



Inês Antunes

Asphalt Rubber
Studio della Reologia del Bitume
Modificato con Polverino di Gomma
di Pneumatico Riciclata

Gennaio 2006

Tutore: Prof. Ing. Antonio Montepara
Co-Tutore: Prof. Ing. Felice Giuliani
Coordinatore del Dottorato: Prof. Ing. Paolo Mignosa

Università degli Studi di Parma
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile – XVIII Ciclo

Sommario

*La tesi di dottorato riguarda l'indagine sperimentale svolta ai fini della caratterizzazione reologica dei leganti ottenuti tramite modifica con polverino di gomma di pneumatici riciclati (CRM) secondo la cosiddetta metodologia "wet", detti **Asphalt Rubber**.*

L'opportunità di questo studio nasce dalle sempre più pressanti esigenze legate all'ottenimento di alte prestazioni nel campo delle costruzioni stradali, le quali spingono la ricerca sui bitumi verso il superamento dell'approccio tradizionale, a favore di una caratterizzazione più specificatamente prestazionale, in sintonia con quanto sta avvenendo negli Stati Uniti. In particolare, l'interesse a sviluppare la ricerca scientifica nel campo della valutazione prestazionale dei bitumi stradali è finalizzato alla valorizzazione dell'utilizzo dei bitumi modificati rispetto ai bitumi tradizionali ed alla qualifica degli stessi bitumi in accordo con metodologie di classificazione americane definite in ambito SHRP (Strategic Highway Research Program). A tutto ciò si aggiungono le ottime caratteristiche prestazionali dimostrate dai conglomerati e leganti Asphalt Rubber, nonché gli interessi di tipo ambientale legati alla possibilità di riciclare notevoli quantità di gomma di pneumatici fuori uso.

L'importanza ed il carattere di originalità della presente tesi colmano la lacuna costituita dal fatto che sinora, nonostante siano stati effettuati innumerevoli studi riguardo alle prestazioni dell'Asphalt Rubber, utilizzato sia per la produzione di conglomerati CRM che di altri materiali quali SAMI, SAM o Chip Seals, non sia ancora stato effettuato uno studio approfondito sulla propria reologia del bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata.

È stato, quindi, dapprima definito un quadro di riferimento analizzando i leganti modificati in genere, mediante un'analisi sperimentale su bitumi modificati con vari tipi di polimeri. Su tale base è stato successivamente effettuato un dettagliato studio sperimentale comparativo dei bitumi Asphalt Rubber. Per completare l'analisi dei leganti modificati con polverino di gomma, sono stati studiati terminal blend ottenuti mediante il cosiddetto metodo texano, analizzandoli parallelamente a leganti modificati con polimeri e comparandoli con quanto risultante dall'analisi dell'Asphalt Rubber.

Tale studio ha consentito di inquadrare, relativamente alle caratteristiche prestazionali di altri prodotti presenti sul mercato, i leganti modificati con polverino di gomma di pneumatici riciclati, concentrandosi principalmente su quelli ottenuti mediante metodo wet, per i quali vengono specificate in maniera sistematica e rigorosa le proprietà tecniche e prestazionali, gli utilizzi più appropriati e i limiti applicativi.

A completamento del lavoro, si include una voce di capitolato tecnico in grado di costituire una guida alla formulazione, produzione in diversi tipi di impianto e controllo di qualità dei leganti Asphalt Rubber.

Abstract

*The present PHD Thesis presents the research developed in the last three years to the ends of the rheological characterization of **Asphalt Rubber** binders, produced using the wet process.*

This study came about as a result of the ever-growing demand for high performances in the field of road constructions, which lead investigation into asphalt study, surpassing the current traditional empiricist approach in favor of a more specific characterization, much like it has been happening in the USA.

Particularly, the interest in developing this scientific investigation is aimed at driving the worth of industrial utilization of asphalt binders over traditional asphalts, and systemizing its classification, based on the American normative SHRP (Strategic Highway Research Program).

Adding to all this, there is also an environmental concern linked to the possibilities of recycling a significant amount of used tires given by the Hot Modified Rubber Asphalt Mixes.

The importance and originality of this Thesis culminates with the fact that although there are already many performance studies in Hot Modified Rubber Asphalt Mixes and spread applications like SAM, SAMI and Chip Seals, there wasn't done till now a deeper study of the of the rheology of Asphalt Rubber binders.

Therefore, initially a reference table was defined analyzing the rheological behaviour of general modified binder. Based on these results, a detailed study on the characteristics of the Asphalt Rubber was done afterwards.

Completing the experimental analysis, Terminal Blend type formulations were also studied and analyzed in parallel with other polymers modified binders.

This study also includes a comparative analysis between polymers and chemical modified binders with Asphalt Rubber.

Such study, allowed to integrate, in the present European market, the Crumb Rubber Modified Binders, through its performance features, focusing mostly in those modified through the wet method, and for which are specified its possible uses and application limitations.

To complete the work, an example of a notebook of technical incumbencies is included, to serve as a guide to formulation, production (in several types of systems) and quality assertion of Asphalt Rubber binders.

Resumo

*A presente dissertação apresenta o trabalho de investigação desenvolvido ao longo de 3 anos de doutoramento com o objectivo de caracterizar reologicamente os betumes modificados com borracha de pneus reciclada (CRM) através do método “wet”, chamados **Asphalt Rubber**.*

Este estudo nasce da exigência, sempre maior, ligada à obtenção de altas prestações no campo da construção rodoviária, as quais direccionam a investigação para o estudo dos betumes, superando a actual abordagem tradicional (empírica) a favor de uma caracterização mais específica, em sintonia com a evolução que tem vindo a acontecer nos Estados Unidos.

