

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFALTO-BORRACHA PRODUZIDAS PELOS PROCESSOS ÚMIDO E SECO¹

Quincio Muniz Pinto Netto ²

Me. Ana Carolina da Cruz Reis ³

Esp. Bernardo Joaquim Batalha Neto ⁴

RESUMO: Os carregamentos oriundos do tráfego de veículos são ascendentes, exigindo cada vez mais dos pavimentos flexíveis a necessidade de reação e transmissão dos esforços na camada de revestimento. No presente trabalho abordou-se uma análise comparativa do comportamento mecânico de mistura asfáltica convencional (concreto asfáltico usinado a quente) e modificada por borracha moída de pneus inservíveis (asfalto-borracha), produzida pelos processos úmido, através dos métodos terminal blend e continuous blend, e processo seco. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados convencionais, borracha e ligantes asfálticos, ensaios de dosagem Marshall, resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliente. A mistura asfalto-borracha do processo seco apresentou valores insatisfatórios, enquanto as misturas do processo úmido apresentaram valores significativos nos ensaios realizados, denotando a viabilidade técnica e ambiental de substituição da mistura asfáltica convencional em camada de revestimento.

PALAVRAS CHAVE: pneumáticos, misturas asfálticas, asfalto borracha.

INTRODUÇÃO

A matriz de transporte brasileira está pautada no modal rodoviário, com predominância dos pavimentos flexíveis em mais de 95% das estradas. A atuação desse sistema depende do comportamento das misturas asfálticas,

¹ Apresentado no XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino Em Transportes.

² Engenheiro Civil, Graduado na UNDB (Unidade de Ensino Superior Dom Bosco).

³ Professora Me, orientadora – UFMA (Universidade Federal do Maranhão).

⁴ Professor Esp, co-orientador – UNDB (Unidade de Ensino Superior Dom Bosco).

que devem ser capazes de suportar as cargas do tráfego nas mais variadas condições climáticas, transferindo-as para as camadas inferiores.

O comportamento mecânico da mistura asfáltica é diretamente influenciado pelas características dos seus compostos e pelo modo de interação entre eles. A constituição de uma mistura asfáltica é feita de ligante asfáltico, materiais granulares e materiais de enchimento, em proporções específicas e pré-definidas em projeto (BERNUCCI et al., 2006).

As misturas asfálticas convencionais nem sempre apresentam características apropriadas para um desempenho desejável. Contudo, a busca por pavimentos mais resistentes ao fadigamento e à deformação permanente, associada à preocupação ambiental com a disposição inadequada de pneus inservíveis, motivaram o uso de borracha moída na em misturas asfálticas, gerando uma nova mistura alternativa denominada de asfalto-borracha.

A pavimentação asfáltica é uma das áreas mais estudadas e considerada como alternativa em potencial para a solução do passivo ambiental causado por pneus inservíveis descartados de forma inadequada. Tal fato é devido basicamente a dois fatores: a possibilidade de utilização em larga escala de um grande volume de pneus inservíveis e a melhoria nas características técnicas da mistura asfáltica produzida com a adição de borracha moída (SPECHT, 2004).

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou e comparou, através de ensaios mecânicos, misturas asfálticas convencional e modificada com borracha pelos processos seco e úmido, fornecendo parâmetros para a análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização de misturas asfalto-borracha em camadas de revestimento.

1. ASFALTO-BORRACHA

Existem dois processos de adição da borracha moída para modificação de misturas asfálticas: o processo úmido, que pode ser executado por dois métodos, terminal blend e continuous blend, e o processo seco. No processo úmido a borracha é incorporada ao ligante asfáltico, modificando as suas propriedades e gerando um novo ligante, antes da mistura com os

agregados, enquanto o processo seco a borracha é adicionada diretamente aos agregados.

1.1 PROCESSO ÚMIDO

As variações do processo úmido divergem pelo local de produção e estocagem. Enquanto o método terminal blend caracteriza-se pela produção do ligante em distribuidoras de produtos asfálticos, podendo ser estocado por longos períodos, o continuous blend consiste na produção em usina de asfalto, onde são produzidas as misturas à quente, para utilização imediata, não permitindo estocagem por períodos de tempo maiores que algumas horas.

No processo úmido o ligante deve ser beneficiado em temperaturas elevadas por agitação em alto cisalhamento, promovendo assim a desvulcanização e despolimerização da borracha e, conseqüentemente, melhor relação entre o ligante convencional e a borracha, que resultam em um produto final mais viscoso (ODA, 2000).

No método terminal blend, as alterações química, física e reológica ocorrem por meio de fusão entre os elementos. O procedimento é realizado por intermédio de digestão térmica e movimentação mecânica nos moinhos de cisalhamento, onde o resultado será um ligante alterado estável e uniforme, de tal forma que mesmo durante o armazenamento os seus componentes não se separam (BALAGUER, 2012).

No método continuous blend o resultado esperado é o amolecimento e inchamento da borracha, através da absorção dos óleos aromáticos do ligante convencional pelas cadeias de polímero da borracha moída, gerando um ligante menos estável (FONTES, 2009).

