

TALITA APARECIDA DE SOUZA SILVA

**USO DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU EM PAVIMENTO ASFÁLTICO
PELO PROCESSO DE MISTURA À FRIO.**

Guaratinguetá

2017

TALITA APARECIDA DE SOUZA SILVA

**USO DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU EM PAVIMENTO ASFALTICO
PELO PROCESSO DE MISTURA À FRIO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

Guaratinguetá

2017

S586u

Silva, Talita Aparecida de Souza

Uso do resíduo de borracha de pneu em pavimento asfáltico pelo processo de mistura à frio / Talita Aparecida de Souza Silva – Guaratinguetá, 2017.

62 f. : il.

Bibliografia : f. 60-62

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. José Bento Ferreira

1. Pavimentos de asfalto. 2. Pneus - reaproveitamento. 3. Borracha.

I. Título

CDU 625.85

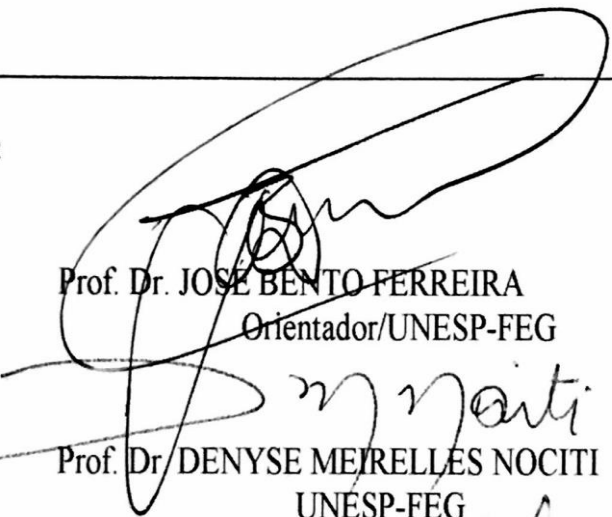
TALITA APARECIDA DE SOUZA SILVA

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

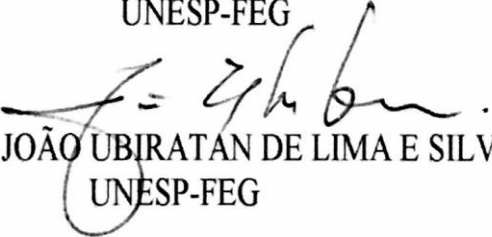
Prof. Dr. ENOS ARNEIRO NOGUEIRA DA SILVA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ BENTO FERREIRA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. DENYSE MEIRELLES NOCITI
UNESP-FEG



Prof. Dr. JOÃO UBIRATAN DE LIMA E SILVA
UNESP-FEG

Março de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me concedeu a oportunidade e os meios para alcançar meus objetivos, e a Nossa Senhora Aparecida à qual sou devota, por ser minha ouvinte nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

Ao meu marido *Bruno*, pelo companheirismo, amizade e paciência. Essa conquista só foi possível graças ao seu apoio.

Agradeço profundamente aos meus pais *José e Edna* por me apoiarem nos momentos difíceis, por me ajudarem a sustentar esse sonho, pela confiança e por lutarem junto comigo, exemplos para mim. Essa conquista também é deles.

Às minhas irmãs *Tamires e Thaís Victória*, pela paciência, irmandade e apoio. Graças a vocês eu consegui estudar e me dedicar o necessário.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Bento Ferreira*, pela amizade, orientação e auxílio durante minha graduação e na realização deste trabalho.

Ao meu amigo e técnico do departamento *Flavio Bernardes* pelo auxílio e amizade na elaboração desse projeto.

À amizade adquirida com o técnico *Jurandir* do departamento de Engenharia de Transportes da UNITAU – Universidade de Taubaté, que com paciência e empenho muito me ajudou nas etapas práticas desse trabalho.

A todos os meus amigos da *FEG* que estiveram ao meu lado durante a minha graduação. Pela amizade, companheirismo e alegria, aos quais considero como minha segunda família.

Meus agradecimentos a todos e todas que de forma direta ou indireta me ajudaram e acompanharam nesta caminhada.

SILVA, T.A DE S. **Uso do resíduo de borracha de pneu em pavimento asfáltico pelo processo de mistura à frio**. 2017. 55f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Este trabalho discorre sobre a possibilidade de uso de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos como agregado de pequeno diâmetro, com o objetivo de promover o fechamento da mistura, possibilitando a execução de um revestimento monocamada de comportamento flexível e estável. Aborda também a questão de diminuição do custo na execução dos pavimentos bem como a diminuição da capacidade da água de se infiltrar na sua estrutura. De forma simplificada é apresentada uma questão ambiental envolvida por trás do tema, na qual utiliza-se os pneus velhos, sem devido descarte no ambiente, para melhorar as condições de tráfego nas rodovias e estradas. Na sua parte experimental, o trabalho propõe uma série de ensaios exploratórios para se avaliar as características do resíduo de borracha nas misturas asfálticas à frio e seu comportamento quando associado a emulsões de forma diversa ao que se encontra atualmente na literatura.

