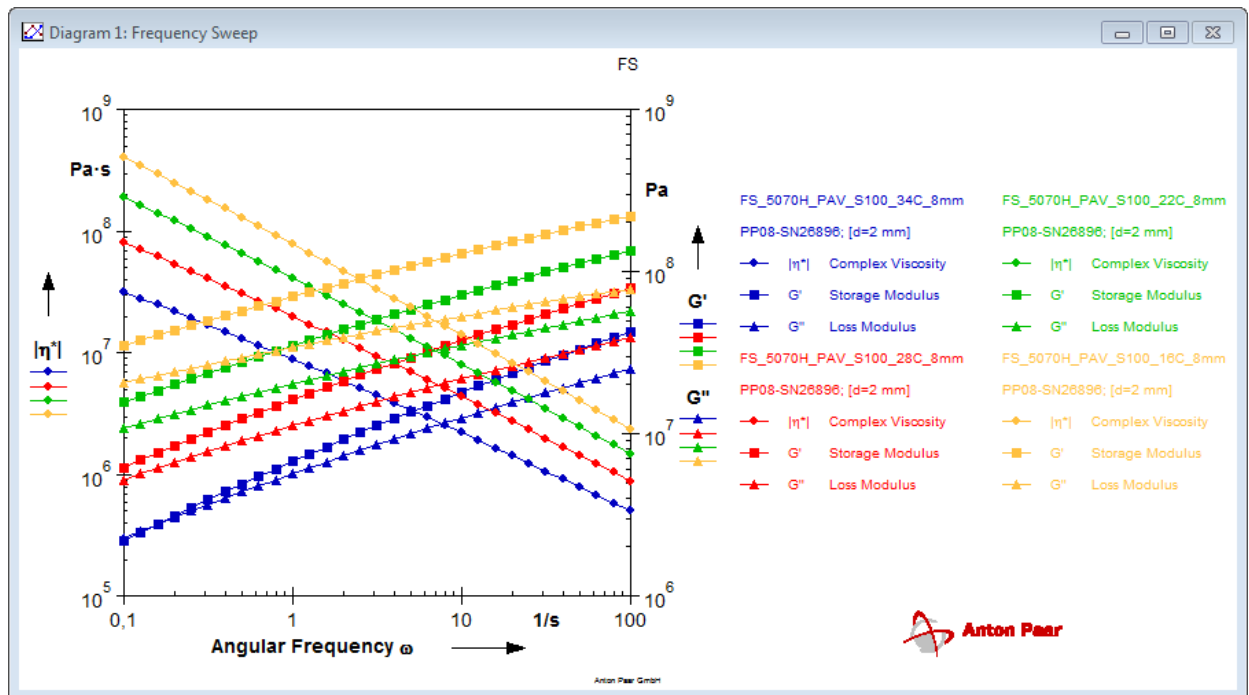
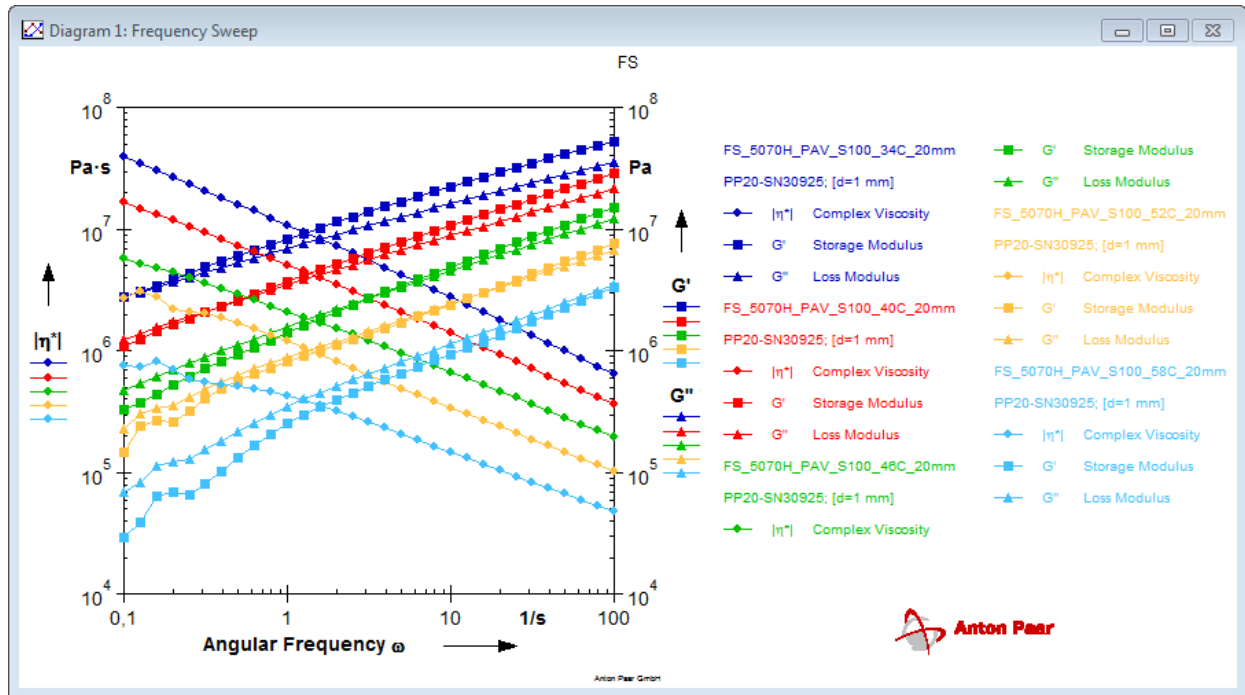


Grafico 8.21. *Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature*



8.1.7. Serie 50/70W

Grafico 8.22. *Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test*

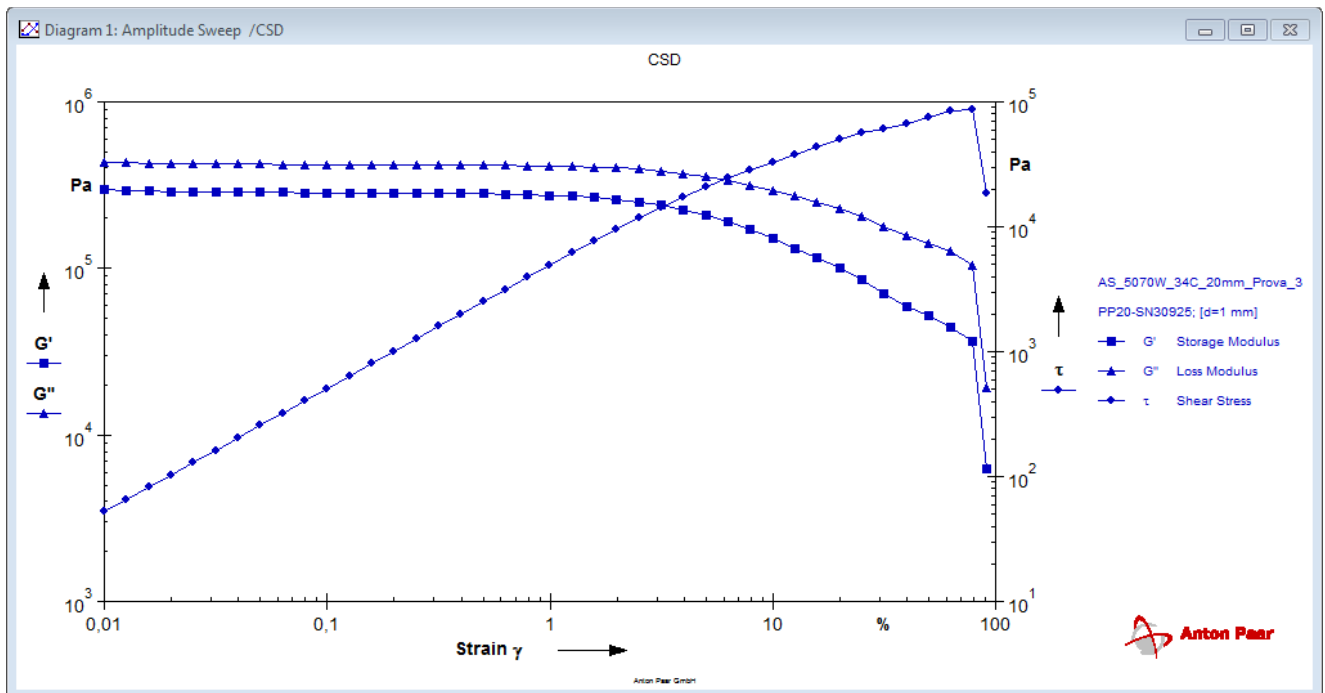


Grafico 8.23. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

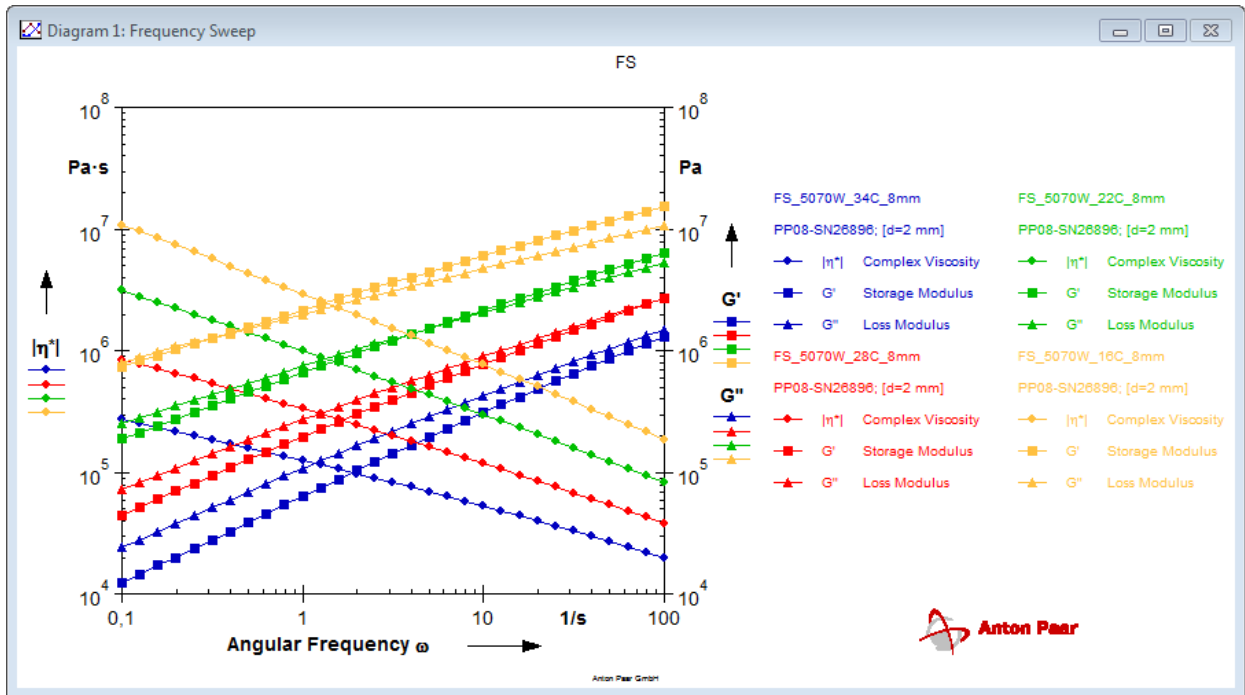


Grafico 8.24. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature

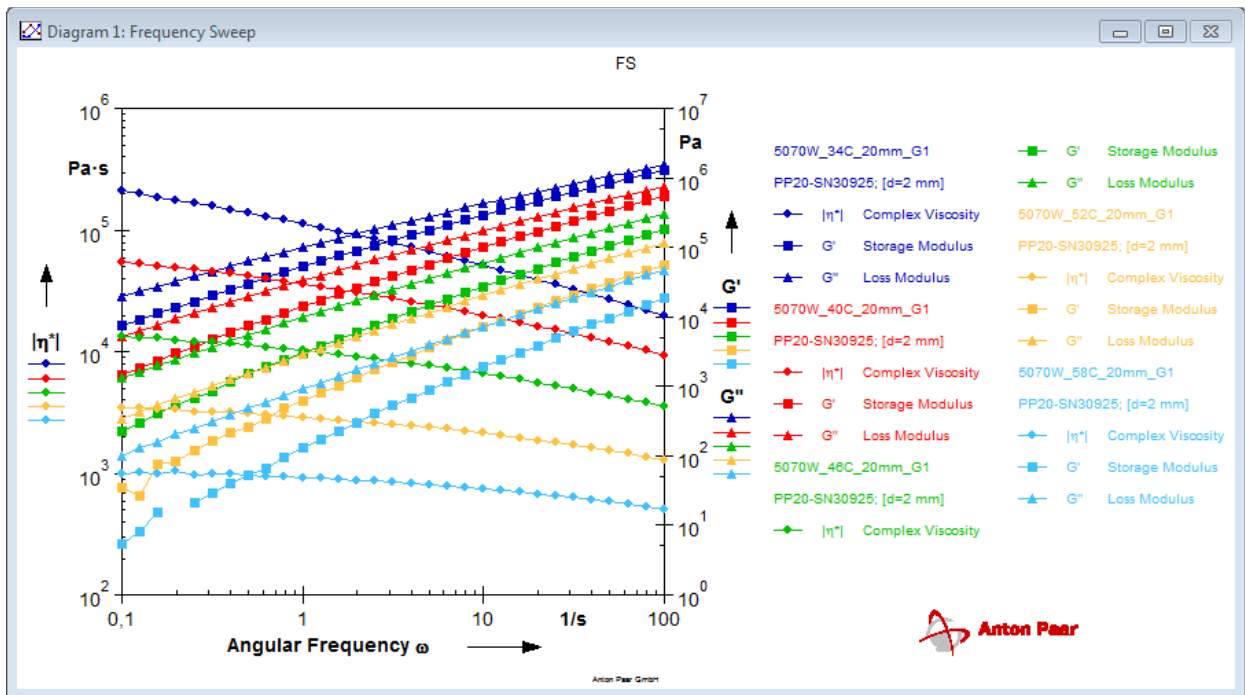
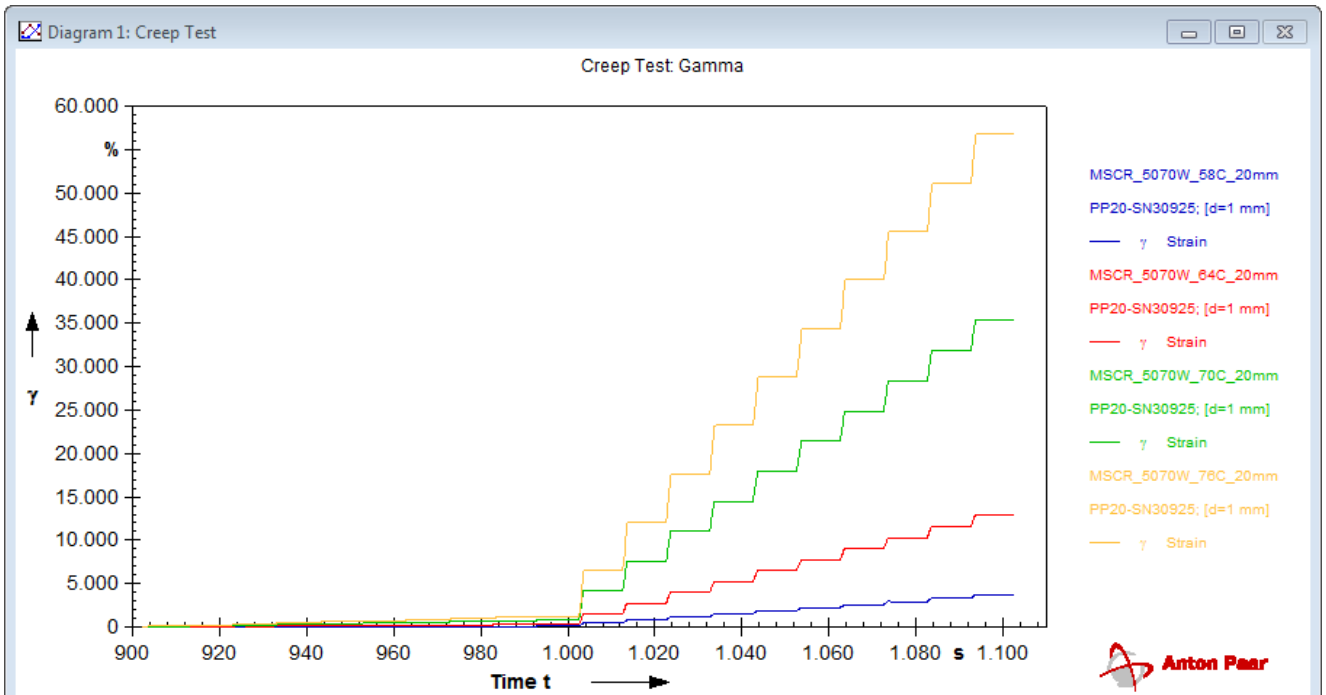