1.2 O PROCESSO SECO

No processo seco, os fragmentos de borracha são inicialmente adicionados em substituição a um determinado percentual de agregado mineral, antes do acréscimo do ligante asfáltico. Neste processo, as áreas dos fragmentos de borracha são maiores do que as empregadas no processo úmido, funcionando como um material inerte na mistura.

O comportamento entre o ligante e as partículas de borracha que ocorrem no processo seco dependem da granulometria. Borracha com grande superfície específica provoca aumento na área de contato, beneficiando as reações entre esses elementos durante curtos intervalos de tempo e com baixas temperaturas, em relação ao processo úmido (DANTAS NETO, 2004).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

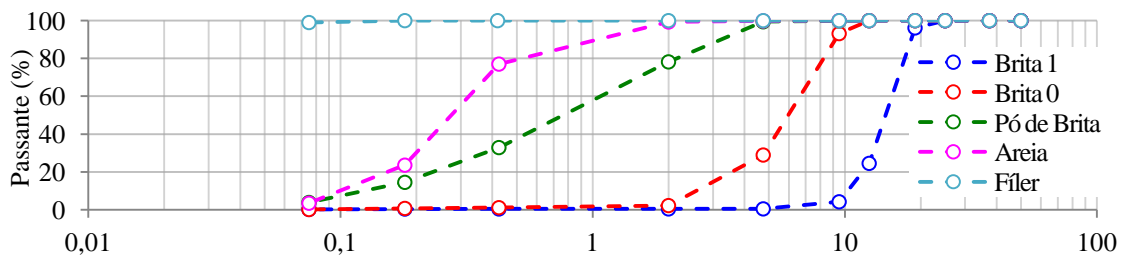
As misturas avaliadas e comparadas neste trabalho foram denominadas de CAUQ-REF para o concreto asfáltico usinado à quente como mistura de referência, AB-TB para o asfalto-borracha produzido pelo processo úmido e método terminal blend, AB-CB para o método continuous blend e AB-SECO para a mistura do processo seco.

Os materiais utilizados foram coletados em empresa do ramo de pavimentação asfáltica, sendo a origem dos agregados das jazidas e pedreiras localizadas em Bacabeira, estado do Maranhão. Os ligantes asfálticos utilizados foram o CAP 50/70, proveniente da refinaria Lubnor, e o Ecoflex B com 15% de borracha. A borracha moída utilizada foi proveniente de empresa recicladora de pneus localizada em Ribeirão Preto, estado de São Paulo.

A caracterização dos materiais foi realizada nos laboratórios de solos e pavimentos da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), de acordo com as normas DNIT-ES 031 (DNIT, 2006), para as misturas CAUQ-REF e AB-SECO, e DNIT-ES 112 (DNIT, 2009), para as misturas AB-TB e AB-CB. Entretanto, as misturas AB-SECO e AB-CB não possuem norma brasileira, sendo a escolha dessas normas por similaridade entre os processos.

Quanto aos agregados, foram realizados os ensaios de densidades, equivalência de areia, abrasão Los Angeles e adesividade, para conhecimento das propriedades físicas (Tabela 1), e ensaios granulométricos para elaboração do traço nas misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB, conforme o gráfico da Figura 1.

Materiais	Agregado Graúdo		Agregado Miúdo		Fíler
	Brita 0	Brita 1	Pó de Brita	Areia	Portland CII-32
Los Angeles (%)	16,58	-	-	-	-
Peso específico (g/cm ³)	2,736	2,779	2,762	2,75	2,973
Equivalente areia (%)	-	-	-	82,24	-
Adesividade	Satisfatório		Boa adesividade (8)		-

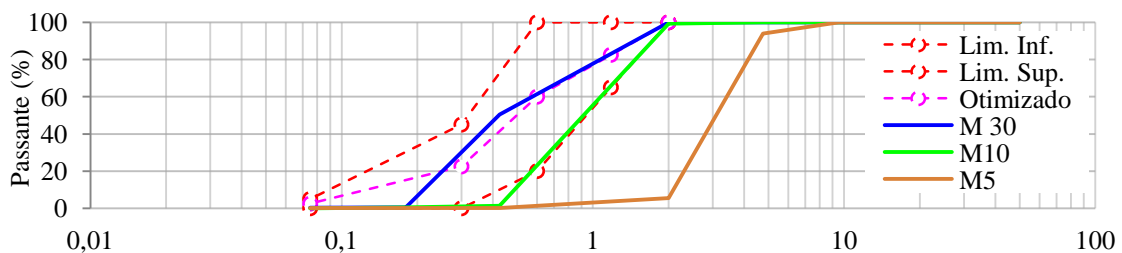


A borracha moída de pneus foi ensaiada quanto à granulometria para utilização como agregado na mistura AB-SECO e como modificador do ligante asfáltico na mistura AB-CB. A borracha moída foi dividida em três grupos, denominados de M5, M10 e M30, conforme a ilustração da granulometria na Figura 2.



Figura 2: Divisão granulométrica das borrachas moídas

Para a mistura AB-CB, foram utilizados os parâmetros estabelecidos na norma Rubber Type B – Construction Manual Section 1009, do Arizona Department of Transportation (ADOT, 2005), referente à granulometria e percentuais de borracha a serem utilizados como modificadores de ligantes asfálticos convencionais.