Em particular, o interesse em desenvolver a investigação científica é dirigido à valorização da utilização industrial dos betumes modificados relativamente aos tradicionais e a sistematizar a sua classificação, tendo por base as normas americanas definidas no âmbito SHRP (Strategic Highway Research Program).

A tudo isto se adiciona o interesse ambiental, ligado à possibilidade dada pelas misturas betuminosas realizadas com betume de borracha, de reciclar uma quantidade muito significativa de pneus usados.

A importância e a originalidade da presente tese culmina, eliminando a lacuna que constituía o facto de que até agora, apesar de terem sido executados numerosos estudos relativamente à performance da Asphalt Rubber utilizada em misturas betuminosas ou em aplicações do tipo SAM, SAMI ou Chip Seals, não ter sido ainda efectuado um estudo aprofundado da própria reologia do betume modificado com borracha.

Assim, em primeiro lugar foi definido um quadro de referência analisando o comportamento reológico dos betumes modificados em geral. Tendo por base estes resultados foi depois executado um estudo pormenorizado das características do ligante Asphalt Rubber.

Para completar a análise experimental, foram também estudadas formulações do tipo Terminal Blend e analisadas paralelamente com outros betumes modificados com polímeros.

O estudo inclui ainda uma análise comparativa entre os betumes modificados com polímeros, quimicamente e Asphalt Rubber.

Tal estudo permitiu integrar, no presente mercado europeu, os betumes modificados com borracha, relativamente às suas características prestacionais, concentrando-se sobretudo naqueles modificados através do método wet, para os quais são especificados as possíveis utilizações e limites de aplicação.

Para completar o trabalho inclui-se um exemplo de voz de caderno de encargos técnico capaz de constituir um guia à formulação, produção (em diversos tipos de sistemas) e controlo de qualidade dos betumes Asphalt Rubber.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1	
Generalità sul bitume modificato	5
1.1 Proprietà chimiche e reologiche del bitume	6
1.2 I bitumi modificati	12
1.2.1 Modifica con polimeri	15
1.2.2 Modifica con acido polifosforico	29
1.2.3 Modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata	29
Capitolo 2	
Il polverino di gomma di pneumatico riciclata	33
2.1 Origini e ricadute ambientali	34
2.2 Il <i>Tire Program Management</i> Statunitense	37
2.2.1 Arizona	38
2.2.2 California	40
2.2.3 Florida	40
2.3 Processo di fabbricazione del Polverino	41
2.3.1 Processo criogenico	44
2.3.2 Processo Ambientale	44
2.4 Impiego nelle infrastrutture stradali	47
2.4.1 Processo wet	49
2.4.2 Processo dry	50
2.4.3 Processo di miscelazione in raffineria - <i>Refinery Blend Process</i>	52
2.5 Stato dell'arte delle applicazioni di CRM	54
2.5.1 Processo Wet	55
2.5.2 Processo Dry	71
2.5.3 Processi a confronto	75
2.6 Studi eseguiti in Italia	78
2.6.1 Metodo Dry	78
2.6.2 Metodo Wet	84
2.7 Alternative di utilizzo della gomma di pneumatico riciclata	87
Capitolo 3	
Asphalt Rubber - Il bitume modificato con il polverino di gomma di pneumatico riciclata	89
3.1 Generalità dell'Asphalt Rubber	89
3.2 Cenni Storici	93
3.2.1 Il Metodo Mac Donald	93
3.2.2 Evoluzione delle politiche di utilizzo	96
3.2.3 L'Asphalt Rubber oggi	100
3.3 Attributi delle Pavimentazioni in Asphalt Rubber	105
3.3.1 Principali aspetti caratterizzanti la superficie di una pavimentazione	105
3.3.2 Performance	109
3.3.3 Manutenzione	120

3.3.4	Proprietà funzionali e sicurezza	125
3.3.5	Fonoassorbenza	130
3.3.6	Efficienza Economica	146
3.3.7	Riciclabilità	153
3.3.8	Versatilità e Minori Tempi di Costruzione	155
3.4	Aspetti della Progettazione di Conglomerati Asphalt Rubber	156
3.4.1	Pavimentazioni Nuove	156
3.4.2	Manutenzione e Riabilitazione di pavimentazioni esistenti	157
3.4.3	Altri Aspetti Progettuali	168
3.4.4	Specifiche e capitolati per la formulazione di HMRA	169
3.5	Formulazione e posa in opera	171
3.5.1	Legante Asphalt Rubber	171
3.5.2	Conglomerati HMRA	183
3.5.3	<i>Chip seals</i>	190
3.6	Controllo della Qualità	193
3.7	Qualità dell'aria	201
3.8	Sviluppi Futuri	204

Capitolo 4

Caratterizzazione reologica dei leganti bituminosi **209**

4.1	Viscoelasticità	211
4.1.1	Corpo elastico	214
4.1.2	Fluido viscoso	215
4.1.3	Modelli di comportamento viscoelastico	216
4.2	Reometria	219
4.2.1	Storia della forzante	219
4.2.2	Configurazioni di prova	223
4.3	Analisi dinamica e principio di equivalenza tempo-temperatura	236
4.3.1	Rappresentazione della curva maestra e dei fattori di traslazione	237
4.3.2	Conversione di funzioni viscoelastiche	239
4.3.3	Il modello viscoelastico lineare PSU	241
4.3.4	Modello matematico della curva maestra	243
4.4	Proprietà di viscoelasticità non lineare	246
4.4.1	Linearità e non linearità	248
4.4.2	Distribuzione della deformazione	249
4.4.3	Caratterizzazione del comportamento non lineare	250
4.4.4	Comportamento dei bitumi nella regione di viscoelasticità non lineare	251