Grafico 8.25. Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature



8.1.8. Serie 50/70W_L100

Grafico 8.25. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

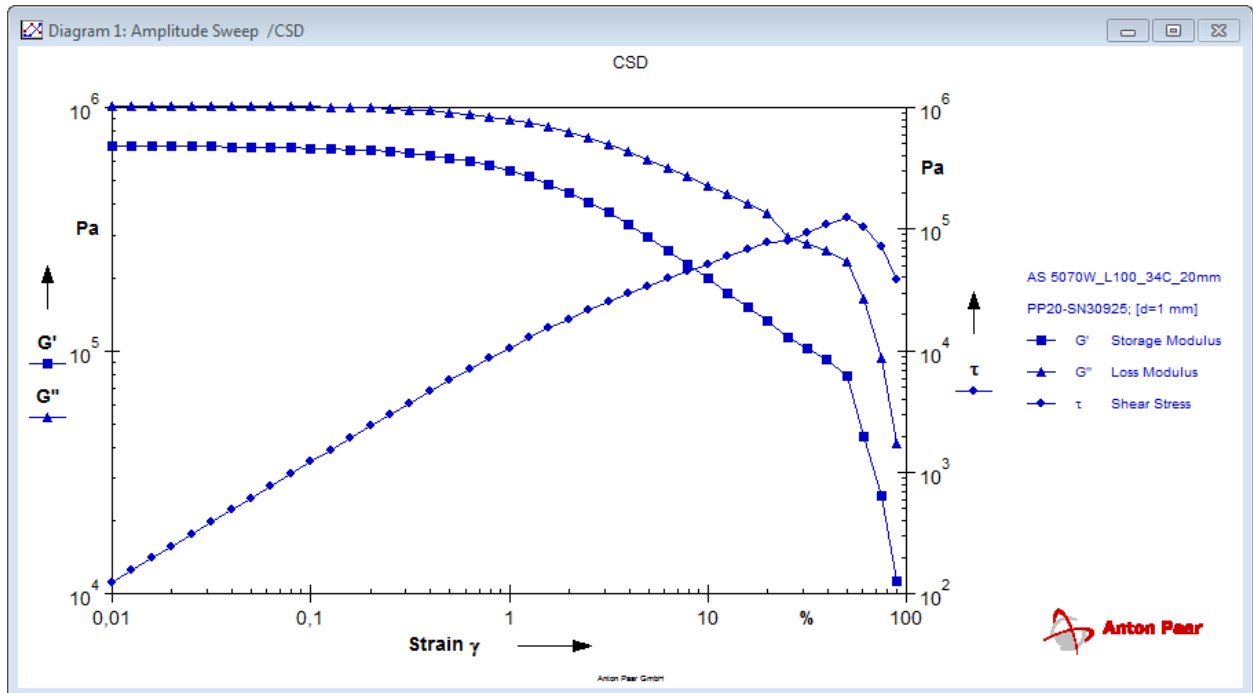


Grafico 8.26. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

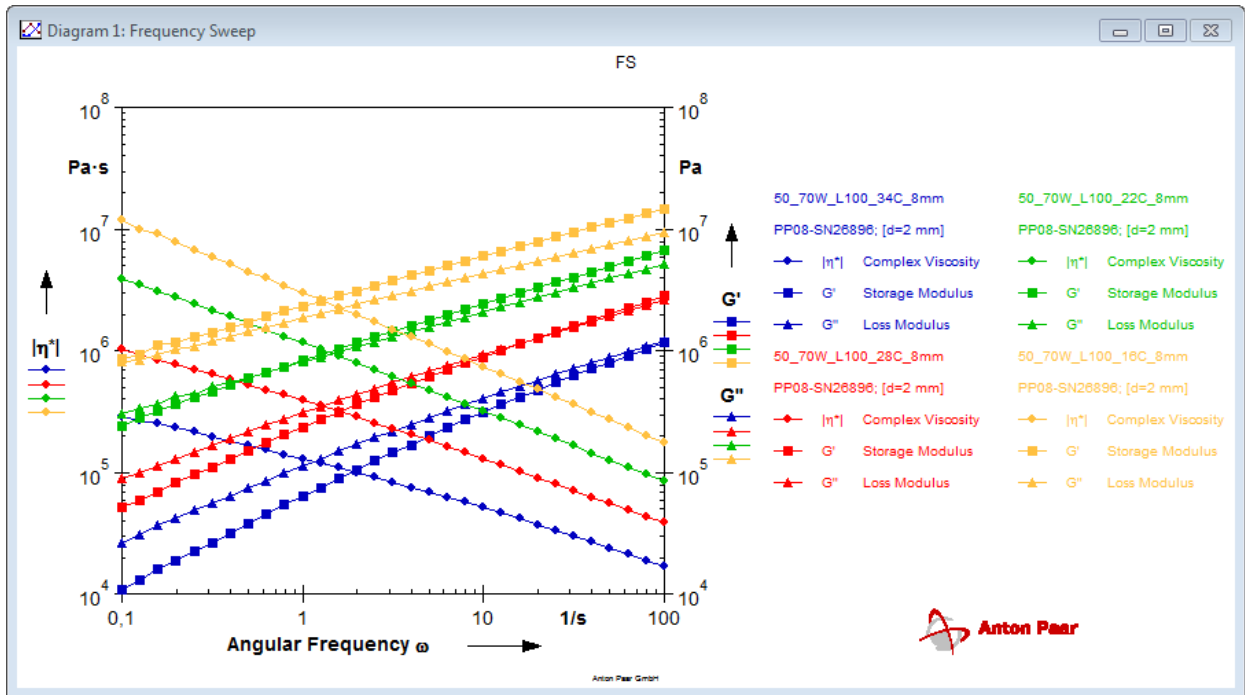


Grafico 8.27. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature

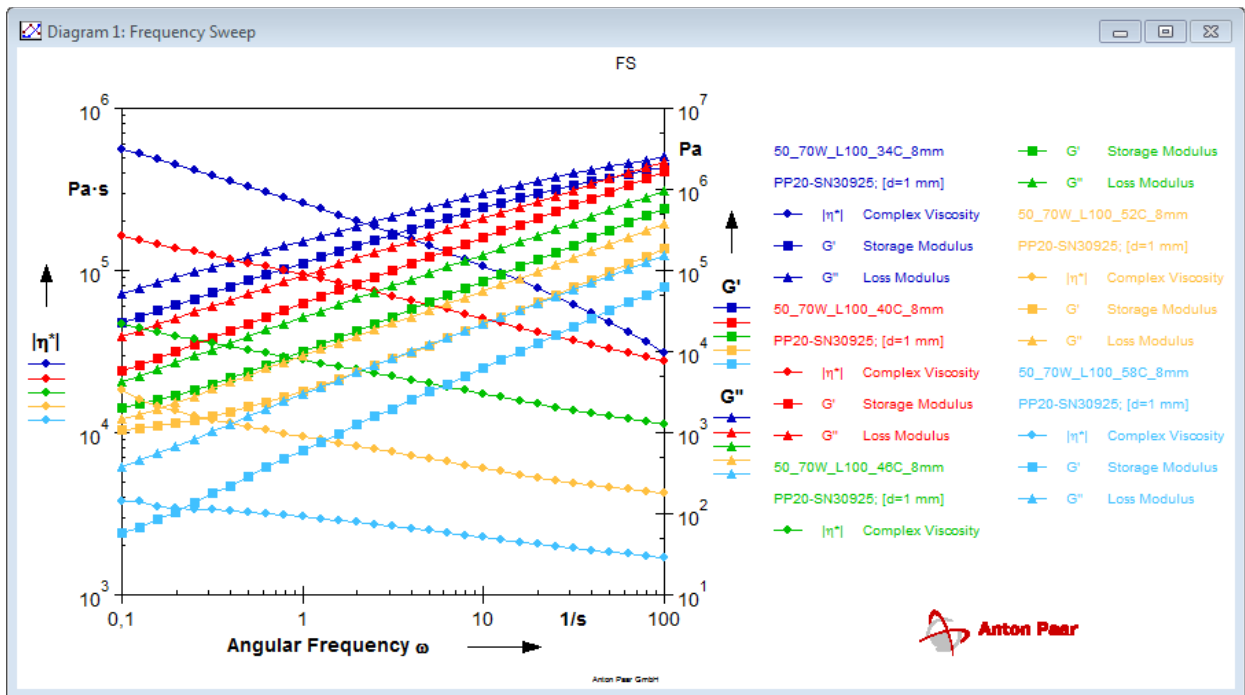
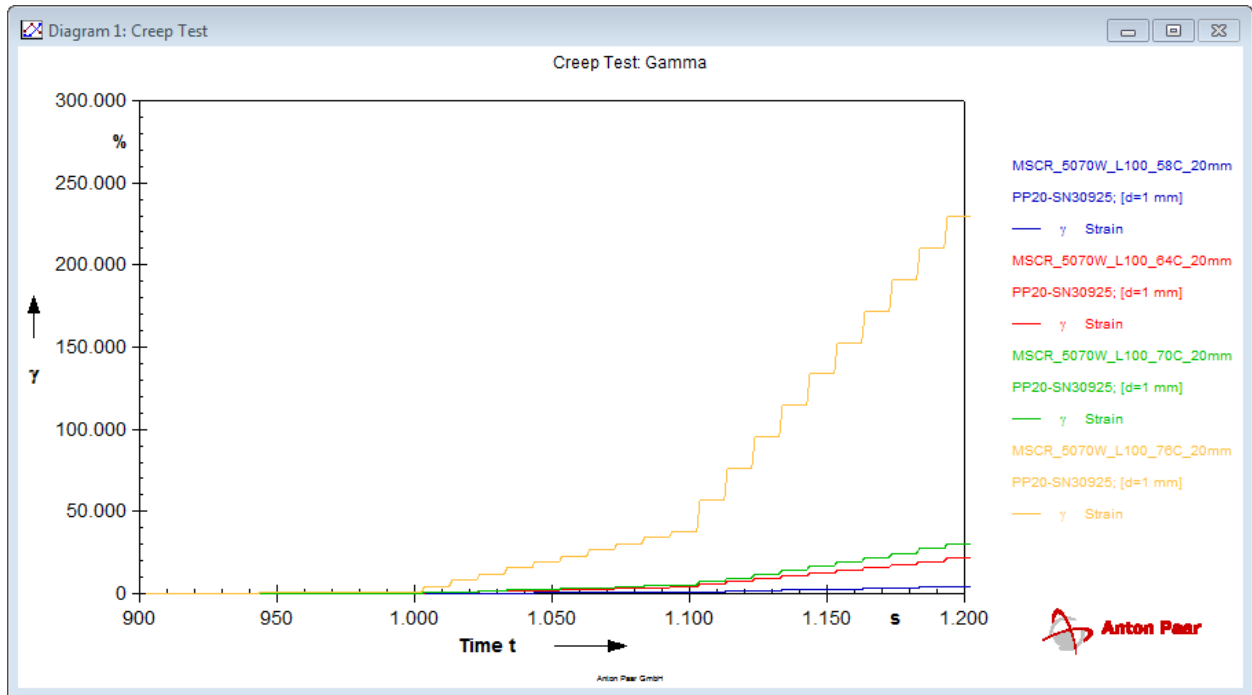


Grafico 8.28. Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature



8.1.9. Serie 50/70W_S100

Grafico 8.29. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

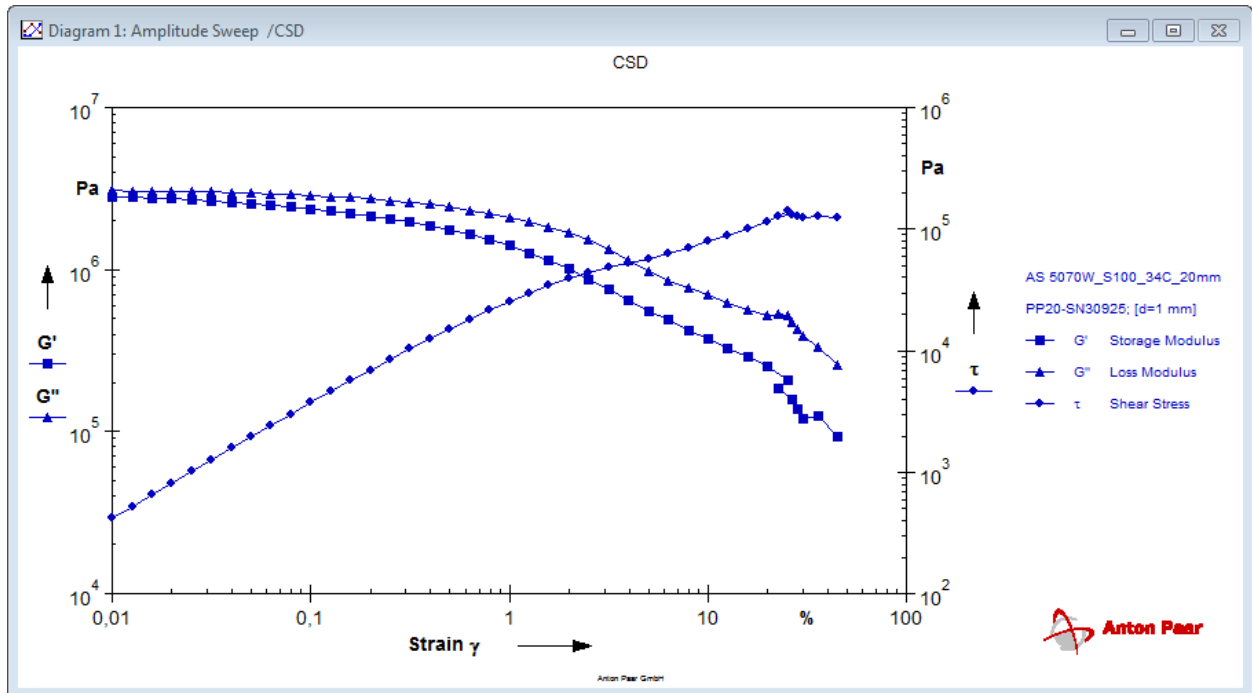


Grafico 8.30. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

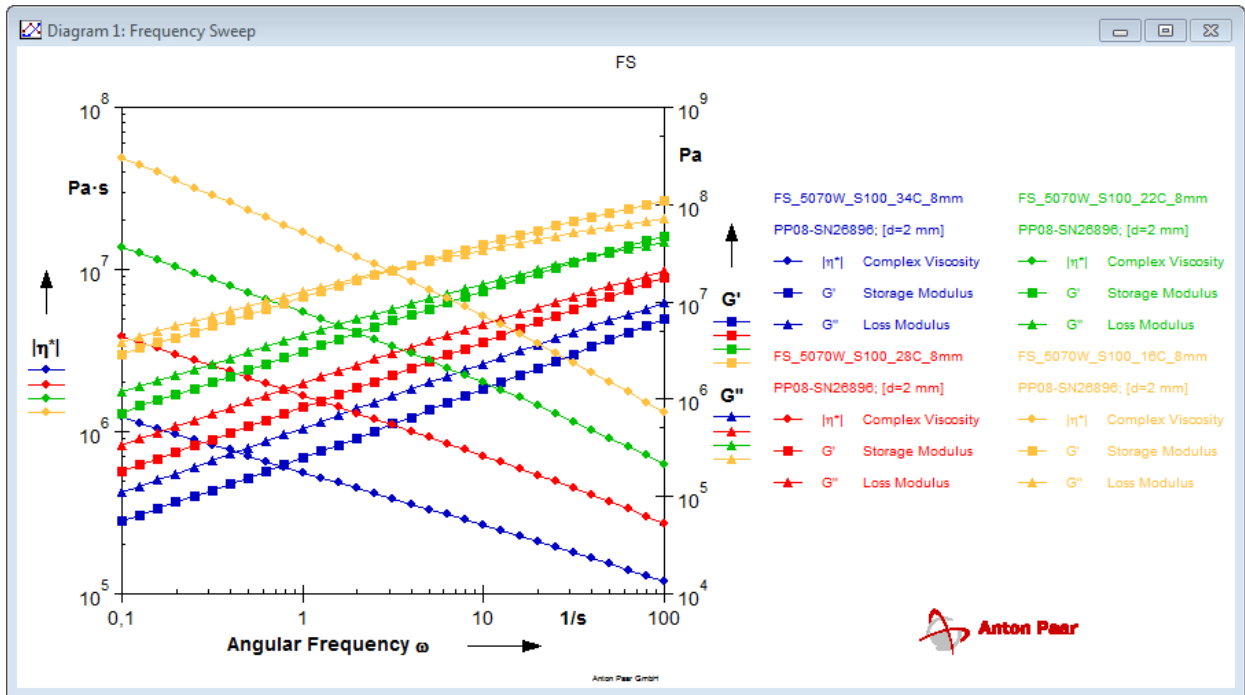


Grafico 8.31. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature

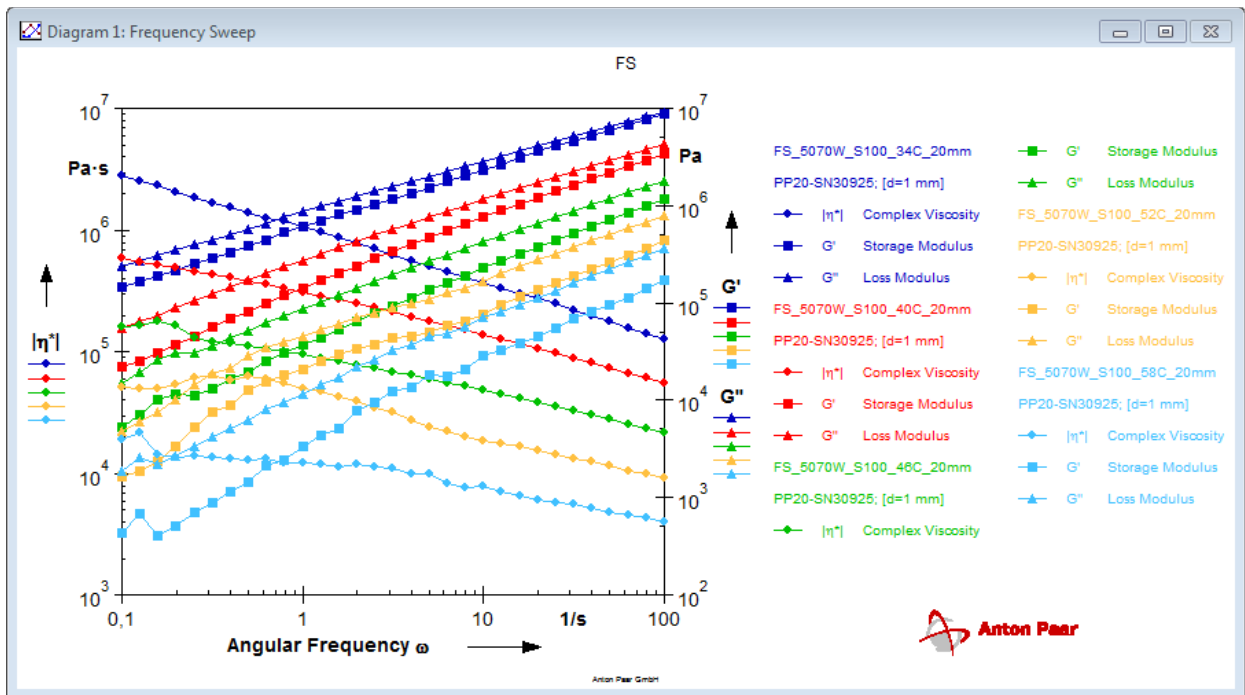
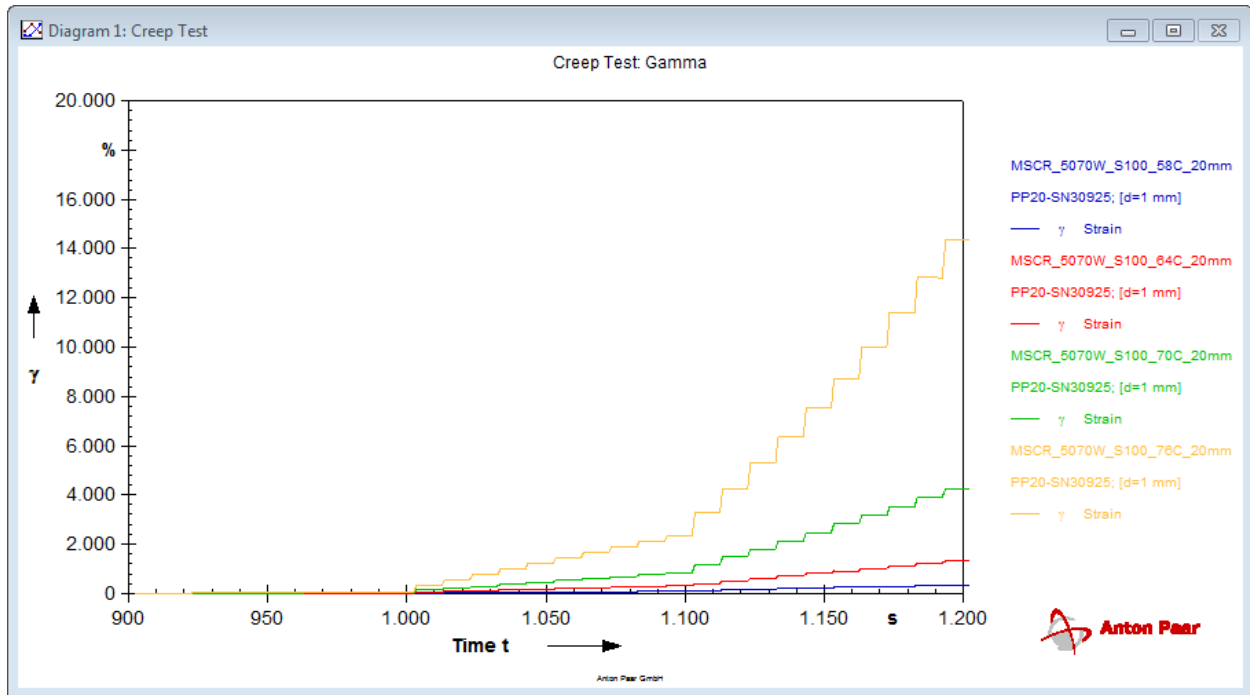


Grafico 8.32. Rappresentazione grafica M.S.C.R. Test – Alte temperature



8.1.10. Serie 50/70W_PAV

Grafico 8.33. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

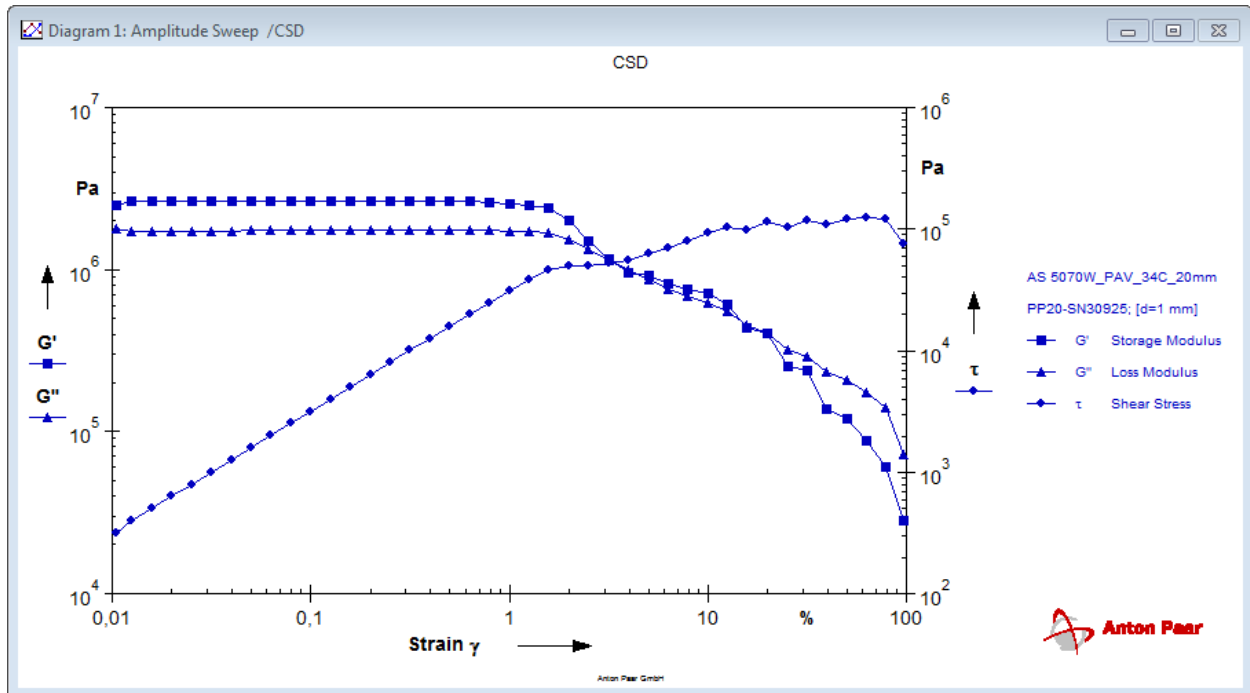


Grafico 8.34. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

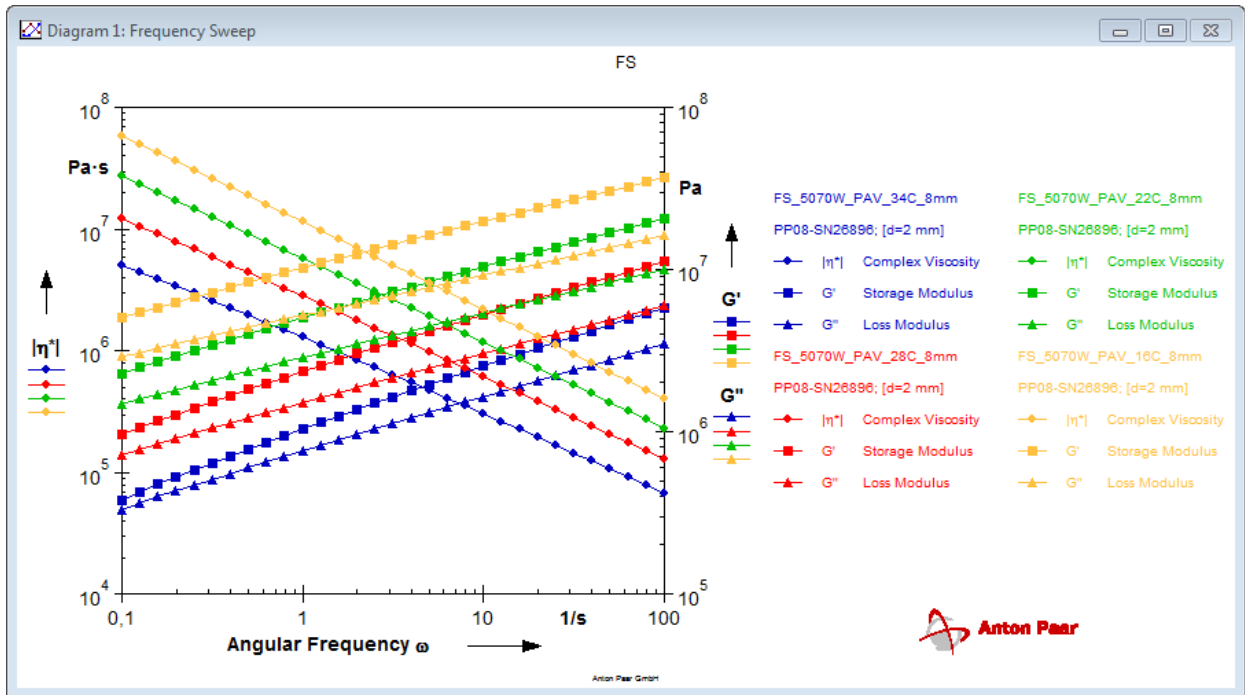
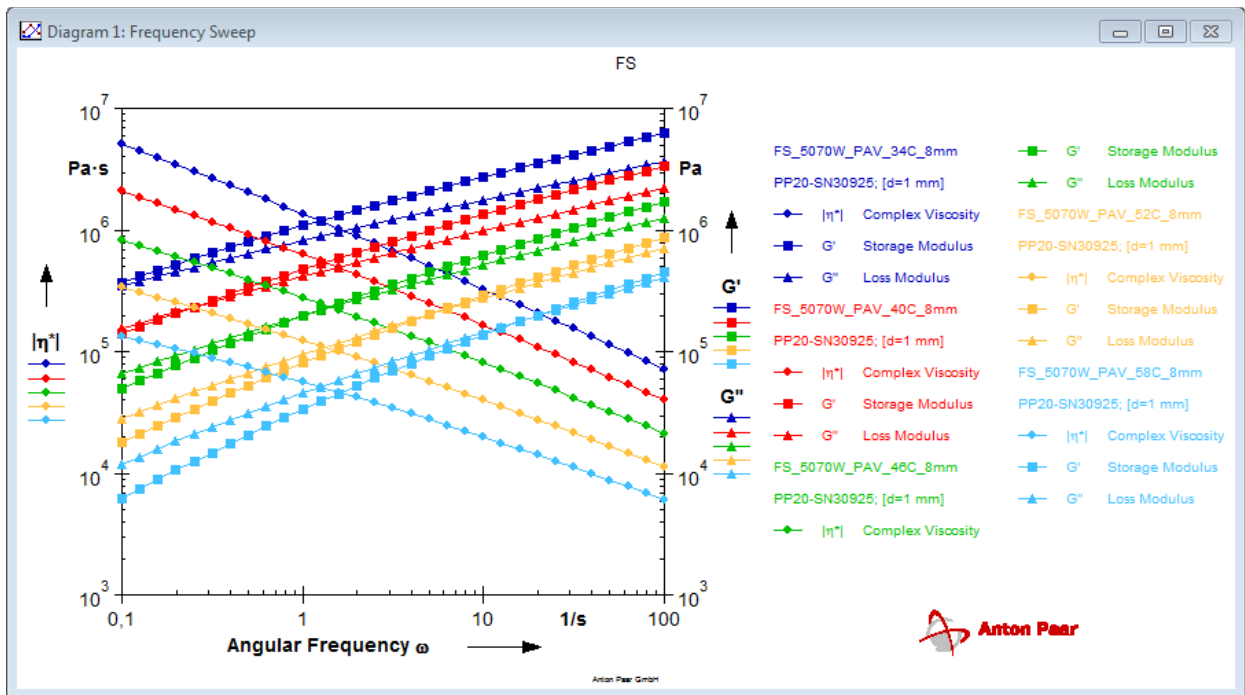