Conhecidas as granulometrias dos agregados convencionais e da borracha, foi elaborado um único traço para as misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB (Tabela 2), buscando-se o enquadramento das mesmas na Faixa C do DNIT (Figura 4), havendo variação apenas no tipo de ligante asfáltico a ser utilizado.

Tabela 2 – Traço proposto para as misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB

PENEIRA		% PASSANTE					FAIXA C			
#	mm	Brital	Brita 0	Pó brita	Areia	Fíler	Mín.	Máx.	Méd.	Final
2"	50,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"1/2	37,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	96,14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,38
1/2"	12,50	24,55	100,00	100,00	100,00	100,00	80,00	100,00	90,00	87,93
3/8"	9,50	4,25	100,00	100,00	100,00	100,00	70,00	90,00	80,00	82,08
Nº 4	4,75	0,50	28,97	99,40	99,86	100,00	44,00	72,00	58,00	57,56
Nº 10	2,00	0,48	2,25	78,19	99,29	100,00	22,00	50,00	36,00	39,16
Nº 40	0,42	0,45	1,14	32,90	77,03	100,00	8,00	26,00	17,00	19,74
Nº 80	0,18	0,41	0,74	14,53	23,61	100,00	4,00	16,00	10,00	10,10
Nº 200	0,07	0,21	0,17	3,88	3,51	98,99	2,00	10,00	6,00	4,76
TRAÇO (%)		16	37	40	4	3	-	-	-	-

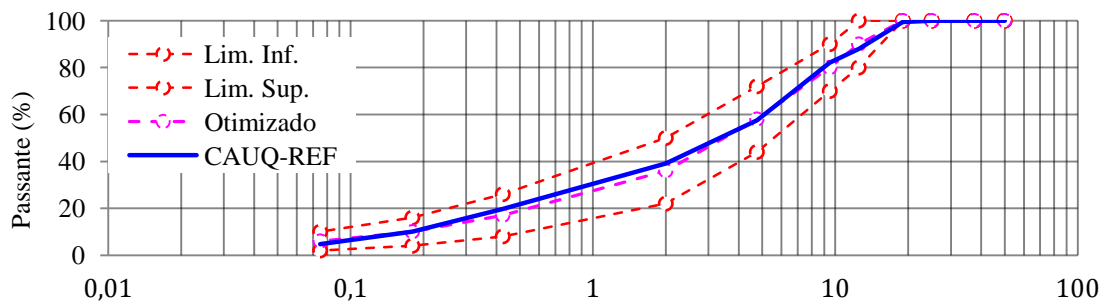


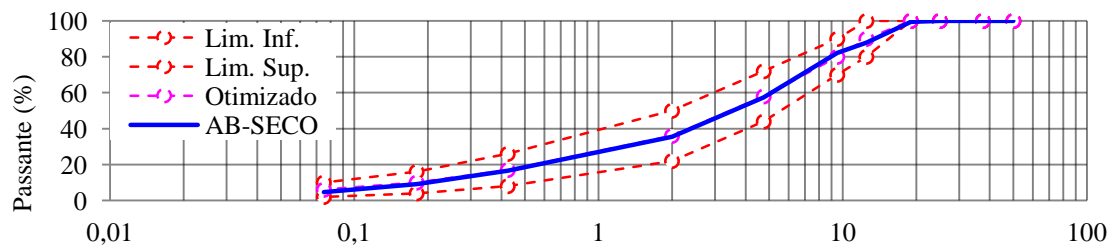
Figura 4: Enquadramento granulométrico das misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB

A escolha da borracha como agregado na mistura AB-SECO foi realizada pela análise da curva granulométrica das amostras, buscando-se uma curva próxima da otimizada, assim como uma analogia aos trabalhos realizados por Patriota (2004), Specht (2004) e Pilati (2008), sendo utilizado 4% de borracha M5 em substituição de agregado miúdo, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Traço proposto para a mistura asfálticas AB-SECO

PENEIRA		% PASSANTE					FAIXA C			
#	mm	Brital	Brita 0	Pó brita	M5	Fíler	Mín.	Máx.	Méd.	Final
2"	50,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"1/2	37,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	96,14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,38
1/2"	12,50	24,55	100,00	100,00	100,00	100,00	80,00	100,00	90,00	87,86
3/8"	9,50	4,25	100,00	100,00	100,00	100,00	70,00	90,00	80,00	82,14
Nº 4	4,75	0,50	28,97	99,40	93,92	100,00	44,00	72,00	58,00	57,32
Nº 10	2,00	0,48	2,25	78,19	5,44	100,00	22,00	50,00	36,00	35,41
Nº 40	0,42	0,45	1,14	32,90	0,21	100,00	8,00	26,00	17,00	16,67

Nº 80	0,18	0,41	0,74	14,53	0,18	100,00	4,00	16,00	10,00	9,16
Nº 200	0,07	0,21	0,17	3,88	0,08	98,99	2,00	10,00	6,00	4,62
TRAÇO (%)	16	37	40	4	3	-	-	-	-	-



Os ligantes asfálticos convencional CAP 50/70 e modificado Ecoflex B foram avaliados e caracterizados conforme as preconizações em normas, apresentando-se os métodos e resultados na Tabelas 4.