PALAVRAS-CHAVES: Borracha de pneu. Misturas a frio. Diminuição da permeabilidade. Comportamento flexível e estável.

SILVA, T.A DE S. **Use tire rubber residue asphalt pavement by the cold mixing process.**
55f. GraduateWork (Graduate in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

This work discusses about the possibility of rubber tire residues in asphalt pavements as small diameter aggregate, with the objective of promoting the closure of the mixture, allowing the execution of a monolayer coating of flexible and stable behavior. It also addresses the issue of cost reduction in the execution of pavements as well as the reduction of water capacity to infiltrate its structure. In a simplified way, an environmental issue is presented behind the theme, in which old tires are used, without being discarded in the environment, to improve traffic conditions on highways and roads. In the experimental part, the work proposes a series of exploratory tests to evaluate the characteristics of the rubber residue in cold asphalt mixtures and their behavior when associated with emulsions in a way different from what is currently in the literature.

KEYWORDS: Tire rubber. Cold mix. Decreased permeability. Flexible behavior and stable.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. A EMULSÃO EM CONTATO COM O AGREGADO.	15
FIGURA 2. ATRAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ASFALTO E ADSORÇÃO DO AGENTE EMULSIFICANTE LIVRE.....	16
FIGURA 3. FORMAÇÃO DO FILME DE LIGANTE ASFÁLTICO SOBRE O AGREGADO.....	16
FIGURA 4. TRINCA NA ESTRUTURA NO PAVIMENTO SELADA COM <i>BAND-AID</i>	22
FIGURA 5. CARACTERÍSTICAS DO CAP 30/45.	27
FIGURA 6 E 7. PESAGEM, DA BORRACHA PARA ENSAIO E MASSA RETIDA NA PENEIRA 3/8".	29
FIGURA 8 E 9. CONJUNTO DE PENEIRAS E MASSA RETIDA NA PENEIRA 4.	30
FIGURA 10 E 11. MASSA RETIDA NAS PENEIRAS 35 E 9.	30
FIGURA 12 E 13. MASSA RETIDA NAS PENEIRAS 80 E 200.	30
FIGURA 14. PESAGEM E PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA MISTURA.....	31
FIGURA 15. PREPARAÇÃO DA MISTURA À 135°C.	32
FIGURA 16. MOLDAGEM E EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.	32
FIGURA 17. CORPOS DE PROVA EM ORDEM DE ADIÇÃO DE BORRACHA.....	33
FIGURA 18. PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA NA BALANÇA E IMERSOS.....	33
FIGURA 19. CORPO DE PROVA EM BANHO-MARIA A 60°C E ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA.	34
FIGURA 20. CORPOS DE PROVA APÓS O ENSAIO DE ESTABILIDADE (ROMPIDOS).	34
FIGURA 21. VALORES EXPRESSOS PELA NORMA PARA RESULTADOS DO ENSAIO DE ESTABILIDADE.	37
FIGURA 22. DIFERENÇA DE VAZIOS NOS CORPOS DE PROVA FAIXA A.....	38
FIGURA 23. CARACTERÍSTICAS DA EMULSÃO ASFÁLTICA DE CURA MÉDIA – CM 30.....	42
FIGURA 24. PESAGEM DOS COMPONENTES DA MISTURA.	53
FIGURA 25. MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.	54
FIGURA 26. MISTURA DOS AGREGADOS COM LIGANTE E COM BORRACHA.	54
FIGURA 27. MISTURA DOS AGREGADOS COM LIGANTE SEM BORRACHA.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO.	13
TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DAS EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO.	14
TABELA 2. FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E CARACTERÍSTICAS DE DOSAGEM RECOMENDADAS PELO DNIT PARA PRÉ-MISTURADO A FRIO (DNER – ES 317/97).	20
TABELA 3. CONDIÇÕES PARA A MISTURA A FRIO.	21
TABELA 4. APLICAÇÃO DA TAXA DE USO DE BORRACHA.	23
TABELA 5. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS.	26
TABELA 6. GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS UTILIZADOS.	27
TABELA 7. COMPORTAMENTO DA BORRACHA.	28
TABELA 8. GRANULOMETRIA DA BORRACHA.	29
TABELA 9. DADOS DOS CORPOS DE PROVA.	35
TABELA 10. DADOS DO ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA.	35
TABELA 11. RESULTADOS DO ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA.	35
TABELA 12. RESULTADOS DO ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA.	36
TABELA 13. TABELA PARA CORREÇÃO DA ESTABILIDADE.	37
TABELA 14. GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS UTILIZADOS.	39
TABELA 15. GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS.	41
TABELA 16. GRANULOMETRIA DOS RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU.	43
TABELA 17. VALORES RESULTANTES DO CÁLCULO DE P.	44
TABELA 18. PORCENTAGEM DE CADA MATERIAL QUE COMPORÁ A MISTURA.	47
TABELA 19. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA CURVA PADRÃO DE $N = 0,4$	47
TABELA 20. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA CURVA PADRÃO DE $N = 0,5$	47
TABELA 21. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA CURVA PADRÃO DE $N = 0,6$	48
TABELA 22. AGREGADA AREIA PENEIRADO.	49
TABELA 23. AREIA PENEIRADO.	49
TABELA 24. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA A CURVA PADRÃO DE $N = 0,4$ COM A AREIA PENEIRADA.	49
TABELA 25. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA A CURVA PADRÃO DE $N = 0,5$ COM A AREIA PENEIRADA.	49
TABELA 26. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA A CURVA PADRÃO DE $N = 0,6$ COM A AREIA PENEIRADA.	50
TABELA 27. PORCENTAGEM RELATIVA DE CADA MATERIAL QUE COMPORÁ A MISTURA.	50
TABELA 28. VALORES PARA O CÁLCULO DO TEOR DE LIGANTE PELO MÉTODO DE DURIEZ.	51
TABELA 29. COMPOSIÇÃO EM % DA MISTURA.	52
TABELA 30. COMPOSIÇÃO DA MISTURA EM MASSA.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 EMULSÕES ASFÁLTICAS	12
2.1.1. Classificação das emulsões asfálticas	13
2.2. EMULSÃO ASFÁLTICA ANIÔNICA	17
2.3 PRÉ- MISTURADO A FRIO	17
2.4 AGREGADOS	19
2.4.1 Agregado miúdo	19
2.4.2 Agregado graúdo	19
2.4.3 Material de enchimento	20
2.4.4 Composição química	20
2.5 RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU	21
3 OBJETIVO	24
4 METODOLOGIA	25
5 PESQUISA PRELIMINAR	26
5.1 METODOLOGIA DA PESQUISA	26
5.2 MATERIAIS	26
5.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo	26
5.2.2 Agregados	27
5.3 CORPOS DE PROVA	31
5.4 RESULTADOS	35
5.5 ANÁLISE	38
6 DESENVOLVIMENTO – PREPARAÇÃO DA MISTURA	39
6.1 AGREGADOS	39
6.1.2 Emulsão Asfáltica	42
6.1.3 Borracha	42
6.2 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	43
6.2.1 Método de Rothfuchs	44
6.2.2 Desenvolvimento dos Cálculos	47
6.2.3 Preparação e Execução dos Corpos de Prova	52
7 RESULTADOS	56
8 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos da humanidade no último século são incontestáveis. O ser humano ultrapassou barreiras propostas por si mesmo, e tornou real a informática, genética e a industrialização, dando um enorme salto para o desenvolvimento (CLERMAN, 2004).