Grafico 8.35. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



8.1.11. Serie 50/70W_PAV_L100

Grafico 8.36. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

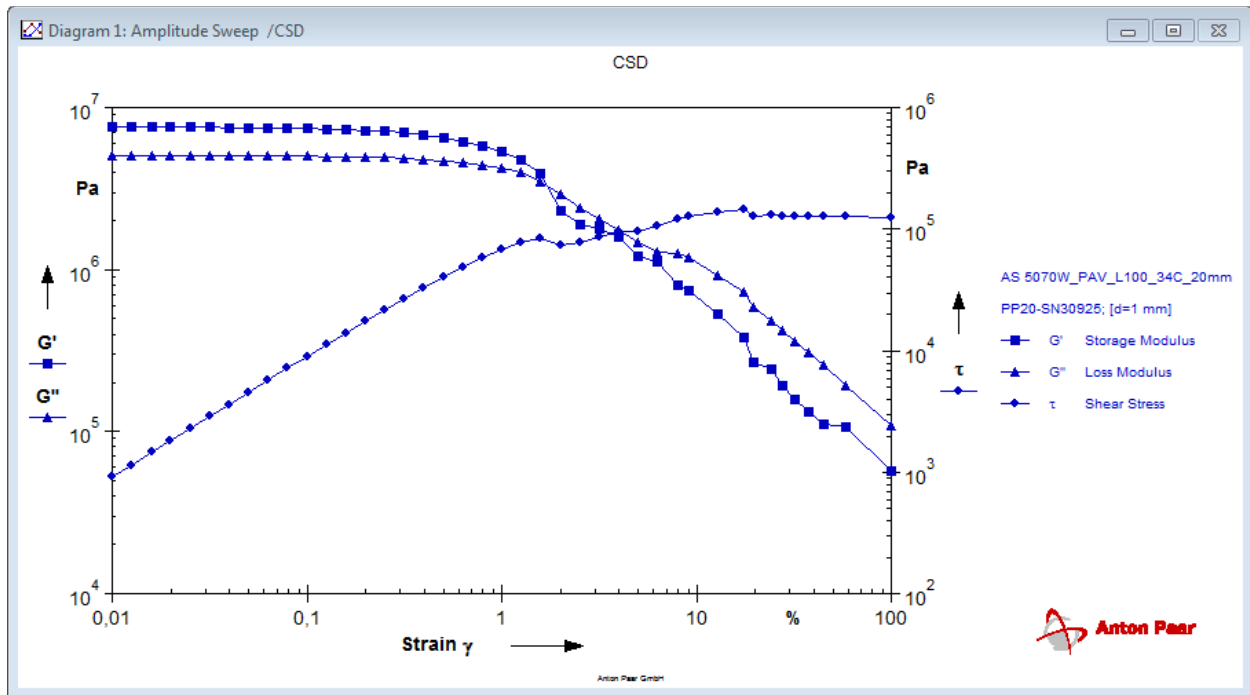


Grafico 8.37. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

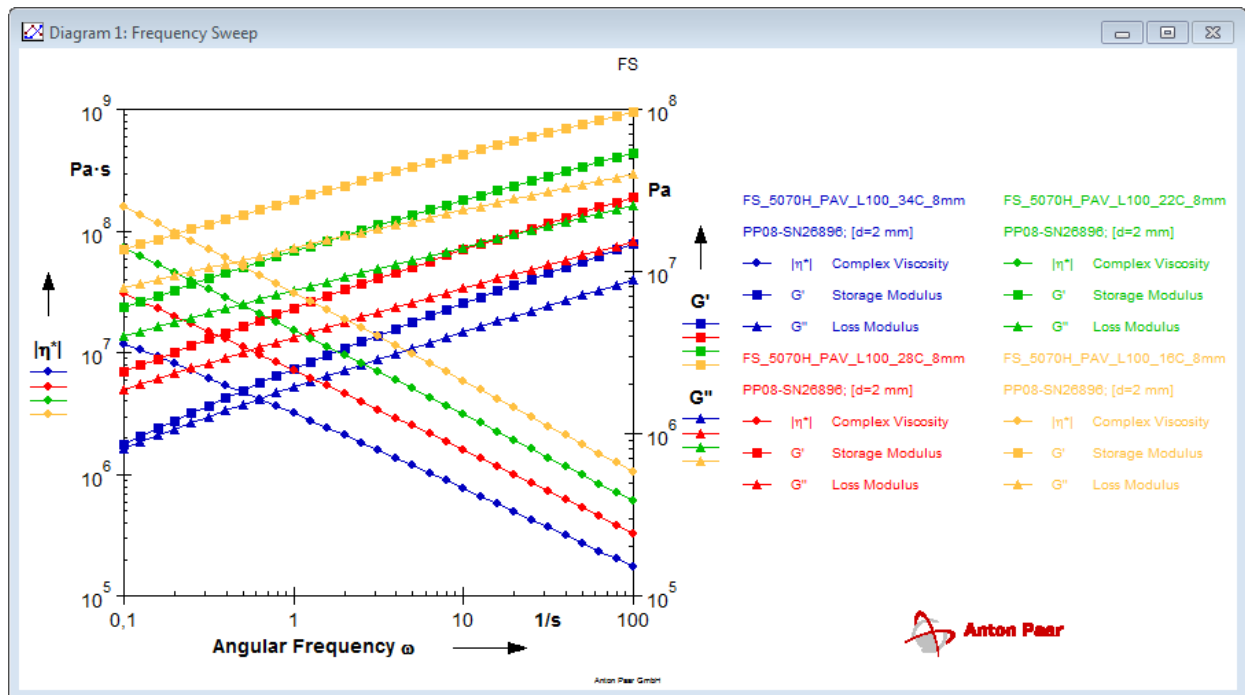
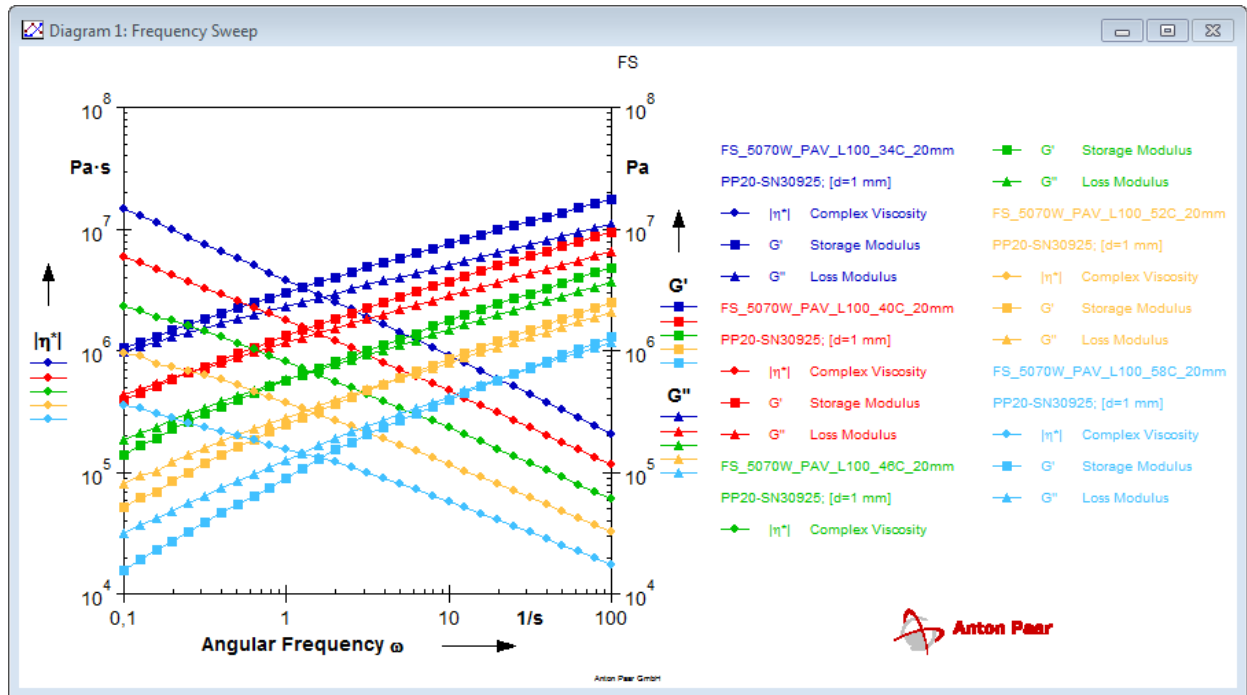


Grafico 8.38. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



8.1.12. Serie 50/70W_PAV_S100

Grafico 8.39. Rappresentazione grafica Amplitude Sweep Test

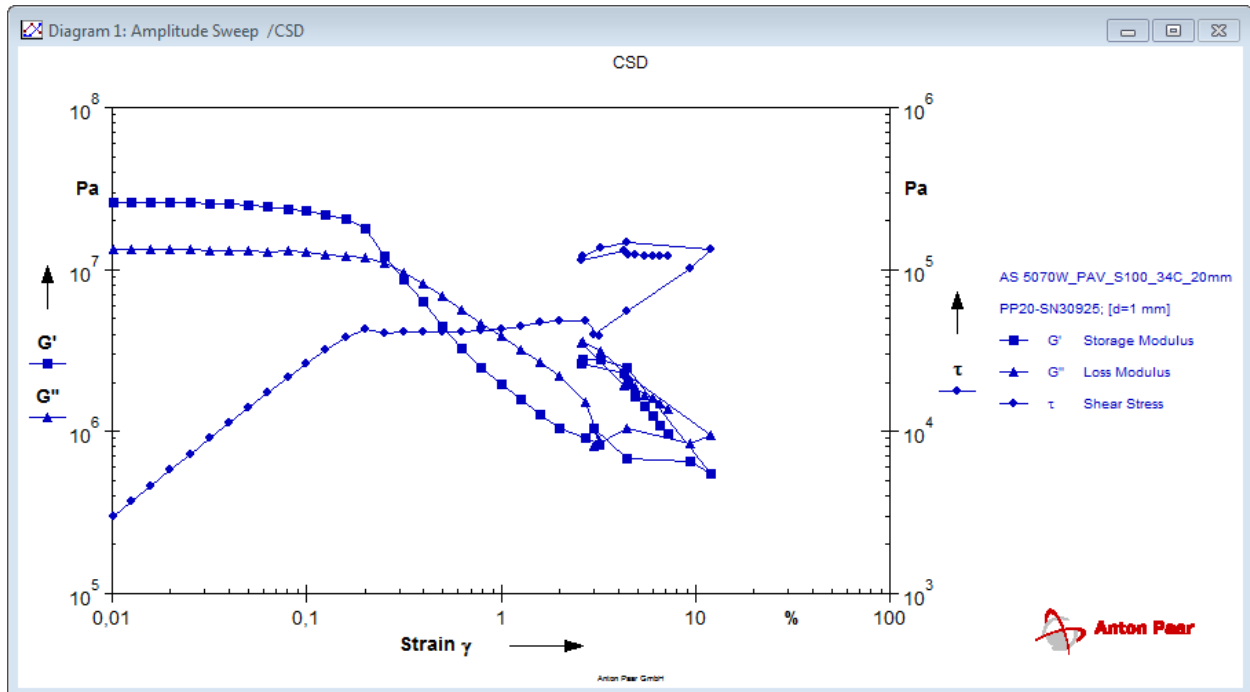


Grafico 8.40. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Basse temperature

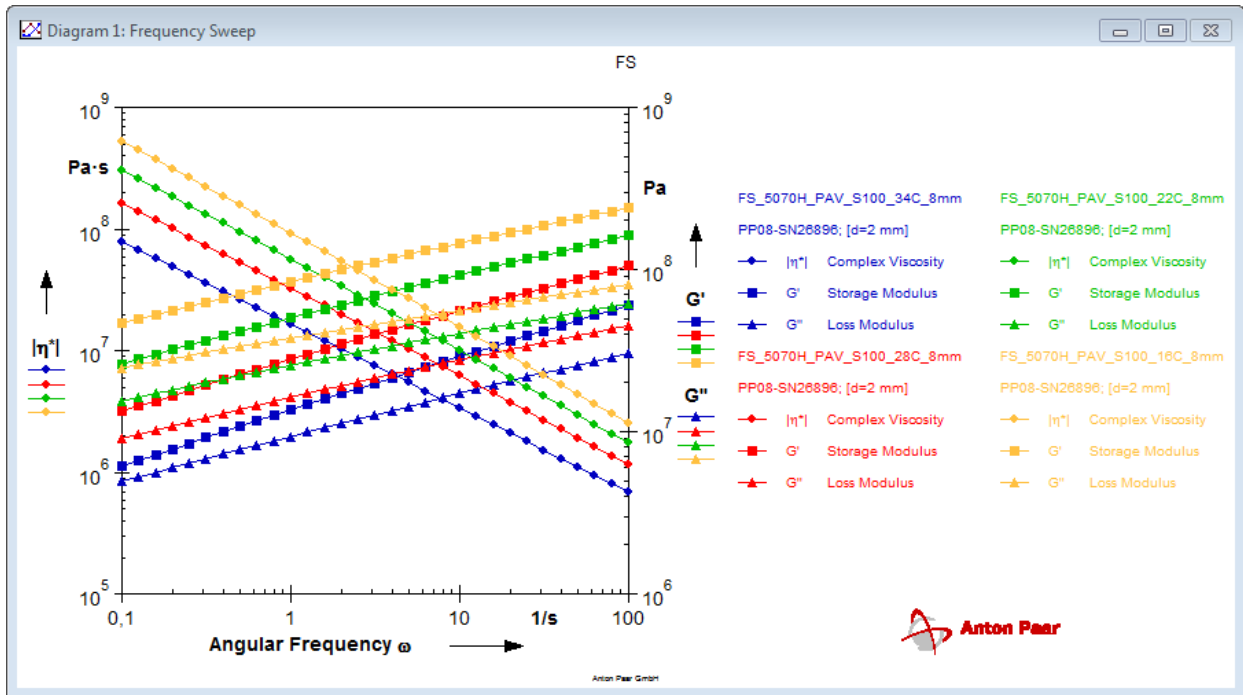
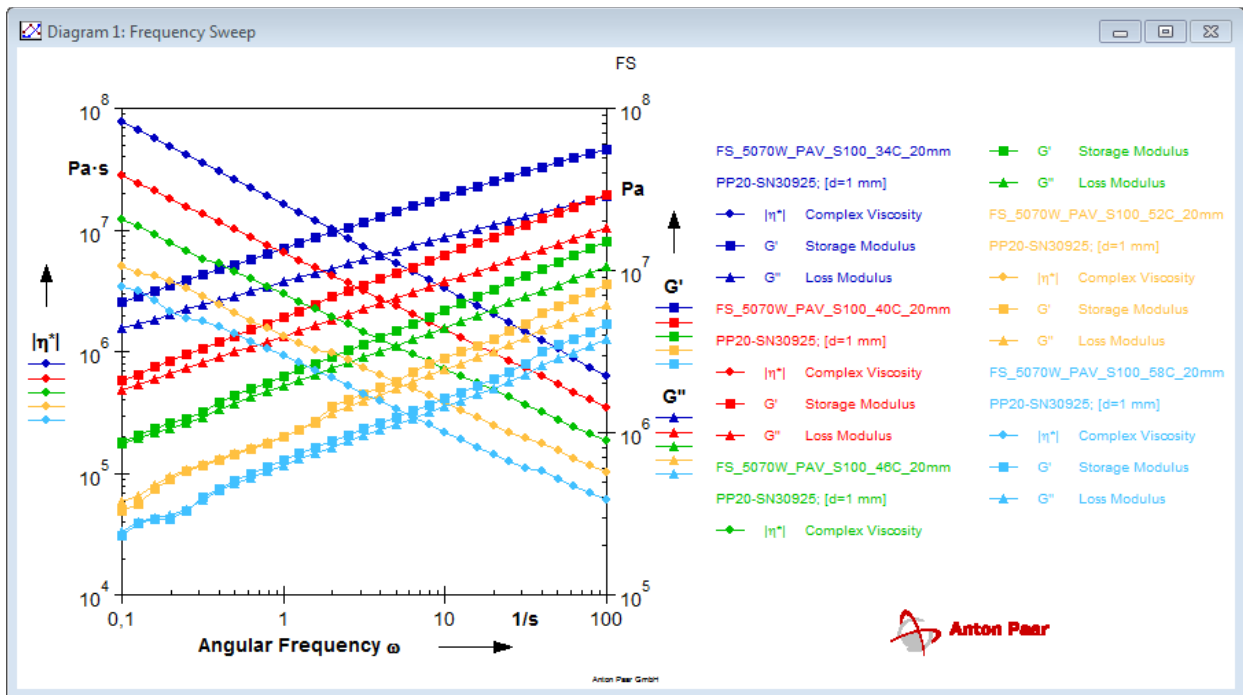


Grafico 8.41. Rappresentazione grafica Frequency Sweep Test - Alte temperature



8.2. Elaborazione dati

8.2.1. Test “amplitude sweep”

Come già accennato, la prova di “amplitude sweep” ha il principale scopo di identificare il limite elastico lineare dei diversi materiali: l’elaborazione dei dati si pone quindi lo scopo di identificare il preciso istante in cui i campioni modificano il comportamento elastico e cominciano a subire deformazioni non più lineari.

Si è deciso di raggruppare tutti i valori di tensione e deformazione per i diversi provini, unitamente ai valori di modulo complesso risultanti dai test di laboratorio: è stato così possibile confrontare i differenti comportamenti mediante la costituzione di curve rappresentative. Per favorire la leggibilità, si è deciso di separare i materiali per la costituzione di miscele “a caldo” dai materiali destinati alle realizzazione di conglomerati “tiepidi”.

Tabella 8.5. Estratto elaborazioni “Amplitude sweep” – Identificazione del limite elastico lineare Campione 5070H (Bitume 50/70 vergine per costituzione di miscela “a caldo”)

Sample: 5070H			0.1580	379.0	239000	6.3100	14700.0	233000
Bitume "a caldo"			0.2000	477.0	239000	7.9400	18300.0	231000
γ	τ	G*	0.2510	600.0	239000	10.0000	22800.0	228000
[%]	[Pa]	[Pa]	0.3160	754.0	239000	12.6000	28100.0	224000
0.0100	24.2	241000	0.3980	949.0	238000	15.8000	34600.0	218000
0.0126	30.3	241000	0.5010	1190.0	238000	19.9000	42300.0	212000
0.0159	38.2	241000	0.6310	1500.0	238000	25.1000	51300.0	204000
0.0200	48.0	240000	0.7940	1890.0	238000	31.6000	61400.0	194000
0.0251	60.3	240000	1.0000	2380.0	238000	39.7000	71400.0	180000
0.0316	75.9	240000	1.2600	3000.0	238000	49.7000	76400.0	154000
0.0398	95.5	240000	1.5800	3770.0	238000	58.8000	30800.0	52500
0.0501	120.0	240000	2.0000	4740.0	238000	76.2000	12200.0	16000
0.0631	151.0	240000	2.5100	5960.0	237000	99.9000	12200.0	12200
0.0794	191.0	240000	3.1600	7480.0	236000	Limite L.V.E.		
0.1000	240.0	240000	3.9800	9390.0	236000			
0.1260	302.0	240000	5.0100	11800.0	235000			
						5.0000	11800.0	235000

Di seguito, si riportano i grafici che legano le deformazioni alle tensioni.

Grafico 8.42. Tensione / deformazione – Materiali per miscele “a caldo”

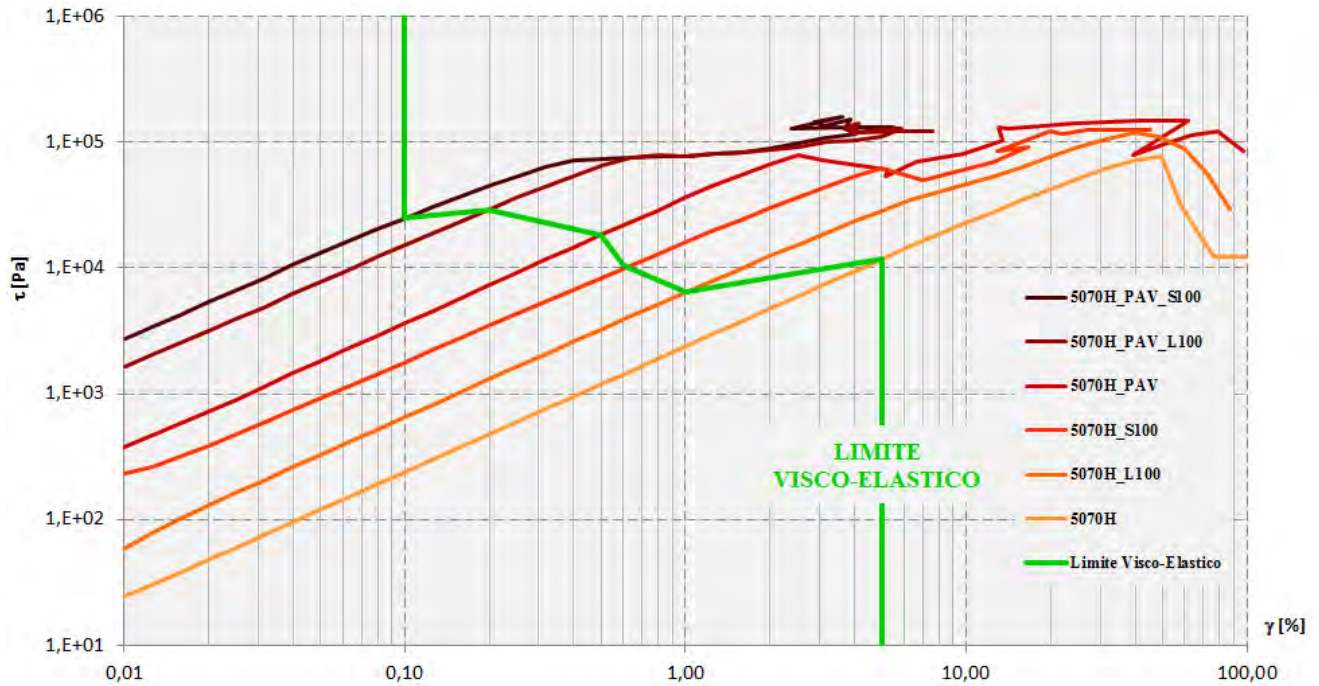
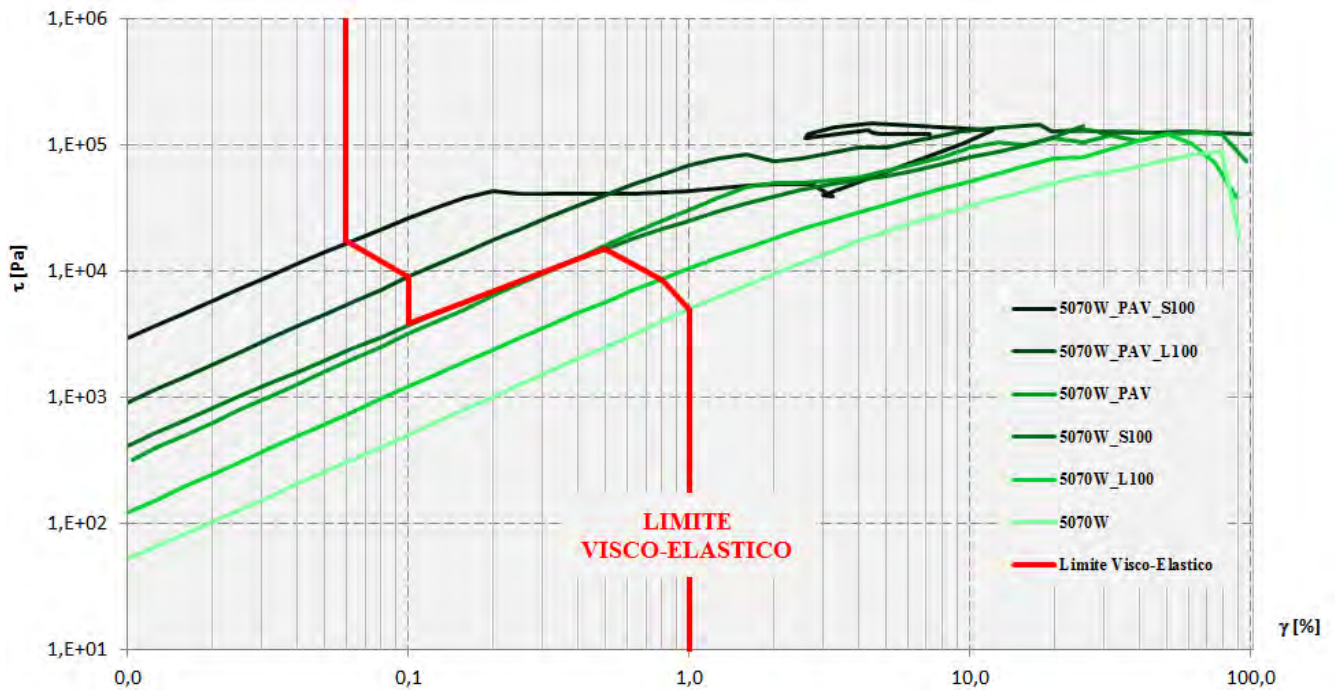


Grafico 8.42. Tensione / deformazione – Materiali per miscele “tiepide - warm”



I grafici successivi, in maniera del tutto analoga, riportano gli andamenti rilevati modulo complesso - deformazione.