Capitolo 5

Quadro normativo e metodologia SHRP **255**

5.1	La metodologia SHRP	256
5.1.1	Il sistema di classificazione SUPERPAVE®	256
5.1.2	Il Performance Grade	257
5.1.3	Invecchiamento dei bitumi	260
5.1.4	Prove Reologiche	266
5.1.5	Applicazione Pratica della Classificazione SHRP	282
5.1.6	Criticità della metodologia SHRP	283
5.1.7	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>	284
5.2	Recente evoluzione della normativa europea	299

Capitolo 6	
Ricerca Sperimentale	303
6.1 Finalità ed Organizzazione della Ricerca	304
6.2 Materiali di Prova	308
6.2.1 Modifica di Bitumi in Laboratorio	312
6.3 Prove Convenzionali	319
6.3.1 Effetto della Modifica con CRM	322
6.3.2 Confronto fra modifica con CRM e con Polimeri	342
6.3.3 Terminal Blend	360
6.3.4 Curve di Viscosità	389
6.4 Prove reologiche con DSR	398
6.4.1 Analisi Dinamica	398
6.4.2 Analisi Statica	423
6.4.3 Zero Shear Viscosity	425
6.5 Prove reologiche con BBR	431
6.6 Inquadramento dei Bitumi Asphalt Rubber nel mercato italiano	433
6.6.1 Fusi di Accettazione	435
6.6.2 Master Curve	440
6.7 Considerazioni sui risultati ottenuti	444
Conclusioni	447
Bibliografia	449
Glossario	459
Appendici	
Appendice 1 - Risultati complementari	A1
Appendice 1.1 – Curve di viscosità	A3
Appendice 1.2 – Temperature limite superiore	A17
Appendice 1.3 – Limite lineare	A39
Appendice 1.4 – Dipendenza dalla deformazione	A51
Appendice 1.5 – Prove di Creep	A63
Appendice 1.6 – Zero Shear Viscosità	A73
Appendice 1.7 – Risultati BBR	A79
Appendice 1.8 – Fusi di accettazione	A99
Appendice 2 - Applicazione pratica della caratterizzazione PG	A111
Appendice 2.1 – Mappa territoriale di PG per il territorio Portoghese	A113
Appendice 2.2 – Determinazione del PG di un bitume	A125
Appendice 2.3 – Tabella SHRP	A133
Appendice 3 – Analisi economica	A137
Appendice 4 – Condizioni tecniche speciali per AR	A153

Indice delle Tabelle

Tabella 1-1:	Nomenclatura di polimeri Plastomeri ed Elastomeri	18
Tabella 1-2:	Miglioramenti ottenibili mediante la modifica con polverino di gomma di pneumatico riciclata	31
Tabella 2-1:	Confronto tra le differenti tecniche di smaltimento di PFU espresse in termini di bilancio di costi energetici	36
Tabella 2-2:	Bilancio energetico nel caso di produzione di polverino per asphalt rubber	36
Tabella 2-3:	Destinazione dei PFU generati in Arizona nel 1998	39
Tabella 2-4:	Destinazione dei PFU generati in California nel 1998	40
Tabella 2-5:	Destinazione dei PFU generati in Florida nel 1998	41
Tabella 2-6:	Confronto tra conglomerato convenzionale e ottenuto mediante Terminal Blend Process	53
Tabella 2-7:	Stabilità allo stoccaggio determinata mediante Tuben Test	63
Tabella 2-8:	Stabilità allo stoccaggio determinata mediante variante al metodo Tuben Test	63
Tabella 2-9:	Applicazioni di conglomerati AR in Portogallo lungo l'autostrada A8	66
Tabella 2-10:	Confronto tra le percentuali di utilizzo di PFU di automobili in Polonia	69
Tabella 3-1:	Quadro dell'evoluzione delle prove con HVS sulle tre pavimentazioni testate	113
Tabella 3-2:	Evoluzione della skid resistance prima e dopo oltre 10 anni dalla riabilitazione con AR	126
Tabella 3-3:	Valori di incidentalità prima e dopo la riabilitazione con AR	130
Tabella 3-4:	Riduzione della pressione sonora e del rispettivo volume percepito dall'udito corrispondenti a diminuzioni della rumorosità espresse in decibel.	131
Tabella 3-5:	Studi degli effetti fonoassorbenti dell'AR eseguiti in vari stati negli anni '80 e '90	139
Tabella 3-6:	Confronto tra emissioni sonore prima e dopo la riabilitazione nel 2002	140
Tabella 3-7:	Valori di rumorosità rilevati all'interno dell'abitacolo prima e dopo la riabilitazione	141
Tabella 3-8:	Confronto tra il costo di fornitura e posa in opera di diversi conglomerati (riferito al mercato dell'Arizona)	146
Tabella 3-9:	Equivalenze Strutturali per la Riabilitazione	166
Tabella 3-10:	Equivalenze per il Ritardo della Riflessione della Fessurazione	167
Tabella 3-11:	Tipiche gradazioni di polverino per AR Tipo 1 e 2	172
Tabella 3-12:	Proprietà del legante AR al variare del tempo di reazione	174
Tabella 3-13:	Temperature di miscelazione per conglomerati AR chiusi e gap-graded	183
Tabella 3-14:	Quantità tipiche di legante per gli HMRA	184
Tabella 3-15:	Caratteristiche dei conglomerati Asphalt Rubber	185
Tabella 3-16:	Forza di rottura e deformazione Marshall	185
Tabella 3-17:	Moduli di Deformabilità dei conglomerati Asphalt Rubber	186
Tabella 3-18:	Tassi tipici di produzione dei materiali con AR	187
Tabella 3-19:	Tipici tassi di applicazione per chip seals AR	192
Tabella 3-20:	Caratteristiche del bitume base per la produzione di AR in diverse regioni climatiche	194
Tabella 3-21:	Tipici parametri progettuali	198
Tabella 3-22:	Prove raccomandate per il controllo della qualità dei materiali	199
Tabella 3-23:	Prove raccomandate per il controllo della qualità del legante AR	200
Tabella 3-24:	Prove raccomandate per il controllo della qualità del conglomerato AR	200
Tabella 5-1:	Temperature massime e minime di progetto che definiscono le classi prestazionali.	258
Tabella 5-2:	Apparecchiature SHRP- SUPERPAVE®	260
Tabella 5-3:	Impostazioni del <i>Temperature Setting</i> per il raggiungimento della temperatura media nel reometro	269
Tabella 5-4:	Variabili di condizionamento del segmento 1	270
Tabella 5-5:	Variabili di condizionamento del segmento 2	270
Tabella 6-1:	Condizioni delle prove convenzionali realizzate	307
Tabella 6-2:	Condizioni delle prove reologiche realizzate	307
Tabella 6-3:	Caratteristiche principali dei bitumi studiati	308
Tabella 6-4:	Materiali oggetto di studio nella presente ricerca	311
Tabella 6-5:	Proprietà dell'additivo a base di acido polifosforico utilizzato nella presente indagine	317