Ainda de acordo com Clerman (2004) todo esse desenvolvimento não trouxe apenas melhorias a qualidade de vida, mas também consequência trágicas ao meio ambiente. A partir disso, a ideia de ecologia e mais ainda, conscientização ecológica, se tornou cada vez mais forte, fazendo com que hoje exista uma grande quantidade de organizações com foco total nos problemas ambientais.

Com toda essa industrialização, a quantidade de veículos ocupando as grandes cidades e centros urbanos aumentou desproporcionalmente, levando em um número exorbitante de pneus sem devido descarte. Por comporem um material volumoso, com alto tempo de vida útil e com condições apropriadas para a proliferação de doenças, os pneus acabam se tornando um problema de difícil solução e por serem de baixíssima compressibilidade e degradação, a disposição em aterros sanitários se torna inviável (BERTOLLO, 2004).

Na falta de informação sobre o descarte correto e de legislação para controle da destinação adequada, grande parte do descarte das carcaças de pneus tem sido imprudente e irregular, na qual a população tende a abandoná-los nos cursos de água, beiras de estradas ou terrenos desocupados, agravando ainda mais este problema. O que essa população não sabe é que, em algum momento essa ação acarretará danos a sua própria saúde, a saúde da sociedade geral e do meio ambiente, meio este em que todos vivemos (VILLAYERDE, et. al, 2000).

Segundo a ANIP – Associação Brasileira da Indústria de Pneumáticos, a produção brasileira de pneus no ano de 2015 foi de mais de 68 milhões de unidade, vindo de um crescimento permanente de produção desde o ano de 2010. Os principais canais de venda foram a indústria de reposição (63,5%), montadoras (19,7 %) e o mercado externo (16,9%), e estes valores praticamente não se alteraram de 2014 para 2015.