Grafico 8.43. Modulo complesso / deformazione – Materiali per miscele “a caldo”

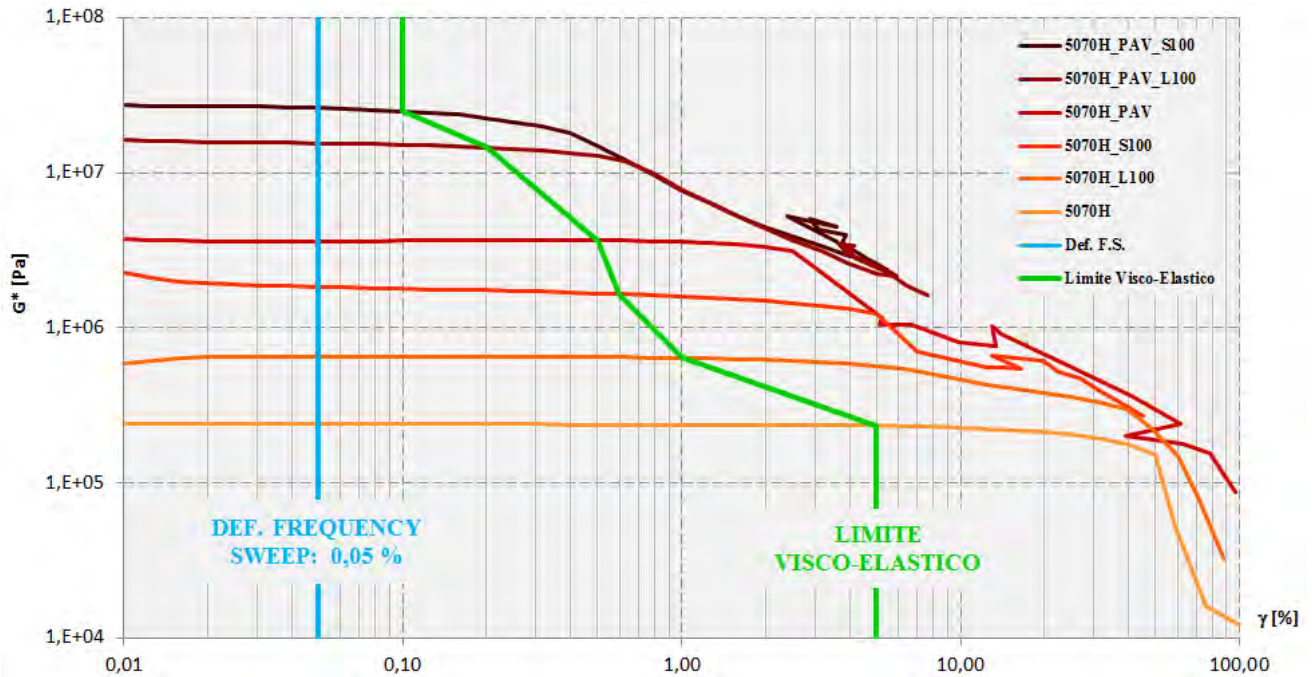
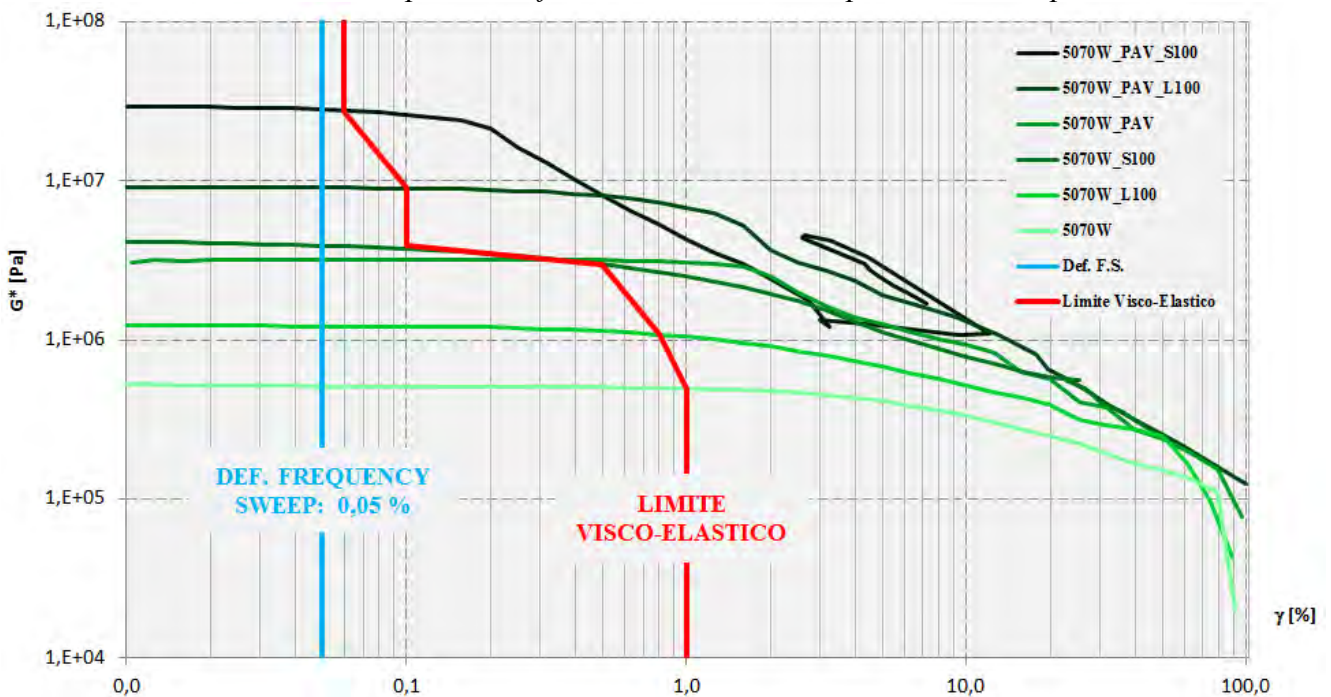


Grafico 8.44. Modulo complesso / deformazione – Materiali per miscele “tiepide - warm”



Teoricamente il limite elastico si raggiunge quando si ha un gradiente di deformazione superiore al 5%: tuttavia, non sempre tale criterio è risultato applicabile, a causa di alcuni assestamenti dei campioni nei primi istanti di prova che hanno fornito alcune rilevazioni “fuori trend”. Il limite si è quindi identificato analizzando direttamente gli output grafici del reometro, che garantiscono una precisione superiore rispetto ai comuni fogli elettronici utilizzati per l’elaborazione dei dati.

Tabella 8.6. *Deformazioni limite per elasticità lineare*

Miscele "a caldo"		Miscele "tiepide"	
Campione	Def. L.V.E. [%]	Campione	Def. L.V.E. [%]
5070H	5.00	5070W	1.00
5070H_L100	1.00	5070W_L100	0.80
5070H_S100	0.60	5070W_S100	0.50
5070H_PAV	0.50	5070W_PAV	0.10
5070H_PAV_L100	0.20	5070W_PAV_L100	0.10
5070H_PAV_S100	0.10	5070W_PAV_S100	0.06

Dall'analisi dei campioni risulta subito evidente come per i mastici siano sufficienti deformazioni minori per il raggiungimento del limite elastico lineare: in particolare, l'effetto sembra più accentuato per i mastici a base di filler di scoria. E' anche possibile affermare che il processo di invecchiamento contribuisce sensibilmente al fenomeno, anche se in minore misura rispetto all'additivazione warm.

Dagli ultimi grafici è anche apprezzabile il valore scelto per lo sviluppo delle prove di "frequency sweep": in tutti i casi si è prestata attenzione alla scelta del livello deformativo, al fine di garantire lo sviluppo di prove "frequency" in campo elastico lineare. Si è potuto quindi stabilire una deformazione fruibile per tutti i campioni pari allo 0.05%.

8.2.2. Test “frequency sweep”

Il principale obiettivo della prova di “frequency sweep” è quello di determinare i parametri reologici mediante la costruzione della master curve del materiale: di seguito si elencano, nel dettaglio, i passi logici compiuti nella fase di elaborazione; per la comprensione della teoria relativa la costruzione delle master curve e la rappresentazione dei parametri reologici si rimanda al precedente capitolo 4 riguardante la teoria reologica.

Come già spiegato in precedenza, il protocollo ha previsto lo sviluppo di prove alla temperatura di riferimento ($T = 34 \text{ °C}$) con entrambe le geometrie di carico: in prima istanza, quindi, è necessario stabilire quale delle due serie di dati, relative alla temperatura di riferimento, sia da tenere in considerazione. La pratica comune indica un criterio di scelta basato sul valore di modulo complesso: in particolare, per valori di G^* superiori a 10^5 Pa , si suggerisce la geometria da 8 mm (*PP08*), mentre, per valori inferiori si suggerisce quella da 20 mm (*PP20*). Controllando quindi i valori di modulo complesso è stato possibile individuare la serie da considerare nell’elaborazione dei dati: per rispondenza al criterio, e per omogeneità di risultati, si è considerata valida, in ogni elaborazione, soltanto la serie di dati relativa alla geometria di carico da 8 mm (*PP08*).

L’elaborazione dei dati per la costruzione delle master curve si è quindi sviluppata in due passi: il primo passo è stato concepito allo scopo di determinare accuratamente i valori degli shift factor a_T : ciò si è reso possibile, mediante risoluzione iterativa, minimizzando l’errore relativo a due diverse serie di shift factor, la prima determinata secondo l’equazione di Williams-Landel-Ferry (W.L.F.), e la seconda inserita inizialmente a mano, e poi ricalibrata dal risolutore ad ogni iterazione. E’ stato così possibile determinare la master curve sperimentale, che si è scelto di rappresentare divisa per colore, a seconda della temperatura di prova relativa alla porzione di dati in esame.

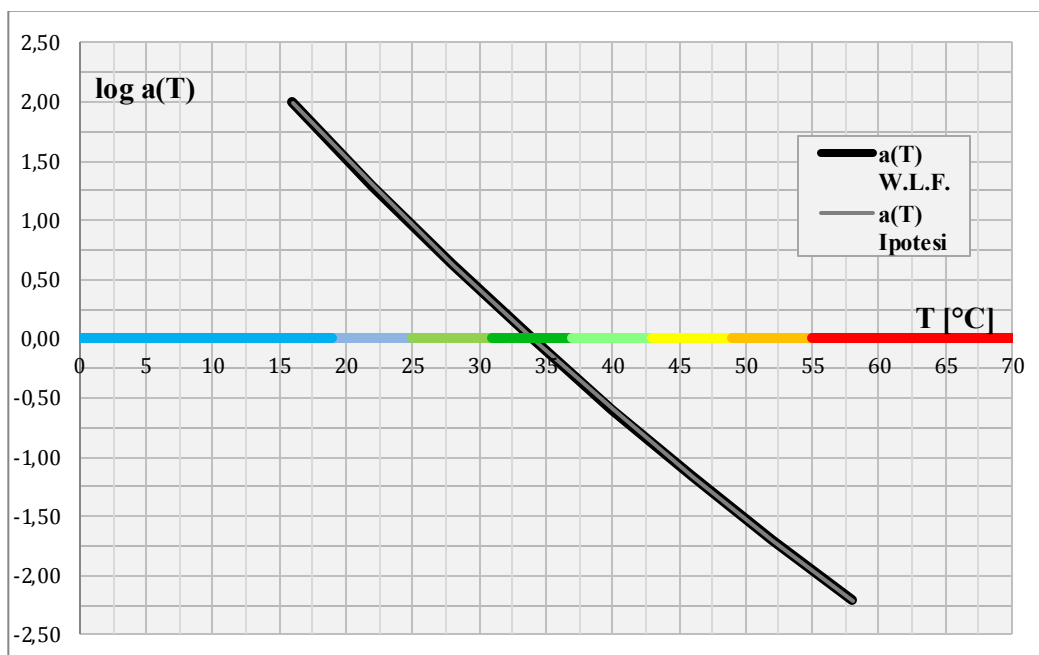
Tabella 8.7. Elaborazione master curve – Passo 1: determinazione degli shift factor a_T

Shift Factor $a(T)$ manuali									
T [°C]	16	22	28	34	40	46	52	58	
$a(T)$ Manuali	98.9409	19.6389	4.2560	1.00000	0.25316	0.06867	0.01986	0.00609	
LOG $a(T)$	1.9954	1.2931	0.6290	0.0000	-0.5966	-1.1632	-1.7021	-2.2152	

Shift Factor $a(T)$ W.L.F. [C1 . C2]									Parametri W.L.F.	
T [°C]	16	22	28	34	40	46	52	58	C1	C2
$a(T)$ W.L.F.	98.9440	19.6392	4.2560	1.0000	0.2531	0.0686	0.01986	0.00609		
LOG $a(T)$	1.9953	1.2931	0.6290	0	-0.5965	-1.1632	-1.7021	-2.2152	23.1607	226.9282

ERRORE Logaritmo Shift Factor $a(T)$ Manuali / W.L.F.									Obiet. ERRORE (Somma)	
Δ LOG $a(T)$	1.86E-10	3.89E-11	1.32E-12	1.89E-13	3.61E-15	1.83E-12	4.35E-11	1.39E-10	4.10E-10	

Il risolutore è stato impostato con l'obiettivo di minimizzare l'errore calcolato come somma delle differenze tra i logaritmi degli shift factor: si sono impostate come variabili le caselle di C1 e C2 e quelle degli $a(T)$ "manuali". Le differenze tra le 2 serie $a(T)$ non si apprezzano a causa degli arrotondamenti, tuttavia sono testimoniate dalla tabella degli errori (quadrati delle differenze).

Grafico 8.45. Esempio: 5070H – Andamento degli shift factor $a(T)$ 

Le due spezzate sono pressoché sovrapposte a causa delle minime differenze tra le 2 serie di shift factor a_T .

Il secondo passo viene sviluppato al fine di determinare la curva maestra teorica che deriva dal modello Christensen and Anderson modificato (C.A.M.): gli a_T "manuali" calcolati al passo 1 sono utilizzati per il calcolo delle frequenze ridotte, che rappresentano la variabile indipendente del modello per il calcolo del modulo complesso G^* : i parametri G_e , G_g , f_c , k , m_e , vengono determinati con un ulteriore processo iterativo. Il risolutore va impostato minimizzando l'errore totale che deriva dalle differenze dei valori di modulo complesso G^* relativi alla serie di dati sperimentali e

alla serie di valori calcolata con il modello C.A.M.. Dopo la valutazione dei risultati proposti dal risolutore si è scelto di mantenere costante il parametro G_e (risultante sempre prossimo allo 0), calcolando di fatto solo i valori di G_g, f_c, k, m_e .

Tabella 8.8. Elaborazione master curve – Passo 2: determinazione parametri modello C.A.M.

Shift Factor $a(T)$ manuali determinati al Passo 1								
T [°C]	16	22	28	34	40	46	52	58
$a(T)$ Manuali	98.941	19.639	4.256	1.000	0.253	0.069	0.020	0.006
LOG $a(T)$	1.9954	1.2931	0.6290	0.0000	-0.5966	-1.1632	-1.7021	-2.2152
$f'c$	1573.161	312.259	67.670	15.900	4.025	1.092	0.316	0.097
	1246.656	247.450	53.626	12.600	3.190	0.865	0.250	0.077
	989.409	196.389	42.560	10.000	2.532	0.687	0.199	0.061
	789.549	156.719	33.963	7.980	2.020	0.548	0.158	0.049
	627.286	124.511	26.983	6.340	1.605	0.435	0.126	0.039
	497.673	98.784	21.408	5.030	1.273	0.345	0.100	0.031
	395.764	78.556	17.024	4.000	1.013	0.275	0.079	0.024
	314.632	62.452	13.534	3.180	0.805	0.218	0.063	0.019
	249.331	49.490	10.725	2.520	0.638	0.173	0.050	0.015
	197.882	39.278	8.512	2.000	0.506	0.137	0.040	0.012
	157.316	31.226	6.767	1.590	0.403	0.109	0.032	0.010
	124.666	24.745	5.363	1.260	0.319	0.087	0.025	0.008
	98.941	19.639	4.256	1.000	0.253	0.069	0.020	0.006
	78.955	15.672	3.396	0.798	0.202	0.055	0.016	0.005
	62.729	12.451	2.698	0.634	0.161	0.044	0.013	0.004
	49.767	9.878	2.141	0.503	0.127	0.035	0.010	0.003
	39.576	7.856	1.702	0.400	0.101	0.027	0.008	0.002
	31.463	6.245	1.353	0.318	0.081	0.022	0.006	0.002
	24.933	4.949	1.073	0.252	0.064	0.017	0.005	0.002
	19.788	3.928	0.851	0.200	0.051	0.014	0.004	0.001
	15.732	3.123	0.677	0.159	0.040	0.011	0.003	0.001
	12.467	2.475	0.536	0.126	0.032	0.009	0.003	0.001
	9.894	1.964	0.426	0.100	0.025	0.007	0.002	0.001
	7.895	1.567	0.340	0.080	0.020	0.005	0.002	0.000
	6.273	1.245	0.270	0.063	0.016	0.004	0.001	0.000
	4.977	0.988	0.214	0.050	0.013	0.003	0.001	0.000
	3.958	0.786	0.170	0.040	0.010	0.003	0.001	0.000
	3.146	0.625	0.135	0.032	0.008	0.002	0.001	0.000
2.493	0.495	0.107	0.025	0.006	0.002	0.001	0.000	
1.979	0.393	0.085	0.020	0.005	0.001	0.000	0.000	
1.573	0.312	0.068	0.016	0.004	0.001	0.000	0.000	

Modello Christensen and Anderson modificato (C.A.M.)

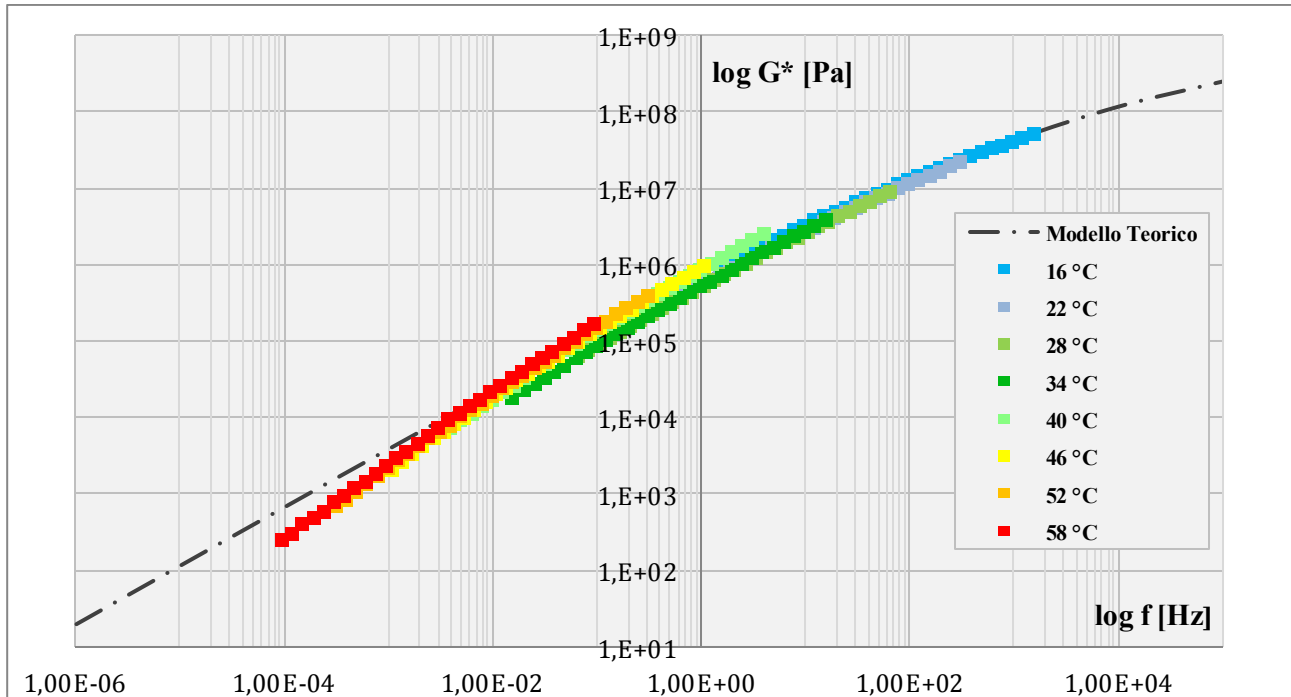
Obiettivo Errore	Parametri modello G	
	G_e	Costante=0
1.87E+13	G_g	1.15E+09
	f_c	9608.09
	k	0.25
	m_e	0.77
	Ge è costante	

T	f_R	G^* Sperim.	G^* Modello	Errore G^*
[°C]	[Hz]	[Pa]	[Pa]	[-]
16	1.57E+03	52500000	52829600	108635980219
	1.25E+03	47200000	47291573	8385557623
	9.89E+02	42300000	42263028	1366902769
	7.90E+02	37900000	37783721	13520807255
	6.27E+02	33900000	33628630	73641565083
	4.98E+02	30300000	29841234	210466528269

Il risolutore è stato impostato con l'obiettivo di minimizzare l'errore calcolato come somma delle differenze tra i valori di modulo complesso di serie sperimentale e serie modello: si sono impostate come variabili le caselle G_g, f_c, k e m_e .

Una volta determinati i parametri del modello è stato possibile costruire il grafico della master curve, nel quale si può apprezzare la curva sperimentale e la curva determinata secondo il modello.

Grafico 8.46. *Esempio: 5070H_L100 – Master curve sperimentale / teorica*



E' stato inoltre possibile rappresentare i dati sperimentali relativi al modulo complesso e all'angolo di fase sul piano di Black, e i moduli elastico e vetroso sul piano Cole-Cole.