Tabella 6-6:	Requisiti minimi per bitumi CRM dopo 45 min, Clima Tipo II	323
Tabella 6-7:	Requisiti minimi per bitumi CRM, Prodotto finale, Clima Tipo II	323
Tabella 6-8:	Modifica del bitume 160/220 con 20% di CRM	324
Tabella 6-9:	Modifica del bitume 70/100 A con diverse % di CRM	324
Tabella 6-10:	Modifica del bitume 70/100 B con 20% di CRM	325
Tabella 6-11:	Modifica del bitume 50/70 A con 18% di CRM	325
Tabella 6-12:	Modifica del bitume 50/70 B con diverse % di CRM	325
Tabella 6-13:	Modifica del bitume 40/50 con 18% di CRM	326
Tabella 6-14:	Risultati delle prove convenzionali per il bitume 70/100A con diverse percentuali di CRM	327
Tabella 6-15:	Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 50/70 B	340
Tabella 6-16:	Percentuale “ottima” di CRM per il bitume 70/100 A	340
Tabella 6-17:	Caratteristica dei bitumi non invecchiati	342
Tabella 6-18:	Caratteristica dei bitumi invecchiati RTFOT	343
Tabella 6-19:	Cicli di riscaldamento	345
Tabella 6-20:	Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante Tuben Test	354
Tabella 6-21:	Stabilità allo stoccaggio del bitume 40/50 + 18% CRM determinata mediante variante al metodo Tuben Test	355
Tabella 6-22:	Grandezze caratteristiche dei bitumi analizzati dopo 1 anno di stoccaggio	356
Tabella 6-23:	Miscele del tipo Terminal Blend	361
Tabella 6-24:	Aggiunta dell' 1% di Additivo a base di Acido Polifosforico	373
Tabella 6-25:	Effetto dell'agitazione dei leganti sulle grandezze principali di miscele SBS e AP	376
Tabella 6-26:	Effetto dell'aggiunta di diverse percentuali di SBS al bitume 70/100 A	381
Tabella 6-27:	Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele	382
Tabella 6-28:	Effetto della Base utilizzata sulle caratteristiche delle miscele	384
Tabella 6-29:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla penetrazione	385
Tabella 6-30:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla temperatura di rammollimento	385
Tabella 6-31:	Effetto dell'aggiunta di 1% di EVA sulla viscosità	385
Tabella 6-32:	Confronto fra la % ottima di CRM e il miglior risultato da additivazione	389
Tabella 6-33:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A	392
Tabella 6-34:	Prova di Frequency Sweep per il bitume 50/70B+18%CRM a 76°C	401
Tabella 6-35:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi non invecchiati	421
Tabella 6-36:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati RTFOT	421
Tabella 6-37:	Temperatura Limite Superiore PG per i bitumi invecchiati PAV	421
Tabella 6-38:	Performance Grade superiore per i bitumi studiati	423
Tabella 6-39:	Parametri per l'esecuzione della prova di creep	427
Tabella 6-40:	Confronto fra penetrazione e ZSV dei diversi tipi di bitume	430
Tabella 6-41:	Risultati della prova BBR per il bitume 70/100 A + 18% CRM	432
Tabella 6-42:	Performance Grade inferiore per i bitumi studiati	433
Tabella 6-43:	Bitumi con modifica hard per conglomerati bituminosi ad alta resistenza a fatica per strati di base	434
Tabella 6-44:	Bitumi con modifica hard per sigillature e giunti tamponi	434
Tabella 6-45:	Fusi di accettazione per i bitumi studiati	435
Tabella 6-46:	Performance Grade	446

Indice delle Figure

Figura 1-1:	Strutture di un asfaltene, di un idrocarburo aromatico e di un idrocarburo saturo	8
Figura 1-2:	Schema di frazionamento di bitumi	9
Figura 1-3:	Schematizzazione del bitume come micelle disperse in un mezzo oleoso	13
Figura 1-4:	Struttura dell'etilene vinilacetato (EVA)	19
Figura 1-5:	Struttura e unità di SBS	23
Figura 2-1:	Incendio in una discarica di Pneumatici, California 1999	33
Figura 2-2:	Pneumatici fuori uso accumulati in discarica	34
Figura 2-3:	Quantità di pneumatici riciclati nell'ambito di progetti con AR in Arizona dal 1988	38
Figura 2-4:	Investimenti per progetti con AR in Arizona dal 1988	38