Tabela 4 – Caracterização dos ligantes asfálticos

CAP 50/70 - ENSAIO	UNID.	MÉTODO	ESPECIFIC.	RESULTADOS
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	D 5	50 a 70	56,0
Ponto de Amolecimento	°C	D 36	46 (mínimo)	48,20
Viscosidade Brookfield 135°C SP21 20rpm	cP	D 4402	274 (mínimo)	402,0
Viscosidade Brookfield 150°C SP21 20rpm	cP	D 4402	112 (mínimo)	202,0
Viscosidade Brookfield 177°C SP21 20rpm	cP	D 4402	57 a 285	74,0
ECOFLEX B - ENSAIO				
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR 6576	30 a 70	49,0
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	55 (mínimo)	55,0
Viscosidade Brookfield 175°C SP27 20rpm	cP	ASTM2196	800 a 2000	1565,0

2.1 DOSAGEM MARSHAL

A mistura CAUQ-REF foi dosada pelo ensaio Marshall no laboratório de pavimentos da UEMA, conforme a norma DNER-ME 043 (DNER, 1995), para conhecimento das propriedades das pré-misturas com variação no teor de CAP (Tabela 5).

Tabela 5 – Propriedades das misturas dosadas no ensaio Marshall

% de CAP	DAP (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VV (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
4,5	2,434	2,559	4,9	10,7	15,6	68,5	735
5,0	2,427	2,539	4,4	11,8	16,3	72,7	709
5,5	2,453	2,520	2,6	13,2	15,8	83,2	847
6,0	2,480	2,500	0,8	14,5	15,4	94,5	799

O valor do teor ótimo de ligante asfáltico utilizado na mistura CAUQ-REF foi conhecido através da análise gráfica dos volumes de vazios (VV),

sendo o critério de escolha um VV de 4% (BERNUCCI et al., 2006). Dessa forma, o valor anotado para a mistura foi de 5,15%, conforme apresentado no gráfico da Figura 6.

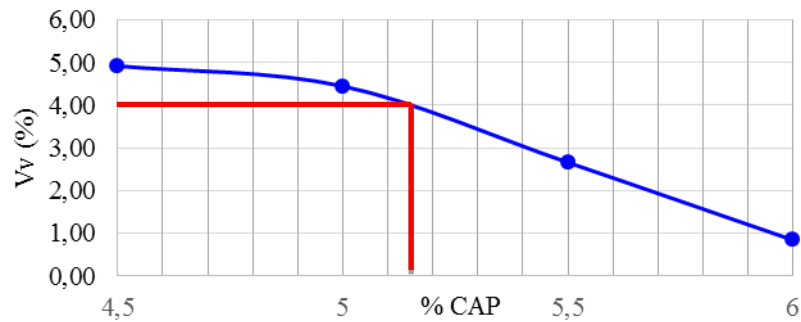


Figura 6: Análise gráfica do teor ótimo de ligante

O teor ótimo de ligante asfáltico encontrado para a mistura CAUQ-REF foi adotado para as demais misturas, permitindo uma comparação do comportamento mecânico com um mesmo teor de ligante. Entretanto, para a utilização em projetos, uma dosagem do teor ótimo de ligante faz-se necessário para cada mistura, haja vista a utilização de ligantes com propriedades distintas para as misturas do processo úmido, e variação do agregado no processo seco.

Conhecido o teor ótimo de ligante, foram confeccionados nove corpos-de-prova para cada mistura, seguindo as mesmas premissas básicas: secagem em estufa, pesagem e aquecimento dos agregados, aquecimento do ligante, mistura agregado-ligante, compactação em soquete Marshall elétrico. As temperaturas de aquecimento do ligante e agregado, e as temperaturas de mistura e compactação foram definidas de acordo com a caracterização dos ligantes e com as normas DNIT-ES 031 (DNIT, 2006) e DNIT-ES 112 (DNIT, 2009), conforme a Tabela 6.

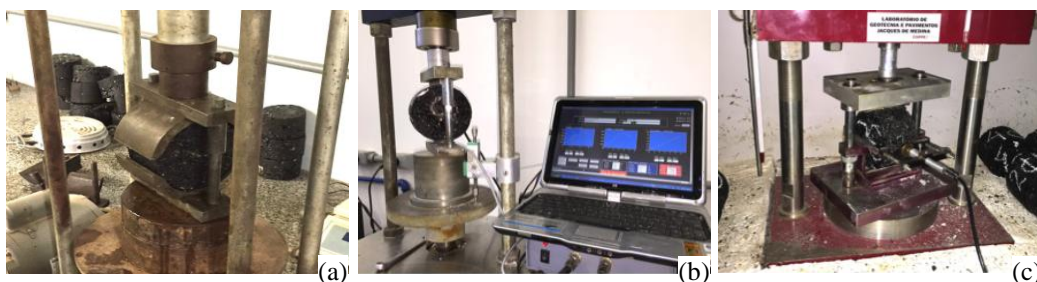
Tabela 6 – Resumo das premissas para dosagem dos corpos-de-prova