Conhecendo o problema de descarte de pneus, em 2007 a ANIP criou o programa Reciclanip, que é uma entidade sem fins lucrativos compostas pelos fabricantes de pneus Bridgestone, Continental, Goodyear, Michelin e Pirelli, com o intuito de coletar e dar destino correto aos pneus inservíveis. As atividades atendem a resolução 416/09 do CONAM, que regulamenta a destinação desses materiais. Até a data de edição desse texto, a quantidade coletada em kg era de mais de 3,7 milhões.

O processo de regeneração de pneu é composto pela separação da borracha, na qual ela é separada dos outros componentes e separação da malha de aço e do nylon, que são recuperados como sucata qualificada. O pneu passa por um processo de vulcanização, sendo reduzido a pó, não sendo possível sua utilização como substituto da borracha crua, ou seja, a borracha vulcanizada é um produto de difícil ligação ou combinação com outras substâncias (CLERMAN, 2004).

Nos EUA, na década de 80, os pneus mal descartados causaram grande incêndios poluindo o ar, água e solo. Observando o problema em questão, passou-se a investir em pesquisas com a finalidade de reutilização desses pneus em obras de engenharia. Em 1991 foi criada a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície obrigando departamentos de transportes e agências de proteção ao meio ambiente trabalharem em conjunto e desenvolverem estudos mais aprofundados sobre a utilização de resíduos de pneus em pavimentos asfálticos. Dessa forma, desde 1997 os Estados Unidos têm mais de 25% de suas estradas compostas por pavimentos com adição de borracha de pneu (ODA, 2002).

A grande maioria dos estudos enfatizam a linha de pesquisa do concreto asfáltico usinado à quente (CBUQ) com ligante asfáltico modificado por borracha (MORRILLA E DANTAS, 2002). Porém, o fato de ser o mecanismo mais estudado não significa que seja a única e mais vantajosa das opções (BERTOLLO, 2004).

Compreendendo e apoderando-se desse gancho deixado pelas pesquisas, várias potências mundiais investiram em estudos com emulsão asfáltica ao invés de CBUQ. A emulsão asfáltica aparece como resposta para duas importantes questões ambientais: a preservação atmosférica (sem emissão de hidrocarboneto) e conservação energética (tem-se economia de energia, pois a maioria das emulsões asfálticas podem ser utilizadas sem o uso de calor) (CLERMAN, 2004).

Ainda segundo Clerman (2004), na França muitos anos atrás, desenvolveu-se consideravelmente os revestimentos a frio para vias de baixo a médio fluxo. Se evidencia o uso desse tipo como camada de rolamento, por oferecer segurança e durabilidade (devido a macrotextura e a impermeabilização).

Dessa forma, a quantidade de organizações que estão substituindo o asfalto à quente por emulsão asfáltica só vem aumentando, desmistificando conceitos de que a mistura à frio não possa se igualar às misturas à quente (SANTANA, 1993).

Um dos principais fatores que controla o desempenho do pavimento, é a capacidade do revestimento de impedir que a água penetre no interior do sistema. O efeito deletério da água, com relação a camada de revestimento, está relacionado a perda de adesão entre o ligante

asfáltico e os agregados (falha adesiva) e a perda de coesão dentro do próprio filme de ligante asfáltico (falha coesiva).

Com relação aos efeitos da água no corpo do pavimento, durante o tempo em que ela esta livre contida em sua estrutura, as cargas de roda produzem dano muito superior em relação ao período em que a estrutura se encontra seca. Apesar disso, é comum a ideia de que uma estrutura de pavimento robusta, com materiais estabilizados pouco suscetíveis aos efeitos da umidade excessiva, é suficiente para absorver os impactos gerados pela passagem dos veículos, desconsiderando a sinergia entre as cargas hidráulicas e as decorrentes do tráfego.

Contudo, sabe-se que os mais sérios danos causados ao pavimento se devem às poropressões e à movimentação da água livre no interior de sua estrutura. A água livre presente na base do pavimento pode servir de fonte para saturação indesejada das camadas subjacentes se estas forem constituídas de materiais de baixa permeabilidade e, principalmente, se apresentarem as saídas laterais bloqueadas. A diminuição da capacidade de suporte do subleito pela saturação e pela presença de vazios sob a placa pode levar à ruína precoce do pavimento, causada pelo trincamento por fadiga do concreto de cimento Portland ou do concreto asfáltico.

Neste sentido, o presente trabalho procurou analisar o efeito da adição do resíduo de borracha de pneus tendo como base uma pesquisa desenvolvida dentro do programa BAAE – Bolsa de Apoio Acadêmico e Extensão I, destinado aos alunos de graduação da UNESP no ano de 2015, no qual foram estudadas misturas asfálticas à quente com adição de resíduos de borracha de pneu.