Grafico 8.47. *Esempio: 5070H_L100 – Piano di Black*

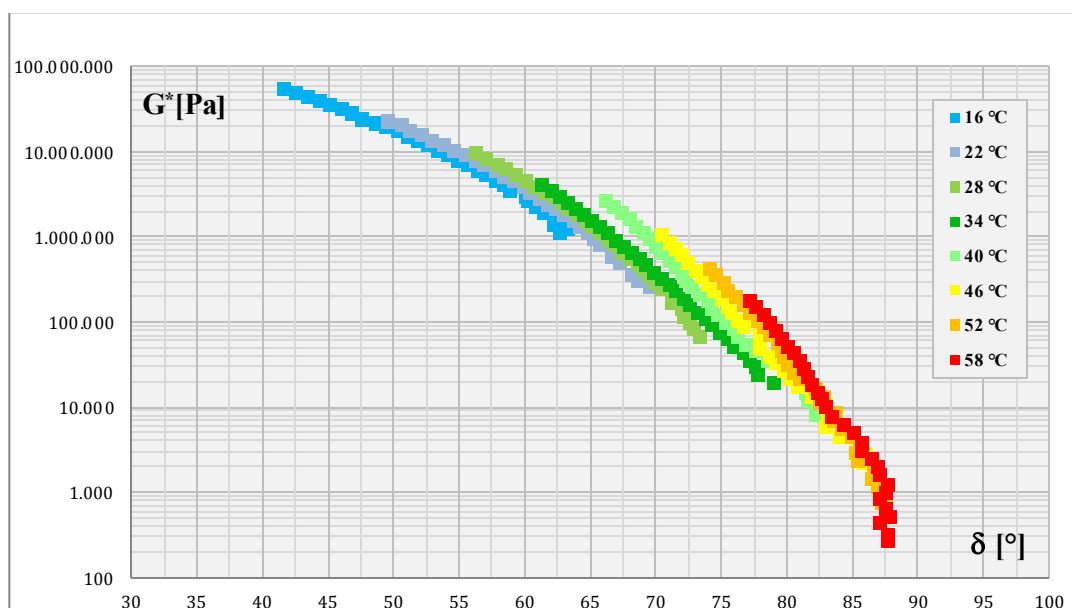
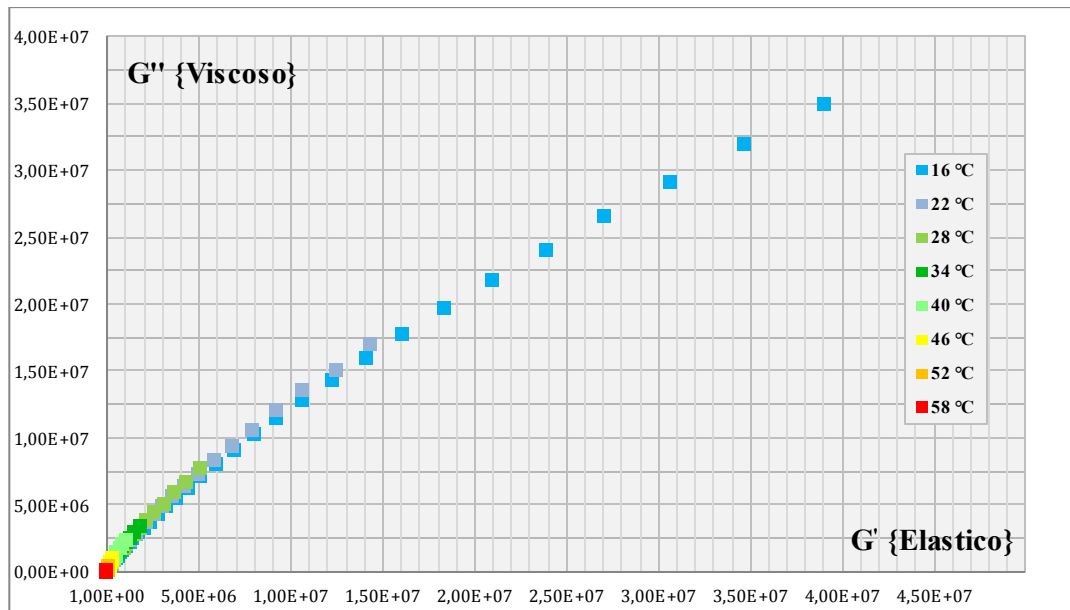
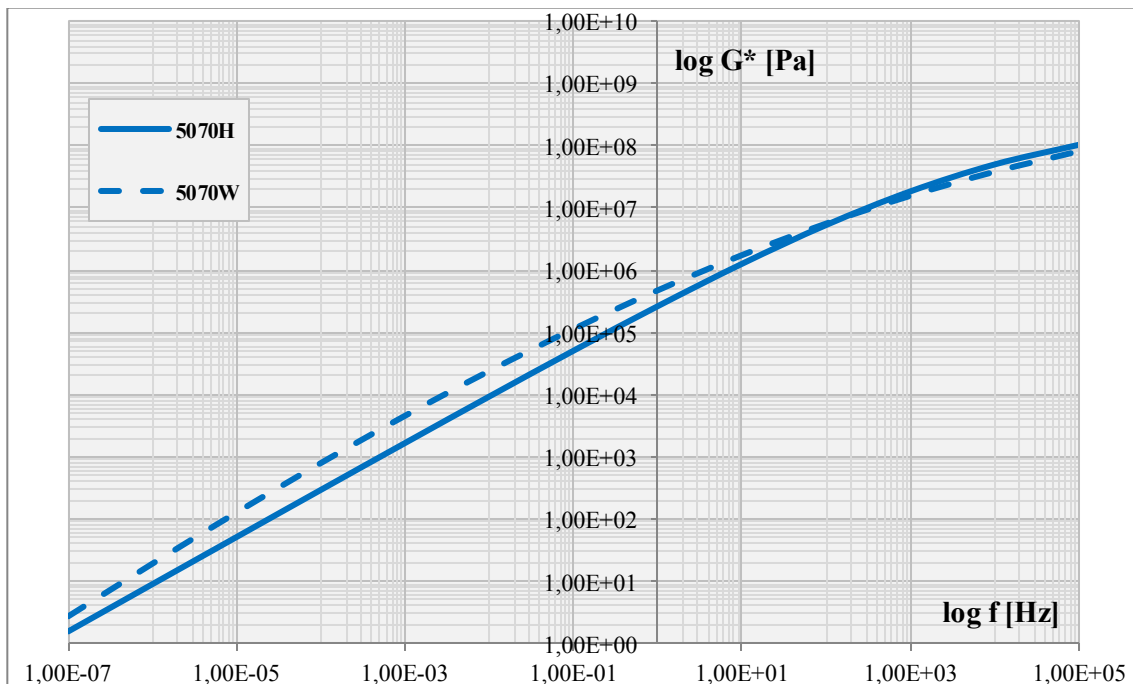


Grafico 8.48. Esempio: 5070H_L100 – Piano Cole-Cole



Una volta ricostruite tutte le master curves, e rappresentata per ogni campione la curva dedotta dal modello, è stato possibile indagare sull'influenza dei diversi materiali. I successivi grafici prendono singolarmente in esame alcune curve per mettere in evidenza diversi aspetti.

Grafico 8.49. Master curves – influenza dell'additivo warm sui bitumi

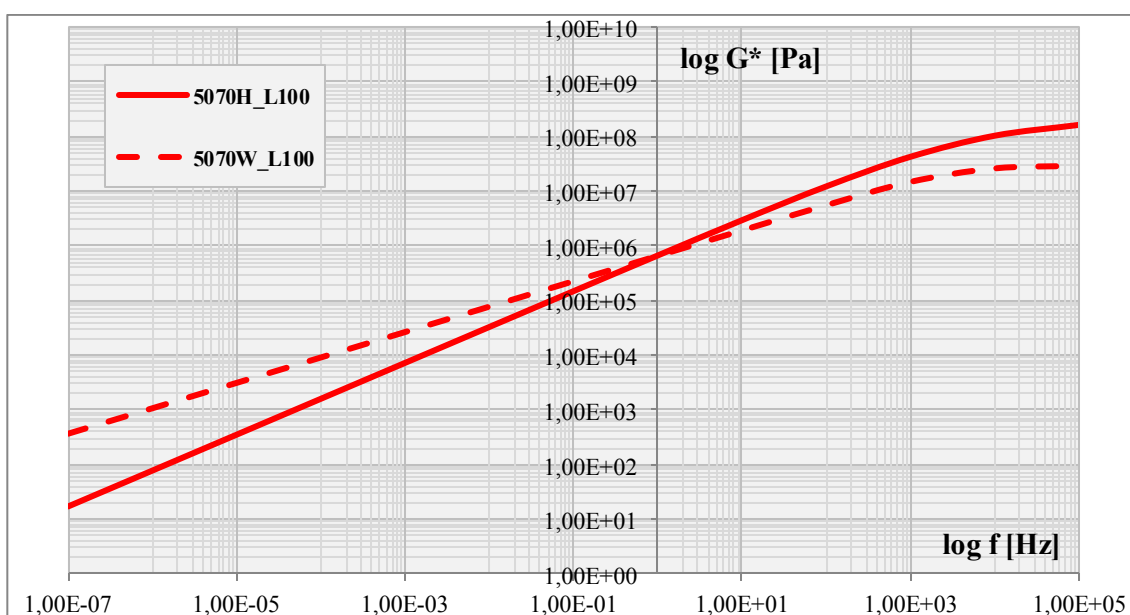


Analizzando il comportamento fornito dai bitumi è possibile constatare che l'additivo warm incrementa i valori di modulo complesso G^* . Il fenomeno è ben marcato sino a che le frequenze

non diventano troppo elevate. Ad alte frequenze, che corrispondono a basse temperature, l'incremento di rigidità diventa trascurabile.

Un trend analogo si è riscontrato per i mastici a base di filler calcareo: il grafico successivo ne rappresenta le master curves "hot" e "warm". Anche in questo caso l'incremento di rigidità è limitato sino ad un determinato valore di frequenza: il punto di inversione della tendenza si situa a frequenze leggermente inferiori rispetto a quelle riscontrate per i bitumi, per cui i benefici di rigidità prodotti dall'additivo sembrano estesi ad un minore range di temperature.

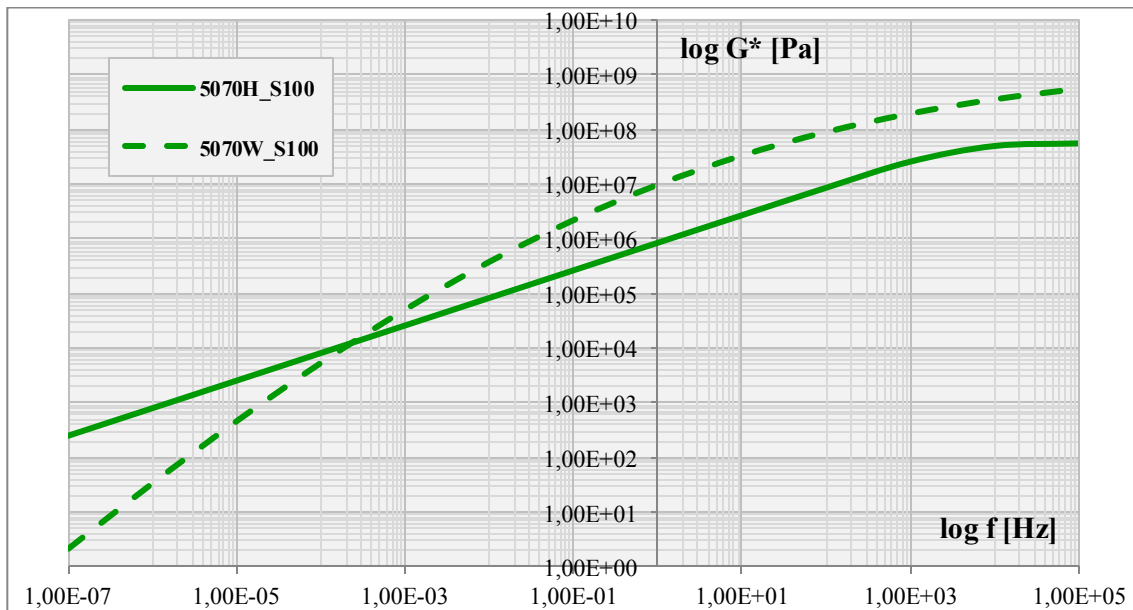
Grafico 8.50. Master curves – influenza dell'additivo warm sui mastici calcarei



Nel caso di mastice con filler calcareo è tuttavia evidente che l'aumento della rigidità alle alte temperature e basse frequenze è maggiore rispetto a quello prodotto dall'additivo nel caso del bitume semplice. Si dimostra quindi che l'effetto dovuto all'impiego di additivo risulta superiore in presenza di filler: il comportamento può essere ben giustificato dalla natura dell'additivo stesso, il quale modifica le proprietà delle miscele interagendo a livello microscopico sul rivestimento delle particelle di inerte, per cui è lecito attendere delle variazioni più evidenti nei mastici.

Il grafico successivo illustra le stesse curve nel caso di mastice a base di scoria.

Grafico 8.51. Master curves – influenza dell'additivo warm sui mastici a base di scoria

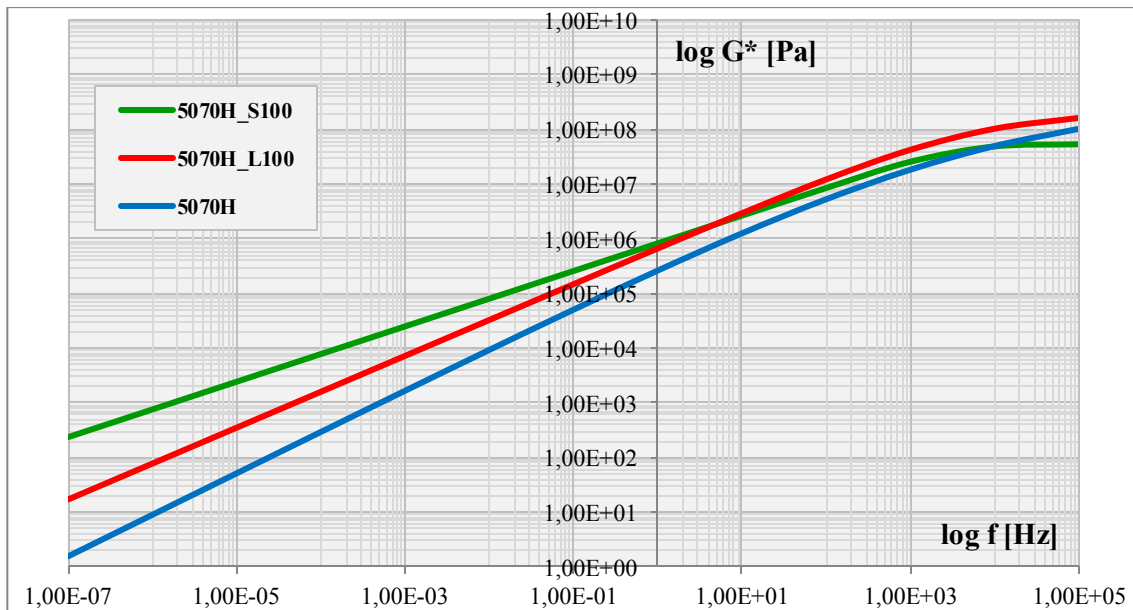


Nel caso di mastice a base di scoria si registra un'inversione di tendenza rispetto al mastice calcareo e al bitume: i miglioramenti del modulo di rigidità prodotti dall'additivo sono ben visibili alle alte frequenze e basse temperature; viceversa la rigidità a basse frequenze e alte temperature risulta inferiore in presenza di additivo.

E' verosimile ipotizzare che il diverso assortimento granulometrico della scoria, unitamente all'alto peso specifico e alla diversa natura mineralogica, influisca sulle risposte di rigidità garantite. Può essere verosimile pensare che le diverse caratteristiche della scoria influiscano sulle modalità di funzionamento dell'additivo che produce i suoi effetti interfacciandosi a livello microscopico sul rivestimento dei singoli grani di inerte, modificando le modalità di rivestimento degli aggregati.

La successiva rappresentazione propone il confronto tra le diverse miscele a caldo.

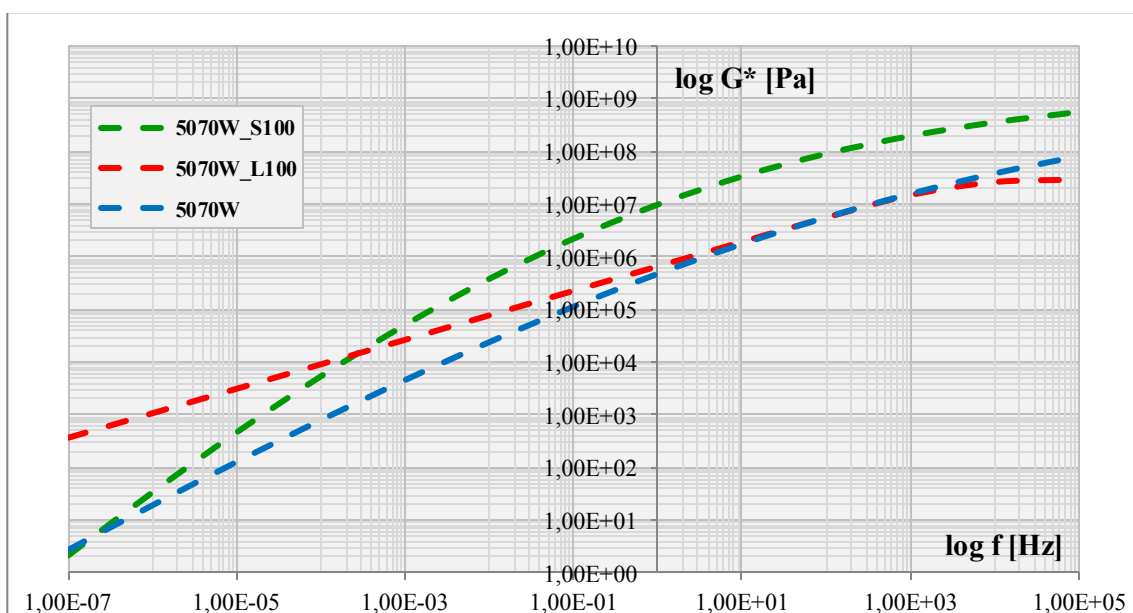
Grafico 8.52. Master curves – bitumi e mastici “hot”



Le curve dimostrano chiaramente come in generale la presenza dei filler garantisca un aumento del modulo complesso rappresentativo della rigidità dei conglomerati: è altrettanto chiaro come l'effetto sia maggiore nel caso di mastice a base di scoria, testimoniando l'importanza della tipologia dell'inerte impiegato.

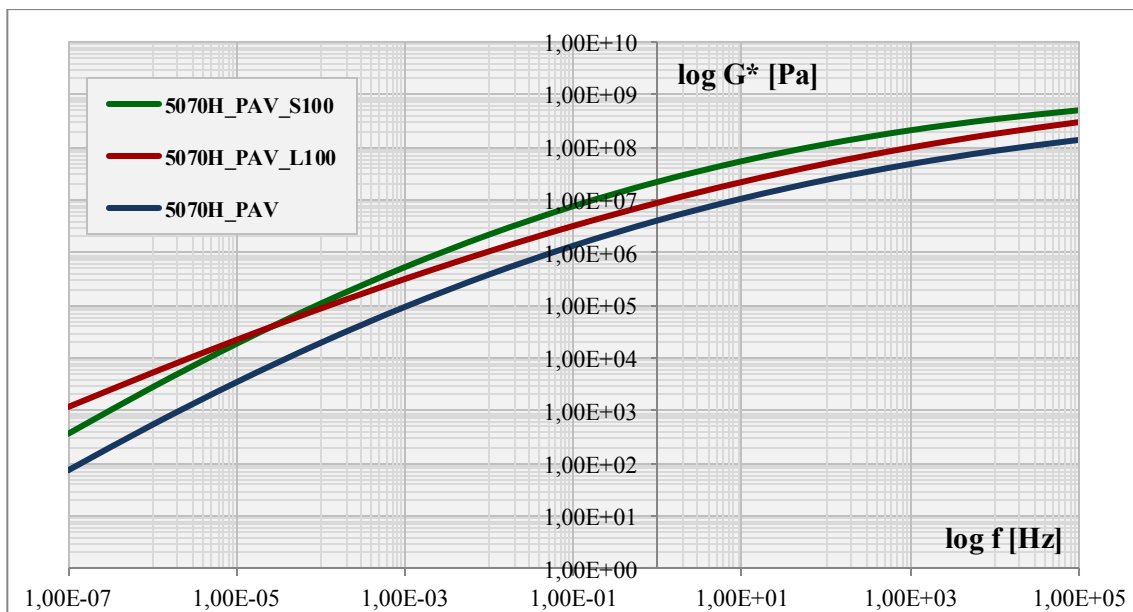
Il successivo grafico propone la stessa visualizzazione per le miscele di tipo “warm”.

Grafico 8.53. Master curves – bitumi e mastici “warm”



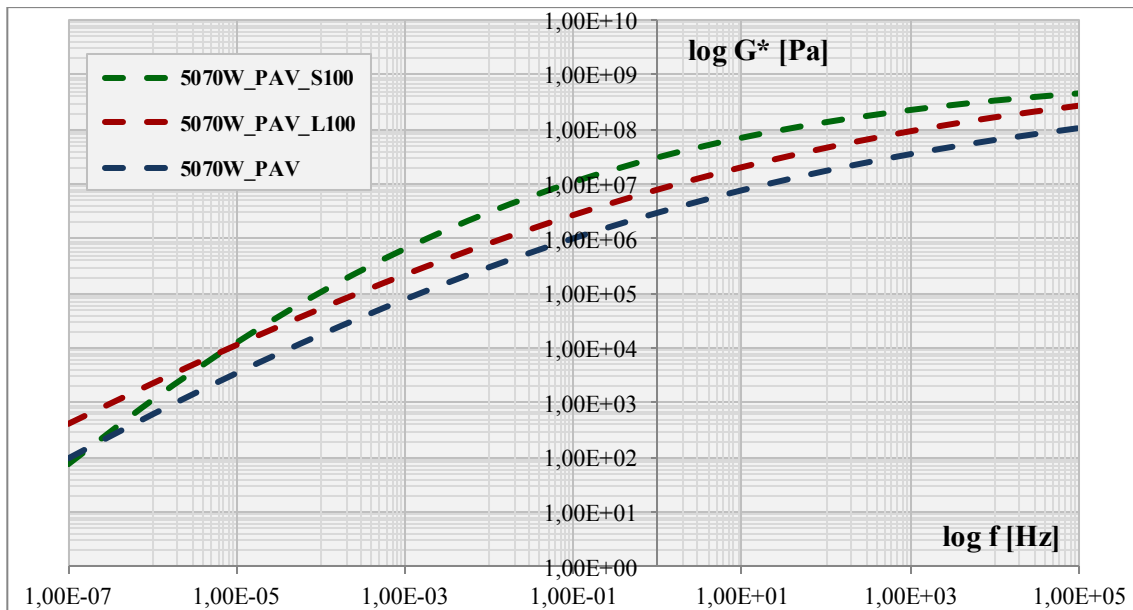
Anche in questo caso è apprezzabile la maggiore efficacia dell'additivo in presenza di filler: risulta tuttavia ancora visibile il diverso meccanismo di funzionamento dell'additivo in presenza di scoria. Le stesse analisi possono anche essere riproposte analizzando i campioni sottoposti preventivamente a procedura P.A.V..

Grafico 8.54. Master curves – bitumi e mastici “hot” invecchiati (P.A.V.)



Le curve propongono andamenti simili a quelli riscontrati per i campioni “hot” non invecchiati: si distingue l'aumento del modulo complesso per i 2 mastici, e maggiormente per quello a base di scoria. Le stesse considerazioni si possono estendere ai campioni invecchiati e modificati con l'additivo tiepido.

Grafico 8.55. Master curves – bitumi e mastici “warm” invecchiati (P.A.V.)



In generale, le curve possono condurre alle seguenti deduzioni:

- si è dimostrata la nota proprietà irrigidente dei filler, che garantisce moduli complessi più alti in tutti i casi;
- la presenza di additivo warm, per temperature medio-alte, sembra essere efficace garantendo notevoli incrementi della rigidità rappresentata dal modulo complesso;
- l'efficacia dell'additivo warm è nettamente superiore in presenza di filler, anche se la tipologia di inerte impiegato ne determina i meccanismi di funzionamento; il fatto può trovare una spiegazione considerando il meccanismo di interazione dell'additivo con i grani di inerte costituenti la miscela;
- le stesse considerazioni hanno trovato conferma anche analizzando i medesimi materiali, ma sottoposti a trattamento P.A.V.: nel caso di miscele invecchiate, i benefici sono risultati minori.

8.2.3. Test “creep recovery” (M.S.C.R.)

Come anticipato nella definizione dei test sperimentali, lo scopo dell’elaborazione dati delle prove M.S.C.R. (Multiple Stress Creep Recovery) è quello di calcolare i parametri R e J_{nr} precedentemente descritti. In particolare si sono riportati per ogni temperatura e per ogni livello tensionale (2 livelli per i bitumi [$\tau=0.1\text{ kPa}$; $\tau=3.2\text{ kPa}$], e 3 livelli per i mastici [$\tau=0.1\text{ kPa}$; $\tau=3.2\text{ kPa}$; $\tau=10.0\text{ kPa}$]): per ogni materiale, infine, è stato possibile sintetizzare i parametri in una tabella, suddivisa per le differenti temperature.