Mistura	Ligante		Agregado		Mistura		Compactação	
	Tipo	°C	Tipo	°C	Tipo	°C	Tipo	°C
CAUQ-REF	CAP 50/70	150	convencional	160	convencional	145	elétrico	139
AB-TB	Ecoflex B 15%	175	convencional	185	pré-mistura	170	elétrico	150
AB-CB	Borracha M30 17%	175	convencional	185	convencional	170	elétrico	150
AB-SECO	CAP 50/70	150	borracha M5 4%	160	convencional	145	elétrico	139

Para a mistura AB-TB, buscou-se uma maior interação entre o ligante e os agregados através da pré-mistura sem fíler, sendo este adicionado separadamente e realizada a homogeneização final para compactação. Quanto a mistura AB-CB, a borracha M30 pré-aquecida em estufa foi adicionada ao ligante convencional em 17% do seu peso, mantendo-se a temperatura de 175oC e agitação contínua por um período de 90 minutos, necessários à digestão da borracha pelo ligante.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As misturas asfalto-borracha e convencional foram avaliadas para conhecimento do comportamento mecânico, através da dosagem Marshall, realizada no laboratório de pavimentos da UEMA, ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo resiliente, realizado no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ).



3.1 ESTABILIDADE MARSHAL E PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS

As misturas asfálticas CAUQ-REF e AB-SECO foram avaliadas quanto à estabilidade Marshall e propriedades volumétricas de acordo com a norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006), e as misturas AB-TB e AB-CB pela norma DNIT-ES 112 (DNIT, 2009), conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores médios da estabilidade Marshall e propriedades volumétricas

MISTURA	DAP (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VV (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
CAUQ-REF	2,429	2,528	3,9	12,6	16,5	76,2	764
AB-TB	2,404	2,528	4,9	10,1	17,3	71,8	880

AB-CB	2,389	2,521	5,2	12,6	17,8	70,7	824
AB-SECO	2,219	2,375	6,5	11,5	18,1	63,7	300

3.1.1 VOLUMES DE VAZIOS (VV)

As duas normas utilizadas como parâmetro estabelecem os mesmos valores máximo e mínimo de VV, 3% e 5% respectivamente para camadas de rolamento. Dessa forma, os resultados foram satisfatórios somente para as misturas CAUQ-REF e AB-TB, apesar desta última apresentar valores próximos do limite estabelecido em norma. As outras misturas apresentaram valores superiores ao máximo estabelecido.

Ressalta-se nesta etapa que há uma tendência no aumento do volume de vazios para misturas asfalto-borracha, devido à expansão sofrida pela borracha em contato com o ligante asfáltico em alta temperatura, mais evidenciada na mistura AB-SECO, pela substituição de agregado miúdo por borracha de maior granulometria, resultando em uma diminuição nas densidades máxima teórica e aparente. O gráfico da Figura 8 evidencia a expansão sofrida pela borracha em contato com o ligante, através do resultado do volume de vazios de cada mistura.

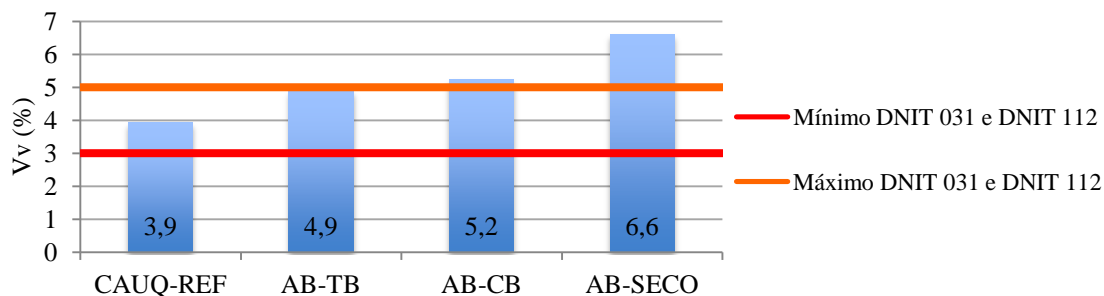


Figura 8: Valores dos volumes de vazios (VV)

Outro fator preponderante foi a necessidade de dosagem Marshall para as misturas asfalto-borracha e agregado-borracha, sendo utilizado o mesmo teor ótimo de ligante da mistura de referência para as misturas alternativas. Acredita-se que uma dosagem Marshall das misturas asfalto-borracha provenientes do processo úmido, AB-TB e AB-CB, apontaria valores de VV próximos dos 4%, indicando assim volumes de vazios dentro dos parâmetros ideais exigidos em norma. Porém, mesmo que houvesse dosagem Marshall para a mistura AB-SECO, o volume de vazio continuaria elevado, em função da granulometria da borracha utilizada.

3.1.2 RELAÇÃO DE BETUME VAZIOS (RBV)

A norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006) estabelece como parâmetro o valor de RBV mínimo de 75% e máximo de 82%, enquanto a norma DNIT-ES 112 (DNIT, 2009) estabelece 65% e 78%, respectivamente, para as camadas de rolamento.