Considerando os resultados obtidos, sugere-se uma substituição de uma parte dos vazios por material flexível, de forma a permitir a execução de um revestimento monocamada, que apresente comportamento flexível e estável, sem apresentar permeabilidade e rugosidade excessivas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMULSÕES ASFÁLTICAS

Emulsão asfáltica pode ser definida como sendo a uma dispersão estável de um líquido no outro, contando de uma fase hidrocarbonada e uma outra aquosa, ambas não miscíveis (BRASQUIMICA). Também pode ser definida como sendo pequenas partículas ou glóbulos de CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo, suspensas em água contendo agente emulsificante (BETUNEL,2017), ou uma mistura homogênea de dois líquidos não miscíveis, mas que quando mantidos em suspensão por agitação, formam uma mistura estável (dispersão coloidal) (PETROBRÁS,2017).

A quantidade de emulsificante varia entre 0,2% a 2,0%, na fase aquosa e a de asfalto fica na ordem de 58% a 70%. No moinho coloidal, o asfalto é dispersado em glóbulos da ordem de 1 a 10 micras, envolvidas por uma fina película de agente emulsificante, impedindo a união das moléculas de asfalto, tornando a emulsão estável (BRASQUIMICA,2017).

Para se constatar rapidamente as boas condições do produto, faz-se uma inspeção visual referente a cor da emulsão. Se a mesma estiver na coloração marrom, antes da ruptura, é de boa qualidade. Após a ruptura, a cor preta do CAP prevalece (PETROBRÁS,2017).

As emulsões asfálticas podem ser classificadas quanto ao tempo de ruptura e tipo de carga da partícula. Quanto ao tempo de ruptura derivam-se em catiônicas e aniônicas e, quanto ao tipo de carga tem-se a rápida, média, lenta e controlada ou instantânea. (PETROBRAS,2017).

O antecessor das emulsões asfálticas são os asfaltos diluídos, que utilizam aquecimento moderado ou eliminam a necessidade de aquecimento do cimento asfáltico de petróleo (CAP) (BERTOLLO, 2004). Segundo o DNER (1996), em asfaltos diluídos, o solvente usado para a obtenção da mistura coloidal evapora, causando danos ao meio ambiente, por isso se começou a controlar e restringir seu uso.

As emulsões têm algumas vantagens sobre o asfalto diluído, além da anteriormente citada. Entre elas ressaltam-se o menor teor de solvente (podendo ser nulo), a possibilidade de serem usados em agregados umedecidos, ausência de problemas de incêndio e explosões e etc. Porém, seu uso como ligante traz alguns obstáculos, decorrentes do processo de perda de água que a compõe (SILVA Jr E SÓRIA, 2000).

2.1.1. Classificação das emulsões asfálticas

O DNIT – 165/2013 – Emulsões asfálticas para pavimentação, classifica as emulsões com os seguintes códigos:

- a) RR, RM, RC e RL: ruptura rápida, ruptura média, ruptura controlada e ruptura lenta, respectivamente;
- b) EAI: emulsão asfáltica para o serviço de imprimação;
- c) LA e LAN: emulsões asfálticas de ruptura lenta catiônica e de carga neutra, respectivamente, para o serviço de lama asfáltica;
- d) LARC: emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada, para o serviço de lama asfáltica.

O índice RR informa que a ruptura é do tipo rápida, ou seja, rompe no momento ou logo após entrar em contato com o agregado. A emulsão com símbolo RM é de ruptura média, o que significa que seu tempo de exposição é maior. Já a emulsão com símbolo RL é do tipo lenta, significando que sua ruptura leva mais tempo que as demais, tendo a possibilidade de ser misturada em material mais fino, como por exemplo o pó de pedra (DNIT, 2013).

No geral, as emulsões devem atender as seguintes características:

Tabela 1. Características das emulsões asfálticas para pavimentação.

Características	Unidade	Limite			
		Rupturas			
		Rápida		Média	
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C
Ensaio para a emulsão					
Viscosidade Saybolt - Furol a 25° C, máx	S	90	-	-	-
Viscosidade Saybolt - Furol a 50° C	S	-	100 A 400	20 A 200	100 A 400
Sedimentação, máx	%m/m	5	5	5	5
Peneiração (0.84mm), máx	%m/m	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, mín (1)	%	80	80	80	80
Adesividade em agregado miúdo, mín	%	-	-	-	-
Carga da partícula	-	positiva	positiva	positiva	positiva
pH, máx	-	-	-	-	-
Destilação					
Solvente destilado	%v/v	-	-	0 a 12	0 a 12
Resíduo seco, mín	% m/m	62	67	62	65

(continuação)

Desemulsibilidade					
Min	% m/m	50	50	-	-
Máx		-	-	50	50
Mistura com filer silício	%	-	-	-	-
Mistura com cimento	%	-	-	-	-
Ensaio para resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896:2012					
Penetração a 25° C (100g e 5s)	mm	4,0 a 15,0	4,0 a 15,1	4,0 a 15,2	4,0 a 15,3
Teor de betume, mín	%	97	97	97	97
Ductilidade a 25° C, mín	cm	40	40	40	40

Fonte: (DNIT – 165/2013).