Tabella 8.9. Elaborazione M.S.C.R. – Esempio: campione 5070H, $T = 76\text{ }^\circ\text{C}$

5070H - CREEP COMPLIANCE $\tau_1 = 0.1\text{ kPa}$; $T = 76\text{ }^\circ\text{C}$										
N.	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	R (0.1)	J_{nr} (0.1)
Cycle	Initial creep strain	Final creep strain	Final recovery strain	Initial creep strain	Final creep strain	Final recovery strain	Adjusted strain End of creep	Adjusted strain End of recovery	Percentual recovery	Non-recoverable creep compliance
	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[1/kPa]
1	-75.7	117.0	115.0	-0.76	1.17	1.15	1.93	1.91	1.04	19.07
2	115.0	308.0	306.0	1.15	3.08	3.06	1.93	1.91	1.04	19.10
3	306.0	500.0	498.0	3.06	5.00	4.98	1.94	1.92	1.03	19.20
4	498.0	692.0	691.0	4.98	6.92	6.91	1.94	1.93	0.52	19.30
5	691.0	886.0	884.0	6.91	8.86	8.84	1.95	1.93	1.03	19.30
6	884.0	1090.0	1080.0	8.84	10.90	10.80	2.06	1.96	4.85	19.60
7	1080.0	1270.0	1260.0	10.80	12.70	12.60	1.90	1.80	5.26	18.00
8	1260.0	1470.0	1460.0	12.60	14.70	14.60	2.10	2.00	4.76	20.00
9	1460.0	1660.0	1650.0	14.60	16.60	16.50	2.00	1.90	5.00	19.00
10	1650.0	1850.0	1840.0	16.50	18.50	18.40	2.00	1.90	5.00	19.00
									2.95	19.16
									R 0.1	J_{nr} 0.1

----- = Risultati test M.S.C.R. 5070H - 76°C - PP20 - G1

5070H - CREEP COMPLIANCE $\tau_1 = 3.2\text{ kPa}$; $T = 76\text{ }^\circ\text{C}$										
N.	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	R (3.2)	J_{nr} (3.2)
Cycle	Initial creep strain	Final creep strain	Final recovery strain	Initial creep strain	Final creep strain	Final recovery strain	Adjusted strain End of creep	Adjusted strain End of recovery	Percentual recovery	Non-recoverable creep compliance
	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[1/kPa]
1	1840.00	8720.00	8710.00	18.40	87.20	87.10	68.80	68.70	0.15	21.47
2	8710.00	15600.00	15500.00	87.10	156.00	155.00	68.90	67.90	1.45	21.22
3	15500.00	22400.00	22300.00	155.00	224.00	223.00	69.00	68.00	1.45	21.25
4	22300.00	29300.00	29200.00	223.00	293.00	292.00	70.00	69.00	1.43	21.56
5	29200.00	36200.00	36100.00	292.00	362.00	361.00	70.00	69.00	1.43	21.56
6	36100.00	43000.00	42900.00	361.00	430.00	429.00	69.00	68.00	1.45	21.25

7	42900.00	49900.00	49800.00	429.00	499.00	498.00	70.00	69.00	1.43	21.56
8	49800.00	56800.00	56700.00	498.00	568.00	567.00	70.00	69.00	1.43	21.56
9	56700.00	63700.00	63600.00	567.00	637.00	636.00	70.00	69.00	1.43	21.56
10	63600.00	70600.00	70500.00	636.00	706.00	705.00	70.00	69.00	1.43	21.56
									1.31	21.46
									R 3.2	J _{nr} 3.2

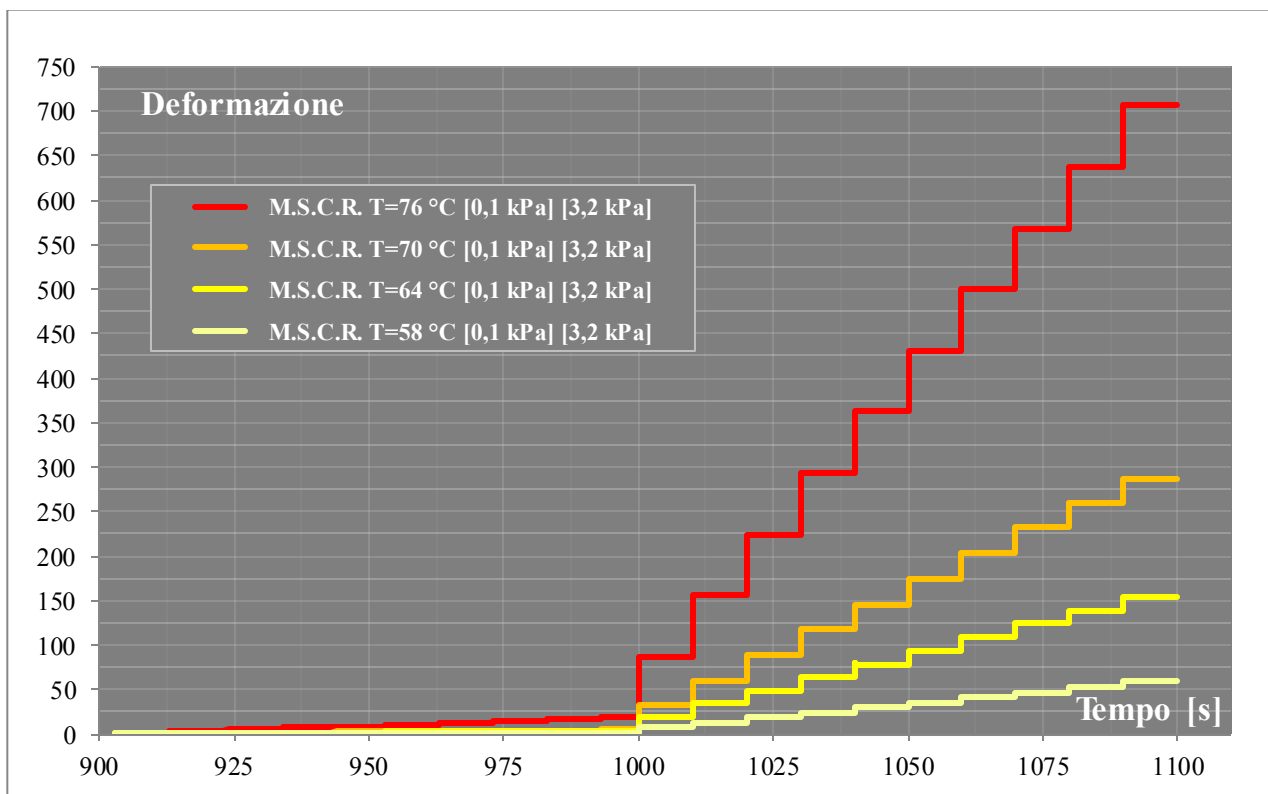
Quindi, riassumendo:

T	R 0.1	R 3.2	ΔR	J _{nr} 0.1	J _{nr} 3.2	ΔJ_{nr}
[°C]	[%]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	[%]
76	2.95	1.31	55.74	19.16	21.46	12.00

Tabella 8.10. Elaborazione M.S.C.R. – Sintesi parametri – Esempio: campione 5070H

T	R 0.1	R 3.2	$ \Delta R $	J _{nr} 0.1	J _{nr} 3.2	$ \Delta J_{nr} $
[°C]	[%]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	[%]
58	5.36	1.74	67.46	1.62	1.78	9.52
64	2.39	2.01	16.01	4.21	4.65	10.45
70	2.21	2.50	13.11	4.77	8.79	84.24
76	2.95	1.31	55.74	19.16	21.46	12.00

Grafico 8.56. Prova M.S.C.R. – Esempio: campione 5070H – $\tau = 0.1$ kPa



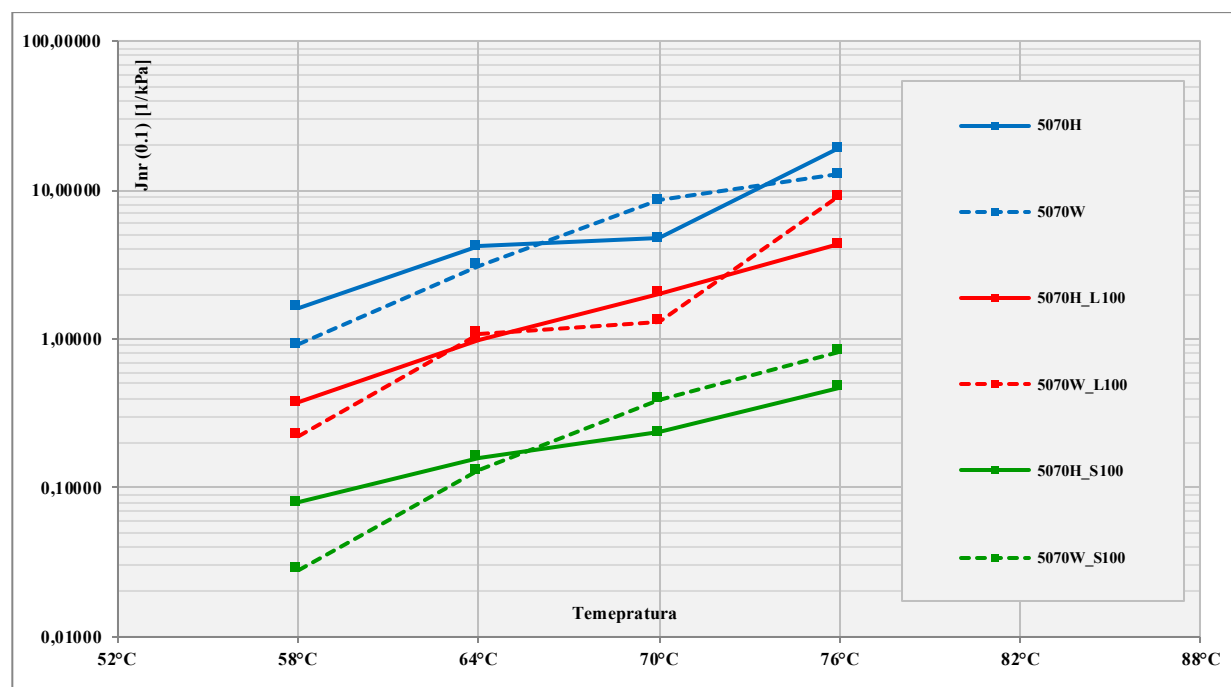
Per costituire le tabelle e consentire la corretta determinazione dei parametri di interesse, è stato necessario analizzare, nel dettaglio, la risposta del materiale nel preciso istante in cui cessa la sollecitazione e inizia la fase di scarico che consente il recupero deformativo. Si è infatti riscontrato che, negli istanti immediatamente successivi alla fine della fase di carico, sia i bitumi, sia i mastici, continuano a deformarsi per qualche frazione di secondo, probabilmente per l'inerzia dovuta alla forzante: è quindi stato necessario impostare il software in modo da sviluppare, nell'istante critico, rilevazioni sensibili, con cadenza sino ai 0.01 secondi. Di volta in volta, si è dovuta determinare la massima deformazione raggiunta dal materiale, pena errori di calcolo nelle elaborazioni e l'impossibilità di determinare i valori di R e J_{nr} . Per consentire un'agevole interpretazione dei dati e favorire i confronti fra i diversi materiali, si propone una tabella che raccoglie tutti i parametri calcolati, catalogati per materiale, livello tensionale e temperatura di prova.

Tabella 8.11. *Elaborazione M.S.C.R. – Sintesi finale*

T [°C]	Sample	Recupero			"Compliance" non recuperabile		
		R [$\tau=0.1\text{kPa}$]	R [$\tau=3.2\text{kPa}$]	R [$\tau=10.0\text{kPa}$]	J _{nr} [$\tau=0.1\text{kPa}$]	J _{nr} [$\tau=3.2\text{kPa}$]	J _{nr} [$\tau=10.0\text{kPa}$]
		[%]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	[1/kPa]
58	5070H	5.36014	1.74396	NO TEST	1.62390	1.77844	NO TEST
	5070H_L100	8.31643	4.91921	2.28330	0.37710	0.37919	1.33750
	5070H_S100	29.91617	10.69125	6.01146	0.07966	0.04454	0.12313
	5070H_PAV	63.56192	62.87362	NO TEST	0.00813	0.00824	NO TEST
	5070H_PAV_L100	64.91881	62.49361	60.62136	0.00192	0.00225	0.00753
	5070H_PAV_S100	80.63384	68.15592	65.75694	0.00026	0.00059	0.00201
	5070W	19.64874	6.05731	NO TEST	0.92300	1.11578	NO TEST
	5070W_L100	23.74892	10.90503	4.09396	0.22610	0.25275	1.02500
	5070W_S100	50.48891	19.41417	10.67115	0.02813	0.02873	0.07891
	5070W_PAV	71.23775	70.88219	NO TEST	0.00602	0.00614	NO TEST
	5070W_PAV_L100	70.85550	69.84103	67.49296	0.00226	0.00237	0.00839
	5070W_PAV_S100	92.27314	79.76672	75.40686	0.00005	0.00017	0.00099

64	5070H	2.38837	2.00594	NO TEST	4.20960	4.64938	NO TEST
	5070H_L100	4.73988	65.12937	4.36682	0.99610	0.36063	4.29688
	5070H_S100	22.25615	6.21640	3.12078	0.16047	0.07000	0.21406
	5070H_PAV	52.88257	51.67052	NO TEST	0.02741	0.02767	NO TEST
	5070H_PAV_L100	55.13654	50.83783	45.37847	0.00656	0.00741	0.02588
	5070H_PAV_S100	75.80969	51.74294	45.14425	0.00090	0.00299	0.00943
	5070W	11.08098	3.00533	NO TEST	3.13800	3.90563	NO TEST
	5070W_L100	12.39096	2.35517	3.96041	1.09770	1.24344	5.38125
	5070W_S100	24.90494	8.78607	5.45996	0.13115	0.09222	0.31625
	5070W_PAV	64.06753	62.92701	NO TEST	0.01653	0.01708	NO TEST
	5070W_PAV_L100	64.37249	62.07235	54.85775	0.00601	0.00639	0.02563
	5070W_PAV_S100	82.31359	69.81727	63.61650	0.00034	0.00113	0.00473
70	5070H	2.21459	2.50484	NO TEST	4.76980	8.78781	NO TEST
	5070H_L100	4.03565	1.34440	3.65617	2.02060	2.13281	7.46250
	5070H_S100	20.09940	5.06944	4.94148	0.23499	0.12053	0.42531
	5070H_PAV	42.69836	37.71623	NO TEST	0.09505	0.10021	NO TEST
	5070H_PAV_L100	43.84555	38.33141	26.96815	0.02500	0.02523	0.09816
	5070H_PAV_S100	53.95516	37.55033	29.96688	0.00772	0.00890	0.02397
	5070W	5.63322	2.30987	NO TEST	8.47600	10.74531	NO TEST
	5070W_L100	14.20223	2.61425	3.17721	1.31510	1.58531	7.71875
	5070W_S100	16.63619	3.82919	3.14270	0.39358	0.25331	1.06594
	5070W_PAV	59.02641	51.45575	NO TEST	0.05061	0.05533	NO TEST
	5070W_PAV_L100	56.76044	51.10996	34.83523	0.01720	0.01923	0.09400
	5070W_PAV_S100	78.37809	58.76345	50.17885	0.00093	0.00336	0.01172
76	5070H	2.95256	1.30667	NO TEST	19.15700	21.45625	NO TEST
	5070H_L100	2.72710	2.98596	1.90856	4.29640	4.61625	16.06250
	5070H_S100	14.26948	3.55148	2.29182	0.47170	0.30153	1.34375
	5070H_PAV	30.88404	19.29814	NO TEST	0.30423	0.33438	NO TEST
	5070H_PAV_L100	34.65164	25.21492	11.61710	0.07228	0.07403	0.31125
	5070H_PAV_S100	48.36239	24.61211	14.88583	0.01941	0.02124	0.05697
	5070W	4.23095	1.42006	NO TEST	12.68000	17.33438	NO TEST
	5070W_L100	3.70697	2.15697	3.63724	9.11300	11.53469	59.75000
	5070W_S100	11.53220	3.47098	1.48073	0.82074	0.70272	3.74063
	5070W_PAV	48.79984	36.64176	NO TEST	0.14250	0.17159	NO TEST
	5070W_PAV_L100	46.54229	35.87910	15.40003	0.05080	0.05910	0.32688
	5070W_PAV_S100	71.52915	46.12407	33.90173	0.00345	0.00867	0.02722

Si effettua, di seguito, l'analisi dei diversi parametri presi in considerazione nel protocollo, illustrando i dati, di volta in volta, su grafici diversi.

Grafico 8.57. “Compliance” non recuperabile alla tensione di 0.1 kPa – Bitumi e mastici

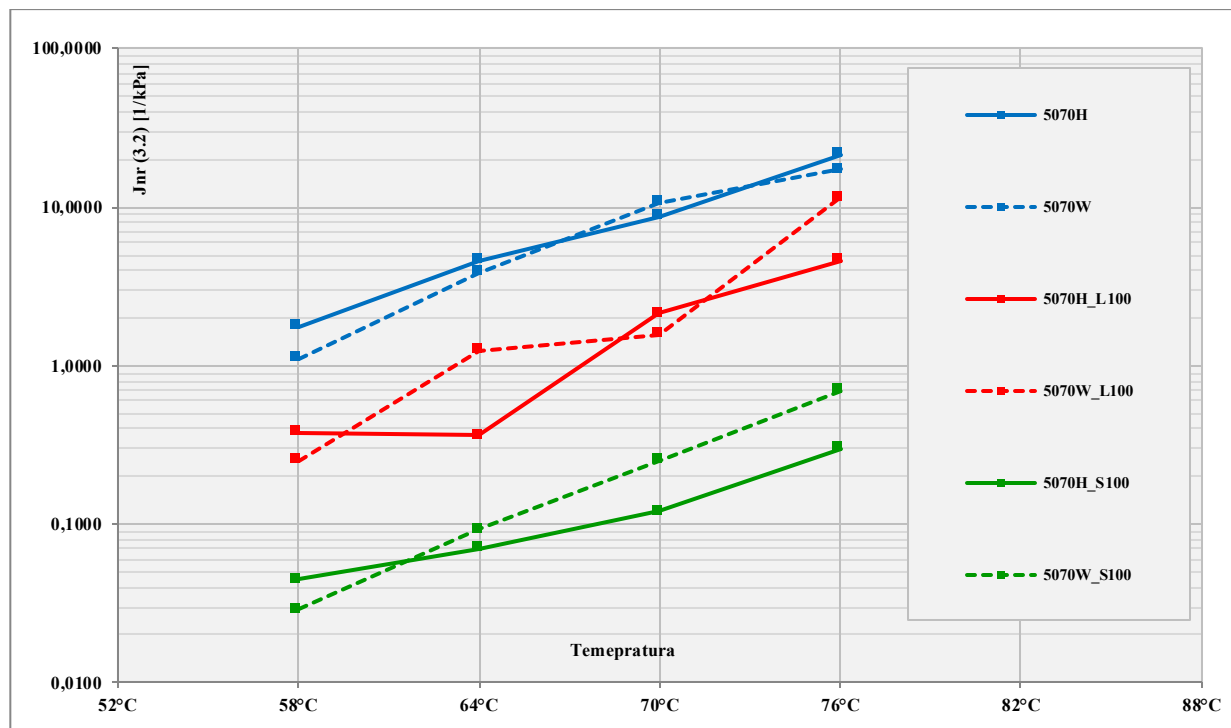
Come prevedibile, si può riscontrare come il parametro di “compliance” non recuperabile J_{nr} aumenti con l’innalzamento della temperatura per l’intero insieme dei campioni testati, siano essi bitumi o mastici.

Per quanto illustrato, e in accordo con quanto affermato da Cardone et al. (2013), tutti i materiali testati dimostrano simili suscettibilità alla temperatura, fattore testimoniato da pendenze totali delle serie molto simili.

Il grafico consente inoltre di dimostrare il ben noto effetto irrigidente dei filler: tutti i mastici dimostrano valori di “compliance” non recuperabile significativamente inferiori, se paragonati ai bitumi.

Lo stesso grafico consente di apprezzare la diversa risposta, in termini di deformazione, di campioni affini, costituiti prima con bitume tradizionale, e, in seguito, modificati con additivo tiepido. In generale, eccezion fatta per alcuni punti, sembra possibile riscontrare una diminuzione dei valori di “compliance” non recuperabile, che si traduce in un minore deformazione residua in presenza di additivo warm.

Le considerazioni sin qui effettuate trovano conferma anche nello stesso grafico relativo alla tensione di 3.2 kPa.

Grafico 8.58. “Compliance” non recuperabile alla tensione di 3.2 kPa – Bitumi e mastici

Al fine di valutare più attentamente l'effetto di irrigidimento nei mastici, e di investigare sulle differenze provocate dalla natura dei filler, si è deciso di riorganizzare i dati esprimendo il parametro J_r , ovvero il rapporto tra le “compliance” non recuperabili dei mastici e dei loro bitumi di origine, calcolato allo stesso livello tensionale: la successiva tabella riporta i risultati.

Tabella 8.12. Influenza dei filler – Rapporto J_r : J_{nr} mastice vs. J_{nr} bitume

Miscele "a caldo"				Miscele "tiepide"			
τ	T	H_L100	H_S100	τ	T	W_L100	W_S100
0.1	58°C	0.23	0.05	0.1	58°C	0.24	0.03
	64°C	0.24	0.04		64°C	0.35	0.04
	70°C	0.42	0.05		70°C	0.16	0.05
	76°C	0.22	0.02		76°C	0.72	0.06
3.2	58°C	0.21	0.03	3.2	58°C	0.23	0.03
	64°C	0.08	0.02		64°C	0.32	0.02
	70°C	0.24	0.01		70°C	0.15	0.02
	76°C	0.22	0.01		76°C	0.67	0.04

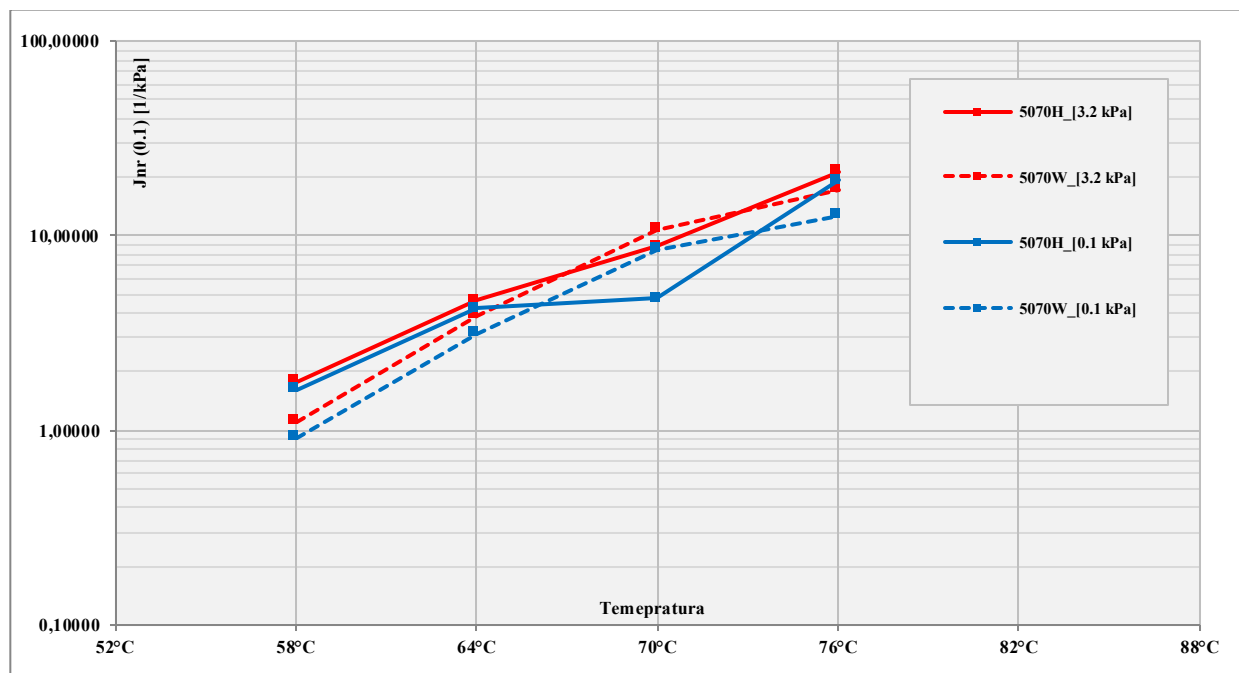
Ad eccezione di qualche valore, tutti i mastici garantiscono rapporti J_r non significativamente influenzati dalla temperatura: la suscettibilità alla temperatura, quindi, non sembra direttamente correlata alla presenza e al tipo di filler. Allo stesso modo, anche la tensione applicata non sembra

influenzare significativamente i rapporti J_r ; la suscettibilità ai livelli tensionali, quindi, non sembra direttamente influenzata dalla presenza e dalla tipologia dei filler.