Figura 2-5:	Fasi del processo di produzione del polverino di gomma di pneumatici riciclata	42
Figura 2-6:	Processo di produzione del polverino di gomma a partire da PFU	43
Figura 2-7:	Esempio di triturazione nel processo ambientale	45
Figura 2-8:	Composizione generica di un tipico pneumatico per automobili	46
Figura 2-9:	Schema di produzione e applicazione del polverino di gomma di pneumatici	48
Figura 2-10:	Esempio di impianto per la produzione di Asphalt Rubber	50
Figura 2-11:	Confronto tra le curve di fatica del conglomerato convenzionale e di quello ottenuto mediante Terminal Blend Process	54
Figura 2-12:	Impianto di produzione di Asphalt Rubber della Recipav	65
Figura 2-13:	Lavori di posa in opera di conglomerato AR	65
Figura 2-14:	Andamento della viscosità al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di poverino di gomma	73
Figura 2-15:	Andamento della resistenza residua al variare del tempo di digestione per differenti granulometrie di polverino di gomma	74
Figura 3-1:	Charles MacDonald	93
Figura 3-2:	Evoluzione dell'applicazione di CRM nelle pavimentazioni stradali	96
Figura 3-3:	Andamento decrescente dei prezzi dell'AR nel mercato dell'Arizona	97
Figura 3-4:	Andamento medio dei prezzi di CRM negli stati del sud ovest in USA	98
Figura 3-5:	Immagine associata ai due Congressi Internazionali sull'Asphalt Rubber	101
Figura 3-6:	Metodo di misura dell'altezza di sabbia	106
Figura 3-7:	Esempio di profilometro laser	107
Figura 3-8:	Esempio di veicolo per la misura del coefficiente di aderenza trasversale (CAT)	108
Figura 3-9:	Confronto tra due tratti di pavimentazione della I-40, a sinistra in conglomerato tradizionale e a destra in AR, dopo 8 anni di servizio	109
Figura 3-10:	Andamento della fessurazione durante le prove di carico accelerate	111
Figura 3-11:	<i>Heavy Vehicle Simulator</i> impiegato per lo studio del Caltrans e del CSIR.	112
Figura 3-12:	Stato fessurativo nelle diverse pavimentazione sottoposte alle prove con HVS	112
Figura 3-13:	Evoluzione della fessurazione nelle tre pavimentazioni sottoposte a prove con <i>Heavy Vehicle Simulator</i>	113
Figura 3-14:	Apparecchiatura per il <i>Fatigue Cracking Test</i>	119
Figura 3-15:	Prova di <i>Indirect Tensile Strength</i>	120
Figura 3-16:	Evoluzione della fessurazione nel tempo per diversi tipi di pavimentazioni	121
Figura 3-17:	Evoluzione comparativa dell'ormaiamento nel tempo	121
Figura 3-18:	Evoluzione comparativa della fessurazione nel tempo	122
Figura 3-19:	Carote che mostrano le capacità di resistenza alla fessurazione degli strati in AR	124
Figura 3-20:	Andamento dei valori di frizione <i>Mu Meter</i> nel tempo	126
Figura 3-21:	Riduzione dell'effetto <i>splash and spray</i> su una superficie in AR-OG rispetto ad una pavimentazione rigida	127
Figura 3-22:	Soluzione Asphalt Rubber sulla IH35, San Antonio (Texas). Corsia drenante e corsia tradizionale (A); particolare della superficie finita (B)	129
Figura 3-23:	Evoluzione comparativa della regolarità superficiale nel tempo	130
Figura 3-24:	Distribuzione delle emissioni sonore provocate dal passaggio di un veicolo su di una pavimentazione stradale	132
Figura 3-25:	Livelli medi di emissioni di rumore per diversi tipi di pavimentazioni a confronto	135
Figura 3-26:	Confronto tra i dati di rumorosità raccolti sui diversi tipi di pavimentazione in Arizona e California	136
Figura 3-27:	Strumentazione di misura dell'intensità sonora montata sulla ruota destra di un autoveicolo	137
Figura 3-28:	Livelli di rumorosità prima e dopo la riabilitazione dell'autostrada A8 con AR	142
Figura 3-29:	Riduzione dell'intensità sonora misurata nelle sezioni di prova della LA138 nel 2002 normalizzate rispetto a una pavimentazione rigida di riferimento	144
Figura 3-30:	Livelli dell'intensità sonora delle sezioni di prova della pavimentazione sulla LA138 misurate per un periodo di 18 mesi	144
Figura 3-31:	Spessori tipici di diversi esempi di strati di riabilitazione	148
Figura 3-32:	Costo di manutenzione in dollari per corsia/chilometro	149
Figura 3-33:	Costi di gestione del veicolo per l'utente per diverse età delle pavimentazioni in conglomerato convenzionale ed in AR	151