Tabela 1. Características das emulsões asfálticas para pavimentação.

Características	Unidade	Limite				
		Rupturas				
		Controlada				
		Lenta				
		RL-1C	LA-2C	LAN	EAI	LARC
Ensaio para a emulsão						
Viscosidade Saybolt - Furol a 25° C, máx	S	90	90	90	90	90
Viscosidade Saybolt - Furol a 50° C	S	-	-	-	-	-
Sedimentação, máx	%m/m	5	5	5	10	5
Peneiração (0.84mm), máx	%m/m	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, mín (1)	%	-	-	-	-	-
Adesividade em agregado miúdo, mín	%	-	-	-	-	75
Carga da partícula	-	positiva	positiva	positiva	-	positiva
pH, máx	-	6,5	-	6,5	8	6,5
Destilação						
Solvente destilado	%v/v	-	-	0	0 a 15	-
Resíduo seco, mín	% m/m	60	60	60	45	60
Desemulsibilidade						
Min	% m/m	-	-	-	-	-
Máx		-	-	-	-	-
Mistura com filer silício	%	máx 2,0	1,2 a 2,0	-	-	mín 2,0
Mistura com cimento	%	máx 2,1	1,2 a 2,1	-	-	mín 2,1

(continuação)

Ensaio para resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896:2012						
Penetração a 25° C (100g e 5s)	mm	4,0 a 15,4	4,0 a 15,5	4,0 a 15,6	.	4,0 a 15,0
Teor de betume, mín	%	97	97	97	97	97
Ductilidade a 25° C, mín	cm	40	40	40	40	40

Fonte: (DNIT – 165/2013).

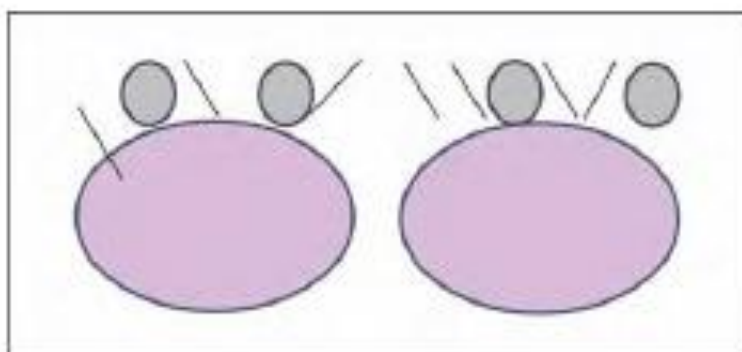
Observação: Senão houver ensaio de amostra ou informação da natureza do agregado pelo executante final, o distribuidor/fornecedor deve indicar a natureza do agregado usado no Certificado de Qualidade.

As emulsões são basicamente classificadas em função do tempo de ruptura, do teor de asfalto e da carga iônica. Quando a emulsão entra em contato com o agregado, ocorre a ruptura. A velocidade que está separação ocorre, e por consequência a sua classificação, depende (ABEDA, 2001):

- Do tipo de emulsão;
- Da reatividade em contato com a superfície específica dos agregados;
- Do teor de umidade;
- Da temperatura dos materiais; e,
- Do ambiente.

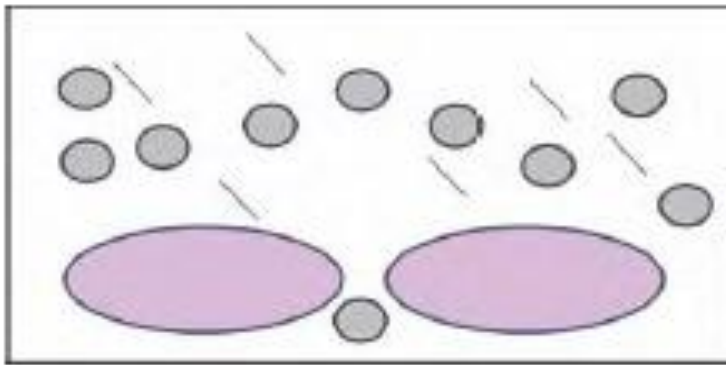
As figuras 1, 2 e 3 abaixo apresentadas, esquematizam o efeito da ruptura da emulsão catiônica.

Figura 1. A emulsão em contato com o agregado.



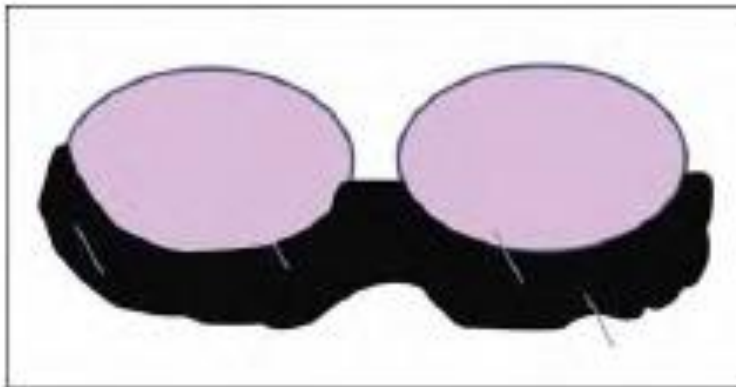
Fonte: (ADEBA, 2001).