Al contrario, analizzando i rapporti J_r relativi ai filler calcarei (L100) e a quelli di scoria (S100), si riscontrano notevoli variazioni, a prescindere dall'additivazione warm: non sembra possibile stabilire una correlazione con i livelli tensionali, ma risulta chiara la differenza tra i valori relativi all'inerte riciclato. Come già visto nei grafici, tutti i mastici costituiti con scoria E.A.F. forniscono rapporti minori, ossia minori valori di "compliance" non recuperabile e minori deformazioni residue. La diversa tipologia dei filler, quindi, risulta determinante per la risposta deformativa della miscela: in altre parole, i risultati, in termini di "compliance", risultano dipendenti dalla presenza di filler, ma, più marcatamente, dalla tipologia di filler impiegato: il fenomeno risulta evidente a prescindere dalla presenza di additivo warm.

Il successivo grafico propone un'ulteriore analisi sulla dipendenza del parametro di "compliance" non recuperabile dai livelli tensionali: l'esempio prende in considerazione solo i bitumi, per miscele a caldo e tiepide. Come per i mastici, non sembrano apprezzabili differenze tali da identificare una modifica del comportamento dovuta all'impiego di additivo warm: in accordo con quanto riscontrato per i mastici, le "compliance" non recuperabili relative ai bitumi sembrano presentare scarsa suscettibilità alla tensione.

Grafico 8.59. J_{nr} – Suscettibilità alla tensione $\tau = [0.10 \div 3.2] \text{ kPa}$ – Bitumi



Si pone ora l'attenzione sul fatto che il parametro di "compliance" non recuperabile J_{nr} non tiene conto della fase di creep che avviene nel primo secondo di ogni ciclo, essendo espresso solamente in funzione della deformazione residua alla fine della fase di recupero:

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{10} - \gamma_0}{\tau} \quad (8.1)$$

Per un più accurato confronto tra materiali, che tenga conto della deformazione effettivamente recuperata, si decide di considerare l'ulteriore parametro di "compliance totale", J_{TOT} , valutato sulla fase di carico che avviene all'inizio di ogni ciclo:

$$J_{TOT} = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\tau} \quad (8.2)$$

Il parametro rappresentativo di ogni materiale sarà quindi espresso dal rapporto tra la "compliance" non recuperabile e quella totale, J_{nr}/J_{TOT} , che di fatto è rappresentato dal rapporto tra la deformazione residua a fine ciclo e la deformazione accumulata durante il creep:

$$\frac{J_{nr}}{J_{TOT}} = \frac{\gamma_{10} - \gamma_0}{\gamma_1 - \gamma_0} \quad (8.3)$$

Nel caso in cui la deformazione rilevata al termine della fase di carico rimanga invariata sino a fine ciclo (il materiale non riesce a recuperare alcuna deformazione) il rapporto J_{nr}/J_{TOT} risulterà pari a 1: viceversa, qualora il materiale risulti perfettamente elastico (la deformazione a fine ciclo è uguale a quella iniziale) il rapporto sarà pari a 0.

La rappresentazione del rapporto J_{nr}/J_{TOT} consente di sviluppare alcune considerazioni: per favorire la leggibilità dei grafici, il rapporto viene espresso in percentuale. Di seguito le tabelle che riportano i valori del rapporto: i tre grafici successivi illustrano l'andamento del rapporto in funzione della sola temperatura, mantenendo invariato il livello tensionale sollecitante.

Tabella 8.13. Rapporto " J_{nr}/J_{TOT} " di tutti i campioni

Sample:	τ [kPa]	T 58 °C	T 64 °C	T 70 °C	T 76 °C
		J_{nr} / J_{TOT}	J_{nr} / J_{TOT}	J_{nr} / J_{TOT}	J_{nr} / J_{TOT}
5070H	0.1	94.6398619	97.6116348	97.7854088	97.0474383
	3.2	98.2560416	97.9940573	97.4951562	98.6933293
5070H_L100	0.1	91.6835715	95.2601218	95.9643535	97.2729000
	3.2	95.0807911	97.4420585	98.6555953	97.0140390
	10	97.7167019	95.6331774	96.3438272	98.0914369
5070H_S100	0.1	70.0838343	77.7438501	79.9005999	85.7305177
	3.2	89.3087494	93.7836021	94.9305602	96.4485181
	10	93.9885423	96.8792240	95.0585155	97.7081794
5070H_PAV	0.1	36.4380849	47.1174322	57.3016446	69.1159580
	3.2	37.1263836	48.3294757	62.2837736	80.7018561
5070H_PAV_L100	0.1	35.0811915	44.8634632	56.1544451	65.3483620
	3.2	37.5063859	49.1621661	61.6685937	74.7850751
	10	39.3786356	54.6215325	73.0318462	88.3829032
5070H_PAV_S100	0.1	19.3661608	24.1903130	46.0448370	51.6376097
	3.2	31.8440828	48.2570585	62.4496715	75.3878896
	10	34.2430560	54.8557474	70.0331171	85.1141740
5070W	0.1	80.3512558	88.9190161	94.3667834	95.7690450
	3.2	93.9426936	96.9946660	97.6901250	98.5799438
5070W_L100	0.1	76.2510784	87.6090390	85.7977700	96.2930250
	3.2	89.0949674	97.6448273	97.3857485	97.8430317
	10	95.9060351	96.0395850	96.8227919	96.3627621
5070W_S100	0.1	45.0323113	70.9997843	79.3863846	81.9891974
	3.2	62.9600458	91.3396749	95.1966042	95.1257368
	10	69.5117282	96.0351096	88.8518925	99.0449799
5070W_PAV	0.1	28.7622495	35.9324657	40.9735892	51.2001561
	3.2	29.1178096	37.0729935	48.5442515	63.3582386
5070W_PAV_L100	0.1	29.1444990	35.6275108	43.2395579	53.4577118
	3.2	30.1589663	37.9276463	48.8900420	64.1209032
	10	32.5070377	45.1422496	65.1647694	84.5999711
5070W_PAV_S100	0.1	7.7268647	17.6864133	21.6219128	28.4708548
	3.2	20.2332821	30.1827328	41.2365490	53.8759303
	10	24.5931413	36.3835012	49.8211531	66.0982730

Grafico 8.60. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – Influenza della temperatura – τ costante: 0.10 kPa – Bitumi e mastici

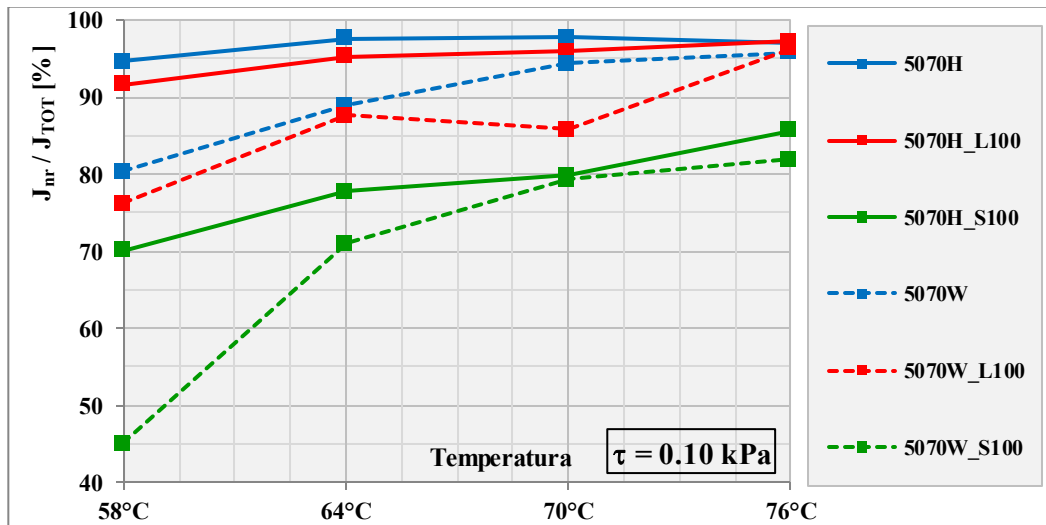


Grafico 8.61. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – Influenza della temperatura – τ costante: 3.2 kPa – Bitumi e mastici

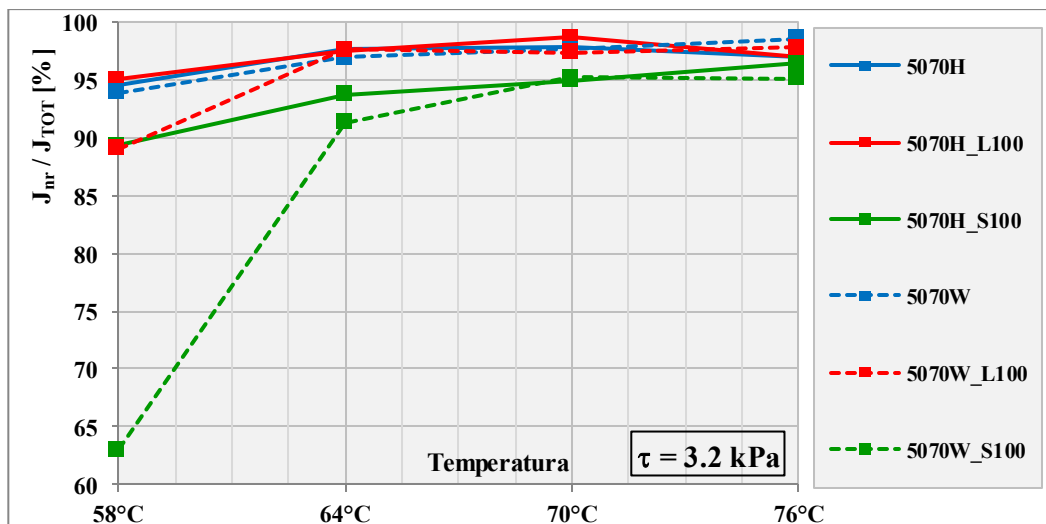
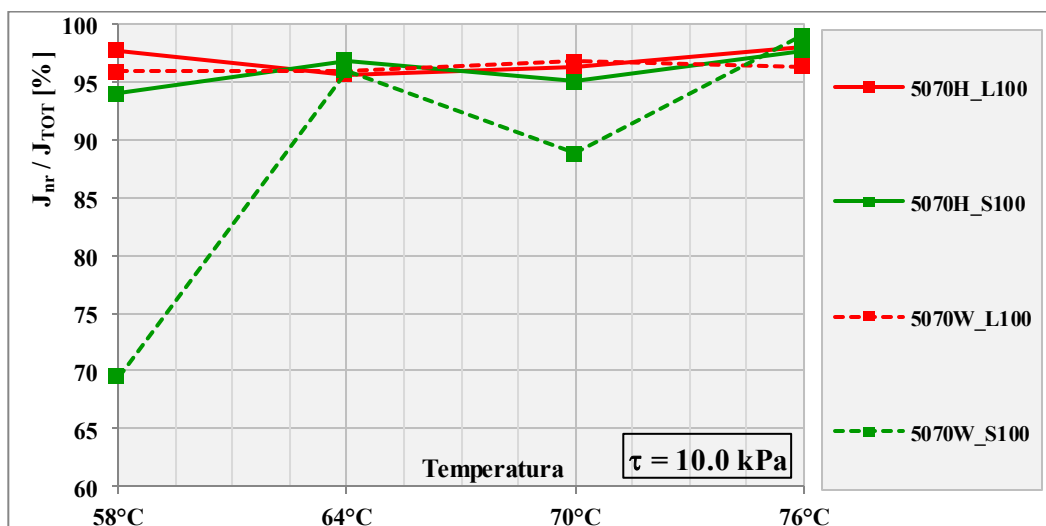


Grafico 8.62. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – Influenza della temperatura – τ costante: 10.0 kPa – Mastici



La seconda serie di grafici illustra il rapporto in funzione della tensione, a temperature costanti.

Grafico 8.63. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – *Influenza della tensione – T costante: 58 °C – Bitumi e mastici*

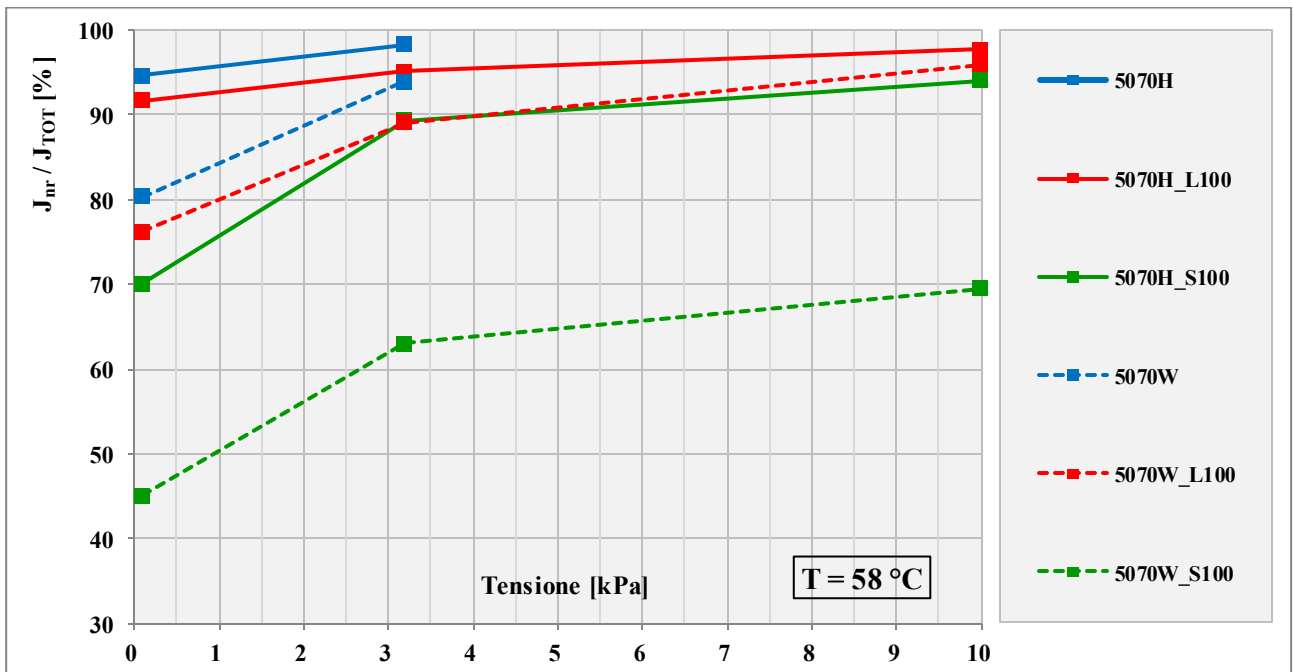


Grafico 8.64. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – *Influenza della tensione – T costante: 64 °C – Bitumi e mastici*

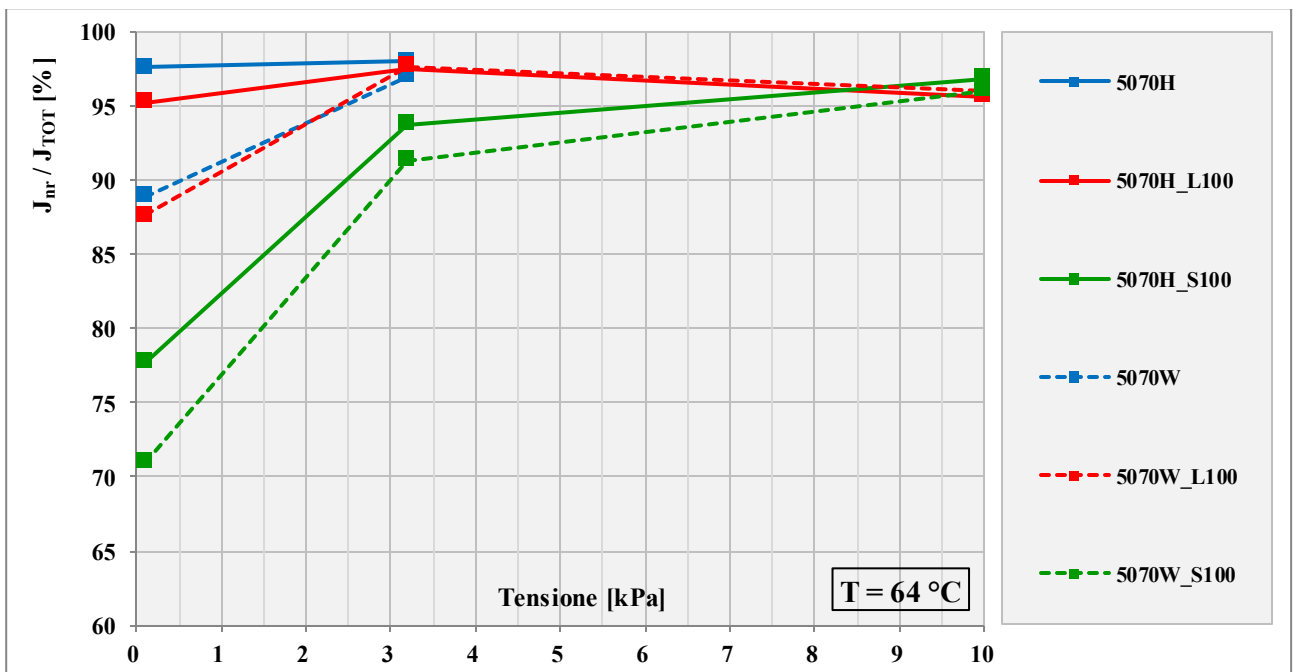


Grafico 8.65. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – Influenza della tensione – T costante: 70 °C – Bitumi e mastici

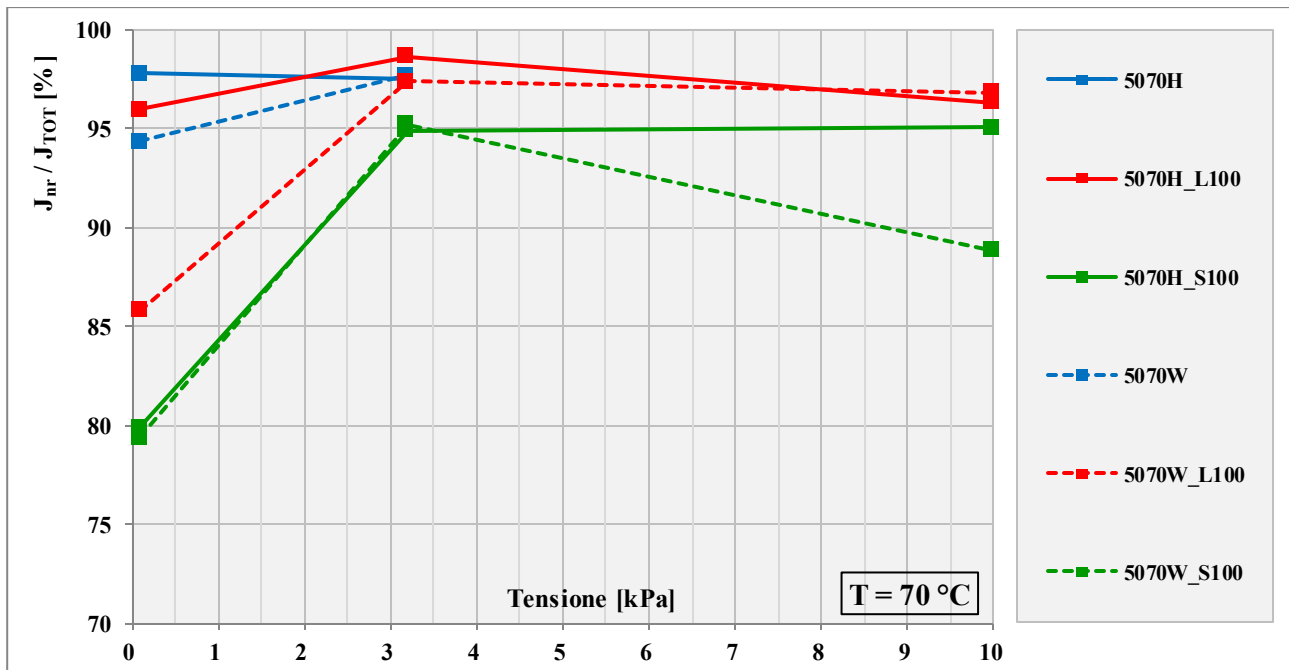
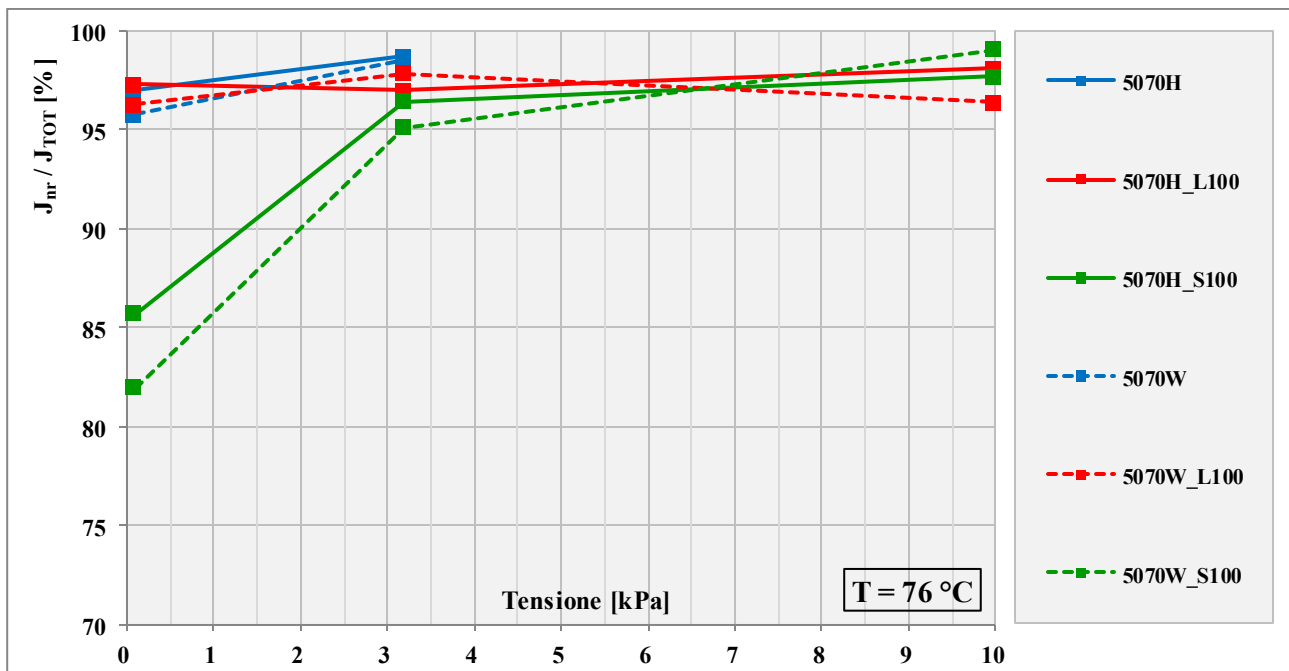


Grafico 8.66. “ J_{nr}/J_{TOT} ” – Influenza della tensione – T costante: 76 °C – Bitumi e mastici



Alcuni campioni mostrano rapporti J_{nr}/J_{TOT} molto vicini al 100%, a prescindere dalla temperatura o dal livello tensionale; è il caso dei bitumi 5070H e 5070W, e del mastice 5070H_L100 a base di filler calcareo: ciò dimostra una scarsa efficienza nel recupero di deformazione, che si traduce in una resistenza limitata alle deformazioni permanenti. I campioni a base di filler di scoria dimostrano un minore rapporto J_{nr}/J_{TOT} , con conseguente miglioramento della resistenza alle deformazioni

permanenti: in generale, la presenza dei filler, ed in particolare di quello di scoria, sembra garantire un maggiore recupero di deformazione. Tale risultato sperimentale necessita di ulteriore validazione tramite prove di laboratorio.