Figura 3-34:	Esempio di impianto mobile per la produzione di Asphalt Rubber	156
Figura 3-35:	Tipica curva di deterioramento, con indicati gli effetti di un trattamento manutentivo preventivo	157
Figura 3-36:	Esempio di riabilitazione a singolo strato, con evidenziati i minori spessori consentiti dall'applicazione di AR.	159
Figura 3-37:	Immagine che mostra l'elevata elasticità e resistenza di un trattamento superficiale con AR applicato ad una strada bianca nel deserto dell'Arizona	161
Figura 3-38:	Sistema a doppio strato	161
Figura 3-39:	Sistema triplo strato	162
Figura 3-40:	Apparecchiatura – Dynatest FWD 8081	163
Figura 3-41:	Fessurazione dei manti stradali al variare della percentuale di polverino	170
Figura 3-42:	Aspetto del bitume prima e dopo la modifica con CRM.	174
Figura 3-43:	Esempio di impianto di produzione di Asphalt Rubber del tipo <i>continuous drum dryer plant</i>	179
Figura 3-44:	Tipico schema di impianto per la produzione di Asphalt Rubber	180
Figura 3-45:	Esempio di unità di miscelazione	181
Figura 3-46:	Serbatoio di reazione del legante AR	181
Figura 3-47:	Cabina di controllo dei vari parametri del processo di produzione dell'Asphalt Rubber	182
Figura 3-48:	Impianto di produzione di AR in funzione	203
Figura 3-49:	Riscaldamento ambientale nell'area di Phoenix	206
Figura 4-1:	Sollecitazione applicata	211
Figura 4-2:	Esempio di risposta elastica	211
Figura 4-3:	Esempio di risposta viscosa	212
Figura 4-4:	Esempio di risposta viscoelastica	212
Figura 4-5:	Scomposizione del modulo complesso G^* sul piano complesso	222
Figura 4-6:	Comportamento di un fluido newtoniano ed uno viscoelastico quando mescolati velocemente	225
Figura 4-7:	Forze generate in un fluido viscoso ed in uno viscoelastico quando mescolati velocemente	226
Figura 4-8:	Accoppiamento piatto-piatto	228
Figura 4-9:	Schema dell'accoppiamento piatto-cono	229
Figura 4-10:	Sistema di misura a cilindri coassiali	229
Figura 4-11:	Rappresentazione della curva di rigidità di creep di un bitume rispetto al tempo	232
Figura 4-12:	Schematizzazione dei diversi stadi di creep	233
Figura 4-13:	Esempio di diagramma deformazione-tempo durante la fase di carico	234
Figura 4-14:	Esempio di andamento della deformazione nella fase di recovery al variare del tempo di carico	234
Figura 4-15:	Componenti della deformabilità, reversibile e permanente, al termine di una fase di recovery	235
Figura 4-16:	Esempio di curva maestra accompagnata dal grafico dello shift factor	238
Figura 4-17:	Andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase di un bitume in funzione della frequenza	238
Figura 4-18:	Esempio di strain sweep impiegata per determinare la regione lineare	241
Figura 4-19:	Rappresentazione dei parametri della curva maestra	242
Figura 4-20:	Comportamento elastico-lineare e non lineare	247
Figura 4-21:	Domini di comportamento	248
Figura 5-1:	Il Rolling Thin Film Oven (RTFO)	262
Figura 5-2:	Schema del interno del RTFO	263
Figura 5-3:	Bicchieri e bacchetta per invecchiamento MRTFOT	264
Figura 5-4:	Pressure Aging Vessel (PAV)	265
Figura 5-5:	Schema dell'apparecchiatura PAV	265
Figura 5-6:	Schema dei componenti del viscosimetro di Brookfield	266
Figura 5-7:	Reometro Haake Rotovisco RT10	267
Figura 5-8:	Apparecchiatura DSR	267
Figura 5-9:	Elementi costitutivi del reometro.	268
Figura 5-10:	Schema della quantità giusta di bitume per la prova DSR	268
Figura 5-11:	Comportamenti puramente elastico e puramente viscoso	271

Figura 5-12:	Risposta di un materiale viscoelastico	272
Figura 5-13:	Schema delle equazione di calcolo per il DSR	272
Figura 5-14:	Prova BBR	273
Figura 5-15:	Schema di una apparecchiatura BBR	274
Figura 5-16:	Schema di preparazione del cassero	275
Figura 5-17:	Provino di Bitume modificato SBS hard	276
Figura 5-18:	Rappresentazione della curva Deflessioni vs. tempo	277
Figura 5-19:	Curva Log di S(t) vs Log del tempo di carico	278
Figura 5-20:	(e 5-21) Casseri per provini DTT e schema di un provino DTT	280
Figura 5-22:	Provini DTT	280
Figura 5-23:	Deformazione di rottura nella prova DTT	281
Figura 5-24:	Tensione di rottura nella prova DTT	281
Figura 5-25:	Prove SHRP	283
Figura 5-26:	Esempio di risultati di una prova di creep ripetuto	290
Figura 5-27:	Modello analogico di Burgers	290
Figura 5-28:	Tipico andamento della deformabilità nel tempo in una prova di creep-recovery	294
Figura 5-29:	Determinazione della temperatura critica.	296
Figura 6-1:	Schema delle prove convenzionali e reologiche realizzate	306
Figura 6-2:	Principali apparecchiature utilizzate nelle prove reologiche	307
Figura 6-3:	Schema della scelta dei materiali di studio	310
Figura 6-4:	Miscelatore “Caframo” impiegato per la preparazione dell’Asphalt Rubber in laboratorio e schema della aste di acciaio per l’agitazione della miscela bitume-polverino	312
Figura 6-5:	Aspetto del polverino utilizzato nell’indagine	313
Figura 6-6:	Fasi di produzione in laboratorio di un bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata	314
Figura 6-7:	Aumento di volume del legante AR conseguente al riscaldamento, dovuto al rigonfiamento della gomma con creazione di aria al suo interno	314
Figura 6-8:	Strumento utilizzato per l’agitazione della miscela bitume-polimero	315
Figura 6-9:	Differenza di aspetto dei bitumi modificati con polverino di gomma (rugosi a sinistra) e modificati con SBS (aspetto liscio a destra)	316
Figura 6-10:	Temperatura di rammollimento per i tre metodi di produzione di bitumi modificati chimicamente con additivo a base di acido polifosforico	318
Figura 6-11:	Penetrometro	319
Figura 6-12:	Apparecchiatura per la prova di resilienza	320
Figura 6-13:	Duttillometro e cassero per ritorno elastico	322
Figura 6-14:	Evoluzione della viscosità lungo il tempo di reazione per bitumi Asphalt Rubber	327
Figura 6-15:	Evoluzione della Temperatura di Rammollimento all’aumentare della percentuale di polverino per il legante 70/100 A	329
Figura 6-16:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	330
Figura 6-17:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	331
Figura 6-18:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 70/100 A, diverse % CRM	331
Figura 6-19:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B, diverse % di CRM	332
Figura 6-20:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 70/100 A, diverse % di CRM	333
Figura 6-21:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	333
Figura 6-22:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	334
Figura 6-23:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	335
Figura 6-24:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 70/100 A con diverse % di CRM	336
Figura 6-25:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM	336
Figura 6-26:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diverse % di CRM	337
Figura 6-27:	Variazione della resilienza con la penetrazione per leganti AR con diverse % di CRM	338