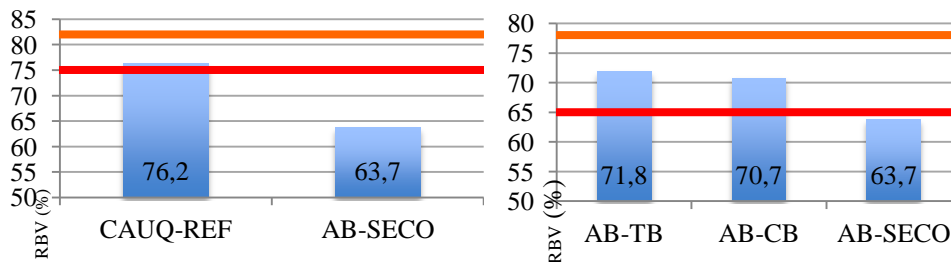


Figura 9: Valores da relação betume vazios (RBV)

Dessa forma, quando avaliadas pela norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006), apenas a mistura de referência CAUQ-REF apresentou valor de RBV compatível com o limite estabelecido. A mistura agregado-borracha AB-SECO apresentou valor inferior ao limite mínimo. Quando avaliadas pela norma DNIT-ES 112 (DNIT, 2009), apenas as misturas asfalto-borracha AB-TB e AB-CB apresentaram valores dentro dos parâmetros avaliados, ficando a mistura agregado-borracha AB-SECO com valor inferior ao mínimo estabelecido.

3.1.3 VAZIOS AGREGADO MINERAL

A norma DNIT 031 (DNIT, 2006) estabelece como parâmetro mínimo de VAM o valor de 15%, para as misturas que apresentam como tamanho nominal do agregado passante na peneira 3/4" o valor de 19,1 mm. Para a norma DNIT-ES 112 (2009), o VAM varia em função do tamanho nominal do agregado passante na peneira 3/4", que deve ser de 19 mm, quanto para o volume de vazios da mistura avaliada, de acordo com os gráficos da Figura 10.

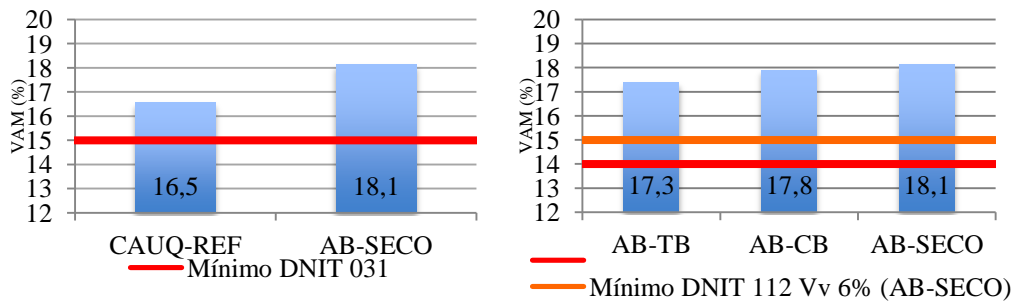


Figura 10: Valores dos vazios do agregado mineral

3.1.4 ESTABILIDADE

Quanto à estabilidade, a norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006) estabelece como parâmetro mínimo o valor de 500 Kgf, enquanto a norma DNIT-ES 112 (2009) estabelece 800 Kgf como parâmetro mínimo de cada mistura. A mistura de referência CAUQ-REF apresentou valores acima do mínimo esperado por norma, demonstrando assim viabilidade quanto ao ensaio da estabilidade Marshall.

As misturas asfalto-borracha provenientes do processo úmido, AB-TB e AB-CB, apresentaram valores acima do mínimo exigido em norma, tornando-as viáveis quanto à estabilidade Marshall. Entretanto, a mistura agregado-borracha AB-SECO apresentou valor inferior ao mínimo exigido pelas duas normas avaliadas. A mistura AB-SECO apresentou diversas variações de valores quando comparadas às misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB, especialmente quanto às propriedades volumétricas, influenciando diretamente no resultado e tornando-a inviável quanto à estabilidade Marshall, conforme os gráficos da Figura 11.

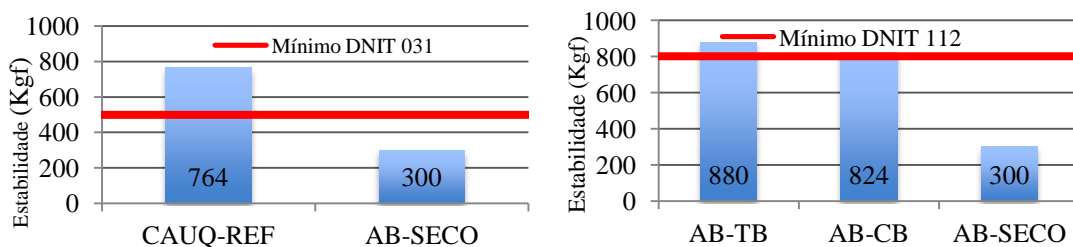


Figura 11: Valores da estabilidade Marshall

As misturas asfalto-borracha provenientes do processo úmido, AB-TB e AB-CB, apesar de viáveis quanto à estabilidade Marshall apresentaram

valores próximos ao mínimo exigido em norma, promovendo assim questionamentos sobre a avaliação do ensaio de estabilidade Marshall para misturas asfalto-borracha. Os trabalhos de Balaguer (2012), Specht (2004) e Fontes (2009), também apresentaram valores próximos do limite ou abaixo dele quando à estabilidade Marshall de misturas asfalto-borracha provenientes do processo úmido, independente do método adotado.