Figura 2. Atração das partículas de asfalto e adsorção do agente emulsificante livre.



Fonte: (ADEBA, 2001).

Figura 3. Formação do filme de ligante asfáltico sobre o agregado.



Fonte: (ADEBA, 2001).

Segundo Santana (1993) no Brasil é utilizado na grande maioria das vezes os emulsificantes catiônicos. Isso acontece por diferentes motivos, mas sobretudo porque aqui há a prevalência de agregados eletronegativos (quartzito, areias, quartzosas, granito, gnaiss, arenito e etc.), como também pelo fato destas apresentarem boa adesividade com agregados eletropositivos (basalto, calcário, diabásio e etc.). O outro tipo de emulsão, denominada aniônica, apresentam boa resistência aos agregados que se ionizam positivamente quando umedecidos além da boa adesividade. Contudo apenas 1% da utilização mundial se deve a ela, o restante todo se utiliza emulsão catiônica (ADEBA, 2001).

Para conseguir utilizar as emulsões na área de transportes, é necessário que elas permaneçam suficientemente fluidas para possibilitar sua aplicação. Através da neutralização das cargas e/ou pela evaporação da água, a fase asfáltica deve se separar da fase aquosa, deixando que o asfalto desempenhe sua função de cimentar e impermeabilizar o pavimento (CLERMAN, 2004).

2.2. EMULSÃO ASFÁLTICA ANIÔNICA

A emulsão asfáltica aniônica é fabricada à base de betume asfáltico, que é emulsificado na presença de material coloidal inerte, anexado por processo especial, onde os agentes emulsificantes têm a propriedade de concentrar-se na superfície da partícula de asfalto. Consequentemente, em torno dessas gotículas é formada uma camada denominada “película interfacial”, derivada da concentração de muitas moléculas do agente emulsificante. Como todas as gotículas de asfalto carregadas negativamente são envolvidas por íons de álcalis metálicos positivamente carregados, elas passam a se repelir mutuamente, deixando a emulsão estável (TEXSA, 2012).

2.3 PRÉ- MISTURADO A FRIO

Pré-misturado a frio é a mistura executada à temperatura ambiente, em usina apropriada, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (filler) e emulsão asfáltica, espalhada e comprimida a frio (DNER - ES 317, 1997).

Os pré-misturados a frio consistem na mistura de emulsão asfáltica com misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento à temperatura ambiente. Conforme a necessidade, essas misturas podem ser realizadas em usinas de solo ou de brita graduada, usina de concreto asfáltico sem sistema de aquecimento do agregado ativo entre outras. Para operações de manutenção de pavimentos em uso, pode-se lançar mão de betoneiras comuns de eixo horizontal (IBP, 1999).

O pré-misturado a frio – PMF, pode ser empregado como revestimento de ruas e estradas com baixo volume de tráfego, base, reforço de pavimento, ou ainda como camada intermediária (com CA superposto), e em operações de conservação e manutenção, podendo ser (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA, 2006)

- Denso: graduação contínua e bem-graduado, com baixo volume de vazios;
- Aberto: graduação aberta, com elevado volume de vazios.

Os aspectos funcional, estrutural e hidráulico do PMF variam de acordo com o volume de vazios, e é função da granulometria escolhida (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA, 2006). O método adequado de preparação e teste dos PMFs consiste na observância de alguns fatores, que são eles: cobrimento do agregado, trabalhabilidade da mistura e o teor de umidade retido nas amostras antes e depois da compactação (CALDATO, 2008)

Segundo Santana (1993) os PMFs são classificados em três classes quanto ao volume de vazios (V_v), da seguinte forma:

- Aberto (PMFA): com pequena ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, com pouco ou nenhum *filler*, ficando após a compactação, com volume de vazios elevado, $22 < V_v \leq 34\%$;
- Semidenso: com quantidade intermediária de agregado miúdo e pouco *filler*, ficando após a compactação com volume de vazios intermediário, $15 < V_v \leq 22\%$;
- Denso (PMFD): com agregados graúdos, miúdos e de enchimento, ficando após a compactação com volume de vazios relativamente baixo, $9 < V_v \leq 15\%$.

No quesito permeabilidade, divide-se:

- Vazios $\leq 12\%$: baixa permeabilidade. Pode ser usado para revestimento;
- Vazios $> 12\%$: alta permeabilidade. Necessita de capa selante caso seja usado como única camada de revestimento;
- Vazios $> 20\%$: pode ser usado como camada drenante.