In secondo luogo è possibile focalizzare l'attenzione sulla variazione del rapporto J_{nr}/J_{TOT} in funzione della temperatura e dei livelli tensionali. Nei grafici a tensione costante risulta evidente la diversa pendenza del tratto iniziale: l'aumento di temperatura sembra via via inibire il recupero della deformazione post-sollecitazione; dopo la temperatura di 64 °C i recuperi risultano meno evidenti. Tale andamento risulta comunque più marcato nei mastici a base di scoria. Anche fissando la temperatura si riscontra una migliore attitudine al recupero di deformazione nel tratto iniziale: a tensioni minori i mastici, ed in particolare l'H_S100, risultano più resistenti alle deformazioni permanenti; tuttavia, l'aumento di tensione attenua sensibilmente tale beneficio. Si dimostra quindi, ancora una volta, l'effetto irrigidente dei filler, che può sicuramente garantire miglioramenti per quanto riguarda la resistenza al degrado alle alte temperature; e, ancora una volta, si dimostra l'importanza della tipologia di filler impiegato.

Confrontando le corrispondenti serie tradizionali e additivate, si può affermare che, in tutti i casi, la deformazione recuperata risulta maggiore nei campioni tiepidi; come sin qui riscontrato, l'effetto è amplificato alle tensioni più basse e a temperature al di sotto dei 64 °C. E' tuttavia interessante constatare come l'efficacia dell'additivo warm risulti amplificata in presenza di filler.

In conclusione si precisa che, le valutazioni delle risposte deformative con prova M.S.C.R. sono state effettuata solamente sui campioni non invecchiati, in quanto i più gravosi per quanto riguarda le deformazioni permanenti tipiche delle alte temperature: gli eventuali provini P.A.V., sicuramente più rigidi, se sottoposti a prova M.S.C.R., avrebbero fornito deformazioni finali molto inferiori se paragonate a quelle determinate per i campioni non invecchiati.

Conclusioni

Il presente elaborato ha esposto il protocollo sperimentale sviluppato presso il Laboratorio Stradale dell'Università degli Studi di Padova. Lo scopo è stato quello di valutare in che modo, sia l'additivo tiepido, sia il filler di scoria influenzano le prestazioni delle miscele bituminose che costituiscono: si è cercato di verificare se tali materiali, il cui utilizzo può portare svariati benefici, garantiscano prestazioni adeguate agli standard, determinandone l'eventuale possibilità di utilizzo.

Al fine di conseguire tale obiettivo, si sono analizzati i comportamenti reologici di bitumi e mastici costituiti con diversi materiali; in particolare si è proposto un confronto tra miscele destinate al confezionamento "a caldo" e miscele con aggiunta di additivo "warm" per la costituzione di conglomerati tiepidi. Si sono quindi valutate le risposte di 2 diversi mastici, uno realizzato con tradizionale filler calcareo e l'altro costituito da filler di scoria di acciaieria E.A.F: tutte le combinazioni dei materiali sono poi state valutate anche in seguito allo sviluppo della procedura P.A.V. per l'invecchiamento delle miscele.

Lo studio ha previsto la caratterizzazione iniziale di tutti i materiali impiegati nel protocollo.

I filler sono stati sottoposti alle principali prove prescritte dalle normative di riferimento: l'analisi granulometrica delle frazioni fine, come per altro i dati desunti dalla prova di porosità intergranulare, hanno evidenziato la diversa natura degli stessi. In particolare, il filler calcareo, inerte comunemente utilizzato nella realizzazione delle pavimentazioni stradali, ha dimostrato di possedere un vasto assortimento granulometrico al di sotto dei 0.063 mm, con dimensioni dei grani e distribuzioni bene equilibrate. Il filler costituito da scoria E.A.F. ha invece dimostrato assortimenti granulometrici diversi, con indice di vuoti intergranulari piuttosto alto, a testimonianza di una dimensione media dei grani poco variabile.

I bitumi e i mastici sono stati preventivamente sottoposti alle tradizionali prove empiriche prescritte dalle normative di riferimento: si sono sviluppate in particolare, prove di penetrazione e rammollimento: i dati hanno indicato, come prevedibile, l'effetto irrigidente dei filler, e dei campioni sottoposti ad invecchiamento P.A.V.. I mastici a base di scoria sono risultati più rigidi

rispetto a quelli a base calcarea: anche l'additivo warm ha provocato fenomeni di irrigidimento delle miscele.

Lo studio prestazionale, corpo principale del protocollo sperimentale, è stato sviluppato mediante l'utilizzo del reometro rotazionale a taglio (D.S.R.), ormai lo standard per la valutazione delle risposte reologiche dei leganti bituminosi destinate alla realizzazione delle sovrastrutture stradali ed aeroportuali. La sperimentazione è stata calibrata seguendo il protocollo di riferimento Superpave.

In particolare si è scelto di sviluppare uno studio parallelo in due ambiti. Da una parte si sono effettuate prove per la determinazione delle rigidità delle miscele, espresse dai tradizionali parametri reologici, quali i moduli complessi, elastici e viscosi, gli angoli di fase, e le viscosità: le valutazioni sono state sviluppate in un vasto range di temperature al fine di comprendere i meccanismi di funzionamento dei materiali "innovativi" utilizzati. Dall'altra, si sono effettuate prove per la determinazione delle risposte deformative, al fine di valutare le prestazioni delle miscele in un range di temperature più alto, che identifica le situazioni di degrado da deformazioni permanenti.

Il primo ambito ha visto la realizzazione di prove "amplitude sweep", con forzante oscillatoria a deformazione variabile e frequenza costante, per l'identificazione del limite elastico lineare dei campioni: successivamente si sono condotti dei test "frequency sweep", con forzante oscillatoria a deformazione costante e frequenza variabile, al fine di costruire le curve maestre dei diversi materiali. L'elaborazione dati ha evidenziato che il limite elastico lineare subisce drastiche riduzioni in presenza di additivo: per i mastici, ed in particolare per quello a base di filler di scoria, il limite elastico lineare risulta molto basso. Le risposte in termini di rigidità delle miscele hanno evidenziato in generale incrementi garantiti dall'additivo tiepido: in particolare, gli aumenti sono risultati sensibilmente maggiori in presenza di filler. Il fatto può essere spiegato dalla natura dello stesso additivo e dal meccanismo con cui interagisce con il legante: si interfaccia a livello microscopico con i singoli grani di inerte modificandone le proprietà di adesione, per cui è giustificabile la maggiore risposta riscontrata nei mastici. Indagando l'influenza della tipologia di inerte si è verificato che il tipo di filler impiegato determina comportamenti differenti. In particolare, in presenza di filler calcareo tradizionale l'efficienza dell'additivo si è manifestata per basse frequenze, corrispondenti alle temperature più alte.

In presenza di filler di scoria, invece, si è riscontrato un trend opposto, con evidenti incrementi di modulo alle alte frequenze e basse temperature, via via meno importanti con l'aumento delle

temperature. Il fatto può essere spiegato considerando i meccanismi di funzionamento dell'additivo precedentemente descritti; il diverso assortimento granulometrico del filler di scoria, unitamente a un peso specifico maggiore e a una diversa natura mineralogica, possono essere i fattori che determinano le diverse modalità di funzionamento dell'additivo. Gli stessi andamenti si sono identificati per i campioni soggetti ad invecchiamento P.A.V., anche se l'additivo è sembrato risultare meno efficace, probabilmente per la maggiore rigidità dei mastici.

Il secondo ambito ha visto lo sviluppo di prove M.S.C.R., ovvero forzanti a tensione costante con sollecitazioni cicliche, costituite da momenti di carico e scarico intervallati, al fine di determinare le percentuali di deformazione recuperabile e non recuperabile dei materiali presi in esame. Le prove si sono limitate ai campioni non invecchiati, quelli maggiormente soggetti all'accumulo di deformazioni permanenti tipiche dalle alte temperature. L'elaborazione dati ha evidenziato che le deformazioni residue a fine prova risultano maggiori a temperature più alte, fattore attribuibile al ben noto innalzamento della viscosità del legante con la temperatura: tuttavia si è ottenuto lo stesso trend per tutti i campioni, testimoniando la scarsa suscettibilità della deformazione permanente alle temperature. Sia la presenza di additivo, sia la presenza di filler sembrano avere fornito minori deformazioni residue. Risposte più esaurienti sono comunque scaturite dall'analisi combinata della deformazione residua a fine prova e di quella massima registrata a fine sollecitazione: i bitumi e i mastici a base di calcare hanno dimostrato scarsa efficienza nel recupero deformativo. I campioni a base di filler di scoria hanno garantito invece un minore rapporto tra deformazione a fine carico e deformazione residua, con conseguente miglioramento della resistenza alle deformazioni permanenti: in generale, la presenza dei filler, ed in particolare di quello di scoria, sembra garantire una maggiore attitudine al recupero di deformazione post-sollecitazione. Gli identici fenomeni sono risultati amplificati in presenza di additivo tiepido. Tuttavia, l'efficacia di additivo e filler, (in particolar modo di scoria), viene via via mitigata con il progredire delle sollecitazioni e delle temperature.

In conclusione, nell'ottica di valutazione del possibile utilizzo dei materiali "innovativi" oggetto di analisi si può affermare che:

- in generale, la presenza di filler di scoria e di additivo warm in nessun caso ha determinato peggioramenti prestazionali rispetto alle corrispondenti miscele "tradizionali";
- in particolare ha garantito miglioramenti delle prestazioni sia per quanto riguarda le rigidità indicate dal modulo complesso (in un ampio intervallo di temperature), sia per quanto concerne la resistenza alle deformazioni permanenti (tipiche delle temperature più alte);
- la sperimentazione ha comunque evidenziato alcuni limiti sugli scenari ottimali per la completa efficienza dei suddetti materiali: tuttavia non si esclude la possibilità di eventuali sperimentazioni future che diano luogo ad ulteriori approfondimenti.

Bibliografia

- Amarnath et al, (2013). Determining The Rheological Properties Of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer (DSR) For Selected Pavement Stretches, *I.J.R.E.T. (International Journal Of Research In Engineering And Technology)*
- A.N.A.S. (2008). Gestione delle Pavimentazioni Stradali: Linee Guida di Progetto e Norme Tecniche Prestazionali, *Centro Sperimentale Stradale – Ricerca & Innovazione*, A.N.A.S..
- A.N.A.S. (2014) . *Capitolato Speciale d'Appalto*, A.N.A.S..
- Anderson, D. A., G. M. Rowe, D. Christensen (2008). Historical and Current Rheological Binder Characterization vs. Binder Performance, Petersen Conference - July 2008, U.S.A.
- Autelitano e Giuliani, (2015). Swelling Behavior Of Electric Arc Furnace Aggregates For Unbound Granular Mixtures In Road Construction, *I.J.P.R.T. (International Journal of Pavement Research and Technology)*, nel Volume 8 – N° 2.
- Autostrade S.p.a. (2014) . *Capitolato Speciale d'Appalto*, Autostrade S.p.a..
- Baldo, Nicola (2013). Rigidezza delle Miscele Bituminose, Corso di Progettazione di Infrastrutture Viarie, *Ricercatore*, Dipartimento D.I.C.E.A., Università degli Studi di Padova.
- Brosseaud, Y. M. et al. (2008). Warm Asphalt Mixes: Overview of This New Technology in France, *Paper 0309 - Transport Research Arena Europe 2008*, Ljubljana, Slovenia.
- Button, J. W. (2007). A Synthesis of Warm-Mix Asphalt, *Project Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration*, Texas Transportation Institute, Texas, U.S.A..
- Cardone et al, (2013). Influence Of Polymer Modification On The Rheological Response Of Bitumens And Mastics, *Dipartimento di Ingegneria Civile e delle Costruzioni*, Università

Politecnica delle Marche, Italia.

Clopotel e Bahia, (2012). Importance of Elastic Recovery in the DSR for Binders and Mastics, *E.J. (Engineer Journal) n° 4, Vol. 16*, Department of Civil and Environmental Engineering - University of Wisconsin Madison, U.S.A..

D'Angelo, J.A. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice, *International Technology Scanning Program FHWA-PL-08-00*, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., U.S.A..

E.A.P.A. – Position Paper (2014). The Use of Warm Mix Asphalt, *European Asphalt Pavement Association*, Brussels, Belgium.

Federacciai (2011). La Valorizzazione degli Aggregati di Origine Siderurgica - La Scoria Siderurgica: da Problema a Risorsa, *Associazione Italiana Federacciai*.

Frigio et al, (2014). Fatigue Rheological Characterization Of Polymer-Modified Bitumens And Mastics, *Dipartimento di Ingegneria Civile e delle Costruzioni*, Università Politecnica delle Marche, Italia.

Gelfi, M. et al (2011), Caratterizzazione di Scorie da Acciaieria e Studio del Rilascio di Cromo, *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale*, Università degli Studi di Brescia.

Grizzuti, Nino (2013). *Reologia dei Materiali Polimerici: Scienza ed Ingegneria*, Edizione Nuova Cultura, Associazione Italiana di Scienza e Tecnologia delle Macromolecole.

Jenkins et al, (1999). Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, A New Process, *7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa*, Sud Africa.

Johnson e Bahia, (2010). Evaluation Of Accelerated Procedure For Fatigue Characterization Of Asphalt Binders, *Dipartimento di Ingegneria Civile* - University of Wisconsin, U.S.A..

Kennedy, T. W. et al (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave). The Product of the S.H.R.P. Asphalt Research Program, *National Research Council*, Washington, D.C., U.S.A.

- Kim et al, (2010). Effects Of Warm Mix Asphalt Additives On Performance Properties Of Polymer Modified Asphalt Binders, *Canadian Journal of Civil Engineer*, Clemson University, Indiana, U.S.A..
- Khodary, (2015). Comparative Study Of Using Steel Slug Aggregate And Crushed Limestone In Asphalt Concrete Mixtures, *I.J.C.I.E.T. (International Journal of Civil Engineer and Thechnology)*, Vol. 6 - Marzo 2015, Dipartimento di Ingegneria Civile South Valley University di Qena, Egitto.
- Koenders et al, (2000). Innovative Process In Asphalt Production And Application To Obtain Lower Operating Temperatures, *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcellona, Spagna.
- Kristjansdottir, Olof (2006)., Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving, *Thesis for Master Degree of Science in Civil Engineering*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, U.S.A..
- Maccarrone S., (1995). Cold Asphalt Systems As An Alternative to Hot Mix, *9th A.A.P.A International Asphalt Conference*, Australia.
- Manuali Utente Anton Paar, (2013). The Modular Compact Rheometer Series - M.C.R. 302 User Manuals, www.anton-paar.com, Anton Paar® GmbH, Austria, Europe.
- Mazzotta, Francesco (2012). Studio Reologico Avanzato di Bitumi Modificati ed Additivati: Proposta di una Nuova Procedura di Aging, *Tesi Magistrale in Ingegneria Civile*, Università di Bologna.
- Merusi, Filippo (2009). Metodi Reologici Avanzati per l'Analisi del Comportamento dei Bitumi Stradali negli Stati Critici di Esercizio, *Tesi di Dottorato in Ingegneria Civile*, Università degli Studi di Parma.
- N.C.H.R.P. Report, (2010). Test Methods And Specification Criteria For Mineral Filler Used In H.M.A., Università del Winsconsin, U.S.A..

- Olsson, A. et al (2009). A Case-Control Study of Lung Cancer Nested in a Cohort of European Asphalt Workers, *I.A.R.C. – International Agency for Research on Cancer*.
- Porisiensi, S. et al (2005). Scorie di Acciaieria: un Nuovo Aggregato ad Elevate Caratteristiche per Conglomerati Bituminosi Speciali, *C.R.S. Centro Ricerche Stradali Spa*, Dipartimento Ricerca Sviluppo ed Ambiente, Ferriere Nord Spa.
- Rashwan, M. H. (2012). Characterization of Warm Mix Asphalt (WMA) Performance in Different Asphalt Applications, *Graduation Thesis*, Iowa State University, U.S.A..
- Saboori, A. et al (2012). Warm Mix Asphalt Processes Applicable to North Dakota, *NDDOT Project Number: NDSU 11-01 SPR-R033 (003)*, North Dakota State University, U.S.A..
- Sofilic et al., (2004). Characterization Of The Eaf Steel Slag As Aggregate For Use In Road Construction, *A.I.D.I.C. (Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica)*, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Ljubljana, Slovenia.
- Vuong, B. et al (2012). Review of Overseas Trials of Warm Mix Asphalt Pavements and Current Usage by Austroads Members, *AUSTROADS TECHNICAL REPORT - AP-T215-12*, Australia.
- Xiao et al, (2013). Rheological And Chemical Characteristics Of Warm Mix Asphalt Binders At Intermediate And Low Performance Temperatures, *Canadian Journal Of Civil Engineer*, Tongji University, Shanghai, Cina.
- Xiaoge et al, (2004). Effect Of Aging On Viscoelastic Performance Of Asphalt Binder, *Changsha University of Science and Technology*, Cina.

Normativa

- A.A.S.H.T.O. Designation MP 19-10, (2010), Standard Specification: Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR).
- A.A.S.H.T.O. Designation TP 70-10, (2010), Standard Specification: Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).
- A.A.S.H.T.O. Designation T 315-10, (2010), Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).
- A.A.S.H.T.O. Designation M 320-10, (2010), Standard Specification: Performance-Graded Asphalt Binder.
- A.S.T.M. Designation D-422, (2007), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- A.S.T.M. Designation D-7405-10a (2011), Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.
- CNR n. 24, 20/12/1971, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Penetrazione.
- CNR n. 35, 22/11/1973, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Punto di Rammollimento: Metodo Palla-Anello.
- CNR n. 43, 06/06/1974, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Punto di Rottura: Metodo Fraas.
- CNR n. 44, 29/10/1974, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Duttilità.
- CNR n. 48, 24/02/1975, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Solubilità in Solventi Organici.
- CNR n. 50, 17/03/1976, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Perdita per Riscaldamento: Volatilità.
- CNR n. 66, 20/05/1978, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Contenuto in Paraffina.
- CNR n. 68, 23/05/1978, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali

- CNR n. 72, 22/12/1979, Norme per l'Accettazione dei Bitumi per Usi Stradali – Punto di Infiammabilità: Metodo Cleveland.
- D.lgs 152/2006, G.U. n. 88, 14/04/2006, Norme in Materia di Ambiente.
- D.m. 5/1997, G.U. n. 88, 16/04/1997, Individuazione dei Rifiuti non Pericolosi Sottoposti alle Procedure Semplificate di Recupero.
- Direttiva CE 2008/98, 19/11/2008, Direttiva Quadro sui Rifiuti.
- UNI CEN TS 15324 EEN, (2008), Bitumi e Leganti Bituminosi: Temperatura di Equiviscosità Basata sulla Low Shear Viscosity (Viscosità a Basso Gradiente di Taglio) Mediante un Reometro Dinamico a Bassa Frequenza di Oscillazione.
- UNI EN 993-1, (1998), Metodi di Prova per Prodotti Refrattari Formati Densi – Determinazione della Massa Volumica Apparente, della Porosità Apparente e della Porosità Totale.
- UNI EN 933-3, (2012), Prove per Determinare le Caratteristiche Geometriche degli Aggregati – Determinazione della Forma dei Granuli – Indice di Appiattimento.
- UNI EN 933-4, (2012), Prove per Determinare le Caratteristiche Geometriche degli Aggregati – Indice di Forma.
- UNI EN 933-5, (2012), Prove per Determinare le Caratteristiche Geometriche degli Aggregati – Determinazione della Percentuale di Superfici Frantumate negli Aggregati Grossi.
- UNI EN 933-9, (1997), Methods of Test for Dense Shaped Refractory Products. Determination of Creep in Compression.
- UNI EN 1367-1, (2007), Prove per Determinare le Proprietà Termiche e la Degradabilità degli Aggregati – Determinazione della Resistenza al Gelo e Disgelo.
- UNI EN 1097-1, (2011), Prove per Determinare le Proprietà Meccaniche e Fisiche degli Aggregati – Determinazione della Resistenza all'Usura (Micro-Deval).
- UNI EN 1097-2, (2010), Prove per Determinare le Proprietà Meccaniche e Fisiche degli Aggregati – Metodi per la Determinazione della Resistenza alla Frammentazione.
- UNI EN 1097-6, (2013), Prove per Determinare le Proprietà Meccaniche e Fisiche degli Aggregati – Determinazione della Massa Volumica dei Granuli e dell'Assorbimento d'Acqua.
- UNI EN 1097-8, (2009), Prove per Determinare le Proprietà Meccaniche e Fisiche degli Aggregati

– Determinazione del Valore di Levigabilità.

UNI EN 1426 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione della Penetrazione con Ago.

UNI EN 1427 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione del Punto di Rammollimento con Metodo Biglia e Anello.

UNI EN 12593 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione del Punto di Rottura Secondo il Metodo Fraass.

UNI EN 12607-1 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione della Resistenza all'Indurimento per Effetto del Calore e dell'Aria - Parte 1: Metodo R.T.F.O.T..

UNI EN 12607-2 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione della Resistenza all'Indurimento per Effetto del Calore e dell'Aria - Parte 2: Metodo T.F.O.T..

UNI EN 12607-3 EEN, (2007), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione della Resistenza all'Indurimento per Effetto del Calore e dell'Aria - Parte 3: Metodo R.F.T..

UNI EN 12697-34, (2012), Miscele Bituminose – Metodi di Prova per Conglomerati Bituminosi a Caldo – Parte 34: Prova Marshall.

UNI EN 13043, (2013), Aggregati per Miscele Bituminose e Trattamenti Superficiali per Strade, Aeroporti e Altre Aree Soggette a Traffico.

UNI EN 13108-1, (2004), Prove non Distruttive: Esame Visivo – Principi Generali.

UNI EN 13108-2, (2006), Miscele Bituminose – Specifiche del Materiale: Conglomerato Bituminoso per Strati Molto Sottili.

UNI EN 13108-3, (2006), Miscele Bituminose – Specifiche del Materiale: Conglomerato Con Bitume Molto Tenero.

UNI EN 13108-4, (2006), Miscele Bituminose – Specifiche del Materiale: Conglomerato Bituminoso Chiodato.

UNI EN 13108-5, (2006), Miscele Bituminose – Specifiche del Materiale: Conglomerato Bituminoso Antisdrucchiolo Chiuso.

UNI EN 13108-6, (2006), Miscele Bituminose – Specifiche del Materiale: Asfalto Colato.

UNI EN 13589 EEN, (2008), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione delle Caratteristiche a Trazione dei Bitumi Modificati Utilizzando il Metodo della Trazione tramite Duttillometro.

UNIEN 14770 EEN, (2012), Bitumi e Leganti Bituminosi: Determinazione del Modulo Complesso di Elasticità e dell'Angolo di Fase - Reometro Dinamico di Elasticità/Scorrimento (DSR).