Figura 6-28:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per leganti AR con diverse % di CRM	339
Figura 6-29:	Duttilità e recupero elastico di bitumi CRM	341
Figura 6-30:	Duttilità e recupero elastico di bitumi CRM dopo invecchiamento	341
Figura 6-31:	Valori di penetrazione prima e dopo invecchiamento RTFOT	343
Figura 6-32:	Temperatura di rammollimento per i bitumi considerati, vergini e dopo RTFOT	344
Figura 6-33:	Confronto fra i valori di palla anello al inizio e alla fine di 4 cicli di riscaldamento e raffreddamento	346
Figura 6-34:	Andamento della viscosità per il bitume 70/100 A	346
Figura 6-35:	Andamento della viscosità per il bitume SBS hard	347
Figura 6-36:	Andamento della viscosità per il bitume modificato con EVA	348
Figura 6-37:	Andamento della viscosità per il bitume modificato con 15% di CRM	349
Figura 6-38:	Confronto fra valori di temperatura di rammollimento iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento-raffreddamento	350
Figura 6-39:	Confronto fra i valori di viscosità iniziale, dopo RTFOT e dopo 4 cicli di riscaldamento raffreddamento	351
Figura 6-40:	Confronto fra valori di duttilità e di ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS hard	352
Figura 6-41:	Confronto fra valori di duttilità e di Ritorno elastico per bitumi modificati CRM e SBS – effetto dell'invecchiamento	353
Figura 6-42:	Temperatura di Rammollimento per diversi tipi di modifica e invecchiamento	353
Figura 6-43:	Comparazione fra le caratteristiche del bitume non modificato 70/100 A dopo 1 anno di stoccaggio	357
Figura 6-44:	Effetti dello stoccaggio sul bitume SBS Hard	357
Figura 6-45:	Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 18% CRM	358
Figura 6-46:	Effetti dello stoccaggio per il legante 70/100 A + 20% CRM	358
Figura 6-47:	Confronto tra i diversi bitumi stoccati durante 1 anno	359
Figura 6-48:	Suscettibilità alla temperatura dell'additivo AP	360
Figura 6-49:	Effetto dell'additivazione sul valore di ritorno elastico	361
Figura 6-50:	Effetto sulla penetrazione e sulla temperatura di rammollimento	362
Figura 6-51:	Effetto dell'additivazione nella viscosità	362
Figura 6-52:	Variazione della viscosità con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	363
Figura 6-53:	Variazione della viscosità con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	364
Figura 6-54:	Variazione della viscosità con la resilienza per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	364
Figura 6-55:	Variazione della resilienza con la temperatura di rammollimento per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	365
Figura 6-56:	Variazione della resilienza con la penetrazione per il bitume 50/70 B con diverse % di CRM e di additivo	365
Figura 6-57:	Variazione della temperatura di rammollimento con la % di AP	366
Figura 6-58:	Influenza della % di additivo sulla resilienza	366
Figura 6-59:	Variazione della viscosità con la % di AP, stessa % di CRM	367
Figura 6-60:	Variazione della penetrazione con la % di AP, stessa % di CRM	368
Figura 6-61:	Variazione della resilienza con la % di CRM, per l'1% di AP	368
Figura 6-62:	Variazione della temperatura di rammollimento con la % di CRM, per l'1% di AP	369
Figura 6-63:	Variazione della viscosità con la % di CRM, stessa % di AP	369
Figura 6-64:	Variazione della penetrazione con la % di CRM, per l'1 % di AP	370
Figura 6-65:	Confronto fra i valori di palla anello al variare della % di AP e di CRM	371
Figura 6-66:	Confronto fra i valori di resilienza al variare della % di AP e di CRM	371
Figura 6-67:	Confronto fra i valori di viscosità al variare della % di AP e di CRM	372
Figura 6-68:	Viscosità a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	374
Figura 6-69:	Penetrazione a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	374
Figura 6-70:	Resilienza a confronto per diverse percentuali di CRM e AP	375
Figura 6-71:	Andamento nel tempo della viscosità a 160°C per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	377