3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (RT)

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados de acordo com os critérios da norma DNIT-ME 136 (DNIT, 2010b), e os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros estabelecidos na norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006) para concretos asfálticos, e norma DNIT-ES 112 (DNIT, 2009) para asfaltos-borracha do processo úmido pelo método terminal blend. A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores médios de RT, assim como o gráfico da Figura 12 denota as variações em função dos processos e métodos.

Tabela 8 – Valores médios da resistência à tração

MISTURA	VALORES MÉDIOS RT (MPa)
CAUQ-REF	1,08
AB-TB	0,95
AB-CB	0,93
AB-SECO	0,48

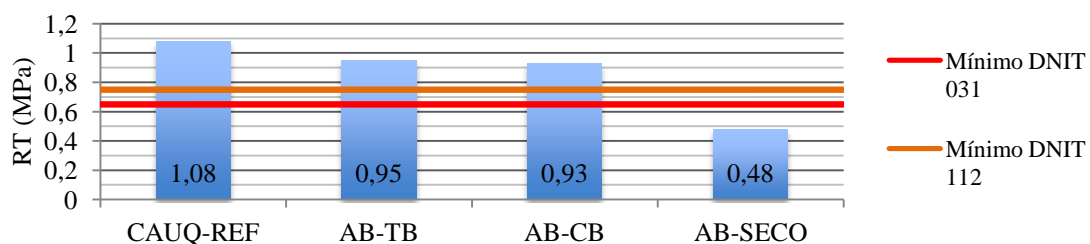


Figura 12: Análise gráfica dos valores médios de resistência à tração

A mistura asfáltica CAUQ-REF apresentou valor superior ao estabelecido na norma DNIT-ES 031 (DNIT, 2006), assim como as misturas AB-TB e AB-CB também apresentaram valores superiores ao estabelecido na norma DNIT-ES 112 (DNIT, 2009). Entretanto, a mistura AB-SECO apresentou valor inferior ao estabelecido nas duas normas mencionadas. Tal fato é

fundamentado nas variações físicas e mecânicas já detectadas nos ensaios anteriores.

3.3 MODULO DE RESILIÊNCIA

Os ensaios de módulo resiliente foram realizados conforme os critérios de execução definidos na norma DNIT-ME 135 (DNIT, 2010a), onde foram conhecidos os valores da força aplicada, deslocamento sofrido e módulo de resiliência para cada mistura, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo dos valores médios do ensaio de MR das misturas (Protocolo COPPE 10-15)

MISTURA	MR MÉDIO (MPa)	RT MÉDIO (MPa)	MR/RT (MPa)
CAUQ-REF	4603	1,08	4264
AB-TB	5298	0,95	5576
AB-CB	5057	0,93	5437
AB-SECO	1650	0,48	3437

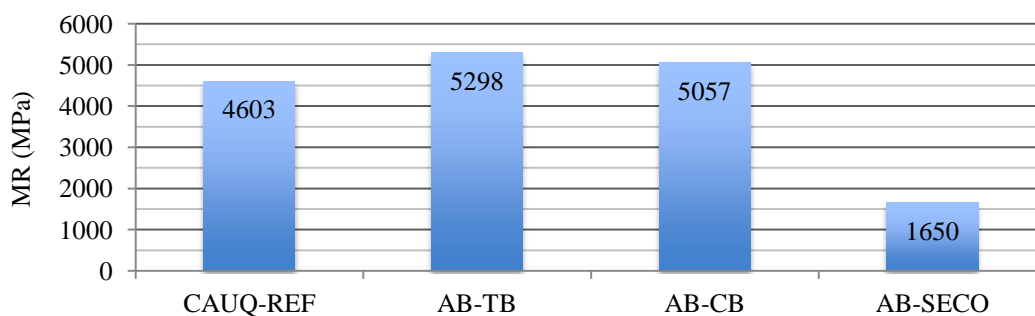


Figura 13: Valores médios do ensaio de módulo resiliente

As misturas AB-TB e AB-CB, cujo ligante foi modificado por borracha moída de pneus inservíveis, apresentaram maior MR do que a mistura CAUQ-REF, conforme apresentado no gráfico 13. A variação no MR das misturas AB-TB e AB-CB pode ser explicada pela metodologia de preparo. A primeira foi desenvolvida em uma distribuidora de produtos asfálticos, com grande aparato tecnológico e preciso controle de temperatura e agitação, enquanto a segunda foi desenvolvida em laboratório com controle de temperatura analógico e agitação manual.

A mistura agregado-borracha AB-SECO apresentou menor valor de MR do que a de referência CAUQ-REF, comprovando assim os resultados

insatisfatórios observados nos ensaios Marshall e RT, inviabilizando sua utilização em substituição da mistura convencional. A Tabela 10 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados para cada mistura.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos em valores médios

Mistura	Ligante	VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	Estabilid. (Kgf)	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
CAUQ-REF	CAP 50/70	3,94	76,22	16,55	764	1,08	4603	4264
AB-TB	ECOFLEX B	4,90	71,85	17,40	880	0,95	5298	5576
AB-CB	CAP 50/70 + M30	5,24	70,77	17,90	824	0,93	5057	5437
AB-SECO	CAP 50/70	6,59	63,75	18,12	300	0,48	1650	3437

4. CONCLUSÕES

O teor ótimo de ligante da mistura CAUQ-REF foi de 5,15% e aplicado nas demais, permitindo um comparativos dos resultados mecânicos com o mesmo teor. Entretanto, sabe-se que um teor ótimo para cada mistura seria fundamental, tendo em vista a utilização de diferentes ligantes nas misturas AB-TB e AB-CB e diferentes agregados na AB-SECO.

Tal fato denota as propriedades volumétricas das misturas AB-TB e AB-CB, que apresentaram VV no limite superior e acima dele. Dessa forma, acredita-se que a dosagem individual dessas misturas para obtenção do teor ótimo de ligante resultaria em valores de VV dentro do parâmetro, aumentando a estabilidade, resistência à tração e resiliência.

Contudo, os ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração apresentaram valores dentro dos parâmetros exigidos em norma para as misturas CAUQ-REF, AB-TB e AB-CB. A mistura AB-SECO apresentou valores abaixo da estabilidade e resistência à tração mínima exigida. Entretanto, o ensaio de RT, apesar de representar importante método de avaliação mecânica de misturas asfálticas, não simula de maneira dinâmica a realidade e o comportamento do revestimento quanto às repetidas ações do tráfego de veículos.

Dessa forma, o ensaio de MR demonstrou o quanto uma mistura asfalto-borracha pode ser resiliente e qual o comportamento dela sobre repetidas cargas. Uma vez que a mistura AB-TB apresentou resultados satisfatórios com valores de MR superiores à mistura de referência em mais de

10%. A mistura AB-CB também apresentou valores acima da mistura de referência, porém inferiores à AB-TB.

Outro fator importante foi a adição do fíler separadamente, após a mistura do ligante com os agregados na mistura AB-TB, levando a uma melhor distribuição do ligante nos agregados graúdos. Tal fato não foi realizado na mistura AB-CB, que apresentou maiores VV e uma textura mais seca do que a AB-TB.

O processo de execução continuous blend requer uma atenção especial, uma vez que o controle de temperatura do ligante asfáltico, o tempo de digestão da borracha e a agitação da mistura durante a digestão, são fatores essenciais para um nível de qualidade próximo do método terminal blend. O modo manual e rústico em que se desenvolveu a mistura AB-CB, ou seja, com controle de temperatura analógico e agitação manual, apesar de satisfatório para a comparação com a mistura CAUQ-REF, influenciou diretamente no resultado final do ligante modificado.

Com relação à mistura agregado-borracha AB-SECO, que apresentou parâmetros inviáveis em todos os ensaios, não houve a mesma interação do ligante com a borracha, vista nos outros dois processos. Apesar de misturados em alta temperatura, ainda é insuficiente para haver tal interação, bem como não há tempo de digestão. O resultado deste processo foi uma mistura com alto VV, próximos de um asfalto drenante, e baixos MR e RT.

Portanto, conclui-se que a relação ligante asfáltico e borracha, pelos processos TB e CB, desde que respeitadas todas as suas especificações, granulometrias e exigências, constituem uma mistura asfáltica alternativa e com viabilidade técnica para ser empregada em pavimentos usualmente revestidos com concretos asfálticos. Tal aplicação pode resultar ainda em pavimentos mais resistentes à deformação permanente e ao trincamento por fadiga, bem como menores espessuras de revestimento, tornando-os extremamente atrativos do ponto de vista técnico, econômico e sustentável.

Agradecimentos

Às empresas Top Engenharia, Greca Distribuidora de Produtos Asfálticos e Ecobalbo Reciclagem de Pneus pelo fornecimento dos materiais, e às instituições UEMA e COPPE/UFRJ pela disponibilização dos laboratórios.

BIBLIOGRAFIA

BALAGUER, Marcos. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em Asfalto- Borracha, elaborado pelo Processo de Produção Contínua em Usina.** 2012. 193f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

BERTOLLO, Sandra Aparecida Margarido. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com borracha Reciclada de Pneus.** 2002. 198f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

_____. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a política nacional de resíduos sólidos, altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República/Casa Civil/Subchefia para assuntos jurídicos, 2010.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº. 416/2009, de 30 de setembro de 2009.** Brasília: CONAMA, 2009.

CORDEIRO, William Rubbioli. **Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus.** 2006. 256f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

DIAS, Márcia Rodrigues. **Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo da via-seca:** Execução de um Trecho Experimental Urbano em Porto Alegre. 2005. 135f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para**

reabilitação de pavimentos. 2009. 545f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho/universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos relativos ao ano de 2010.** Brasília: IBAMA, 2011.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos relativos ao ano de 2011.** Brasília: IBAMA, 2012.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos relativos ao ano de 2012.** Brasília: IBAMA, 2013.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos relativos ao ano de 2013.** Brasília: IBAMA, 2014.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero.** 1999. 303f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Polímeros, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

ODA, Sandra; MATERIAL. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação.** 2000. 251f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000.

PILATI, Fernanda. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades.** 2008. 212f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.