Figura 6-72:	Andamento nel tempo della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	377
Figura 6-73:	Andamento nel tempo della penetrazione per il bitume 70/100A +3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	378
Figura 6-74:	Andamento nel tempo della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100A+3% di SBS+0.5% di additivo, sia in condizione statica che sotto agitazione	378
Figura 6-75:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	379
Figura 6-76:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della differenza di Tuben Test per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	380
Figura 6-77:	Confronto tra l'andamento sotto agitazione della viscosità per il bitume 70/100A+3%SBS con lo 0.5% e l'1% di additivo	380
Figura 6-78:	Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS	381
Figura 6-79:	Effetto della percentuale di SBS sulle caratteristiche delle miscele	383
Figura 6-80:	Effetto del bitume base utilizzato sulle caratteristiche delle miscele	384
Figura 6-81:	Andamento della penetrazione per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	386
Figura 6-82:	Andamento della temperatura di rammollimento per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	386
Figura 6-83:	Andamento della viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS, con e senza l'aggiunta di un 1% di EVA	387
Figura 6-84:	Andamento dei valori di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A tal quale e modificato con 3 e 4% di SBS	387
Figura 6-85:	Andamento di penetrazione, temperatura di rammollimento e viscosità@160°C per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di SBS e con 1% di EVA	388
Figura 6-86:	Schema di calcolo per le curve di viscosità	391
Figura 6-87:	Modello di Maryland per le curve di sensibilità viscosità-temperatura per il bitume 70/100 A non modificato	391
Figura 6-88:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM	392
Figura 6-89:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 70/100 A modificato con diverse % di CRM	393
Figura 6-90:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per il bitume 160/220	393
Figura 6-91:	Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 20% di CRM	394
Figura 6-92:	Curve di viscosità per diversi bitumi base modificati con 15% di CRM	395
Figura 6-93:	Sensibilità della viscosità alla temperatura per bitumi modificati SBS e EVA	395
Figura 6-94:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA	396
Figura 6-95:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, terminal blend, SBS e EVA	397
Figura 6-96:	Comparazione della sensibilità della viscosità al variare della temperatura per i bitumi modificati CRM, SBS e EVA dopo invecchiamento RTFOT	397
Figura 6-97:	Definizione dei limiti del campo lineare in relazione a G' per i bitume studiati SBS Hard, 50/70 A da visbraking e EVA Soft	400
Figura 6-98:	Modulo complesso per bitumi CRM	402
Figura 6-99:	Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV nel angolo di fase dei bitumi CRM	402
Figura 6-100:	Effetto dell'invecchiamento RTFOT e PAV nel modulo complesso per bitumi CRM	403
Figura 6-101:	Angolo di fase medio per il bitume vis	403
Figura 6-102:	Angolo di fase medio per il bitume hard	404
Figura 6-103:	Evoluzione del modulo complesso con la temperatura per il bitume 40/50 + 18% CRM vergine	404
Figura 6-104:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume non modificato 70/100 A vergine	405
Figura 6-105:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume non modificato 70/100 A + 18% CRM vergine	406
Figura 6-106:	Modulo complesso diviso nella componente elastica e nella componente viscosa per il bitume SBS Hard vergine	406

Figura 6-107:	Deformazione per le temperature 40, 52 e 76°C	409
Figura 6-108:	Deformazione osservata a 40°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	409
Figura 6-109:	Deformazione osservata a 52°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	410
Figura 6-110:	Deformazione osservata a 76°C nei bitumi 50/70A, EVA soft e SBS hard	410
Figura 6-111:	Evoluzione di G^* con l'aumento della deformazione per il bitume 50/70 A	411
Figura 6-112:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 40°C	411
Figura 6-113:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 52°C	412
Figura 6-114:	Effetto della modifica sull'angolo di fase a 76°C	412
Figura 6-115:	Evoluzione della deformazione all'aumentare della frequenza per i bitumi 50/70 A non modificato, modificato EVA soft e SBS hard	413
Figura 6-116:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV	415
Figura 6-117:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A + 18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV	415
Figura 6-118:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume SBS Hard vergine, invecchiato RTFOT e PAV	416
Figura 6-119:	Temperatura limite superiore PG per il bitume 70/100 A vergine, invecchiato RTFOT e PAV	417
Figura 6-120:	$G^*/\text{sen } \delta$ per il bitume 70/100 A +18% CRM vergine, invecchiato RTFOT e PAV	417
Figura 6-121:	$G^*/\text{sen } \delta$ funzione della temperatura per formulazioni terminal blend	418
Figura 6-122:	Angolo di fase funzione della temperatura per formulazioni terminal blend	418
Figura 6-123:	Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi studiati	419
Figura 6-124:	Performance Grade e Temperatura Limite per i bitumi invecchiati con l'RTFO e con l'MRTFOT	420
Figura 6-125:	Temperature limite superiori	422
Figura 6-126:	Temperature limite superiori	422
Figura 6-127:	Prove di creep-recovery di bitumi CRM	424
Figura 6-128:	Prove di creep-recovery di bitumi CRM.	425
Figura 6-129:	Prima ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM	429
Figura 6-130:	Seconda ripetizione di una prova di viscosità di bitume 18% CRM	429
Figura 6-131:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume 50/70 B non modificato (fuso di accettazione bitume base)	436
Figura 6-132:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume 50/70 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)	436
Figura 6-133:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume 70/100 A non modificato (fuso di accettazione bitume base)	437
Figura 6-134:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume Asphalt Rubber 70/100 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)	437
Figura 6-135:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume Asphalt Rubber 70/100+20% CRM (fuso di accettazione hard)	438
Figura 6-136:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume Asphalt Rubber 40/50 + 18% CRM (fuso di accettazione hard)	438
Figura 6-137:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume EVA soft (fuso di accettazione hard)	439
Figura 6-138:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume SBS Soft (fuso di accettazione hard)	439
Figura 6-139:	Curva Modulo Complesso G^* – Angolo di Fase δ per il bitume SBS Hard (fuso di accettazione hard)	440
Figura 6-140:	Master Curve per il bitume 70/100 + 18 %CRM	441
Figura 6-141:	Master Curve per il bitume EVA Soft	441
Figura 6-142:	Master Curve per il bitume 50/70 A	442
Figura 6-143:	Master Curve per il bitume SBS Soft	442
Figura 6-144:	Master Curve per il bitume SBS Hard	443