Ainda de acordo com Santana (1993), dois fatores são os responsáveis pelos valores mais altos do volume de vazios: devido a evaporação da água e do solvente, as misturas à frio possuem mais vazios que as misturas à quente e com o início do tráfego, haverá maior diminuição do V_v nas misturas a frio.

Uma característica que favorece o PMF é o tempo de armazenamento, em geral de até 30 dias, desde que devidamente estocado, sendo este superior o tempo do PMF denso. Devido a essa característica, a programação do serviço ganha flexibilidade, onde se pode dar prioridade a fase de produção da massa asfáltica e posteriormente pensar na sua aplicação. Outra importante vantagem é a rápida liberação da camada executada para o tráfego. A produção do PMF denso se deve ao uso de emulsão asfáltica de ruptura lenta (ABEDA, 2001).

Dependendo do tipo de serviço e granulometria da mistura, os PMFs podem ser usados com camadas de 30 a 70 mm de espessura compactada (espessuras maiores devem ser compactadas em duas camadas), que devem ser espalhadas e compactadas a temperatura ambiente. Os mecanismos para o espalhamento podem ser a motoniveladora (mais conveniente para ruas urbanas de tráfego baixo) ou vibroacabadora.

É recomendável que o teor de emulsão pertença aos seguintes intervalos (WALLER Jr, 1980)

- De 5 a 10 % para misturas densas; e,
- De 5 a 8 % para misturas abertas.

A norma DNER-ME 107 (1994) recomenda que antes da mistura com a emulsão, os agregados devem ser umedecidos chamado umidade de molhagem, pois esse acréscimo na quantidade de água auxilia na obtenção de um bom envolvimento do agregado e impede o descobrimento dos finos (SANTANA, 1993). Além disso, a água usada na molhagem do agregado tem efeito considerável na trabalhabilidade dessas misturas (SILVA JUNIOR e SÓRIA, 2000).

Existe a possibilidade de modificar algumas propriedades do PMF com adição de polímeros à emulsão asfáltica. A especificação de serviço que rege essa aplicação é o DNER-ES 390/99, e apresenta que nessas condições existe alteração no volume de vazios de 5 a 25%, estabilidade mínima de 25kN compactando os corpos-de-prova Marshall com 75 golpes por face, mantendo-se as mesmas faixas granulométricas (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA, 2006).

2.4 AGREGADOS

2.4.1 Agregado miúdo

Segundo o DNER-ME 054 (1997) o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou a mistura de ambos. As suas partículas individuais devem ser resistentes, com moderada angulosidade, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas e apresentar o equivalente de areia igual ou superior a 55 %.

2.4.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo pode ser pedra britada, seixo rolado, britado ou não, devendo ser constituído por fragmentos sãos, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas (DNER-ES 317, 1997) e devem apresentar as seguintes características:

- a) Segundo as normas DNER-ME 059 (1994), mantendo a adoção pelo processo de referência da norma ABNT NBR 6300 (2001), a adesividade deve ser superior a 90 %.
- b) Segundo a norma DNER-ME 083 (1994), a granulometria dos agregados deve obedecer às faixas especificadas na figura 22;
- c) Segundo a norma DNER-ME 086 (1994), o índice de forma deve ser superior a 0,5 %;
- d) Segundo a norma DNER-ME 089 (1994), a durabilidade dos agregados deve apresentar perda inferior a 12 %; e,

e) Segundo a norma DNER-ME 035 (1998), o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 40 %, admitindo agregados com valores maiores, no caso de emprego anterior terem apresentado desempenho satisfatório;

2.4.3 Material de enchimento

Deve ser constituído por materiais finamente divididos, não plásticos, seco e isento de grumos, tais como: cimento Portland, cal extinta, pó calcário, cinza volante etc., de acordo com a norma DNER-EM 367.

2.4.4 Composição química

A composição do PMF deve satisfazer aos requisitos, com as respectivas tolerâncias, no que diz respeito à granulometria e aos percentuais de ligante betuminoso, conforme a tabela 2. Tabela 2. Faixas granulométricas e características de dosagem recomendadas pelo DNIT para pré-misturado a frio (DNER – ES 317/97).

Peneiras		Faixas				
		Porcentagem em massa, passando				
ABNT	Abertura (mm)	A	B	C	D	Tolerância
1"	25,4	100	-	100	-	± 7,0%
3/4"	19	75-100	100	95-100	100	± 7,0%
1/2"	12,5	-	75-100	-	95-100	± 7,0%
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	± 7,0%
N° 4	4,8	10,0-35	15-40	20-40	25-45	± 5,0%
N°10	2	5,0-20	10,0-25	10,0-25	15-30	± 5,0%
N° 200	0,075	0,0-5	0,0-5	0,0-8	0,0-8	± 2,0%
Teor de asfalto, % sobre o total da mistura		4,0 - 6,0				± 0,3%
Volume de vazios, %		5,0 - 30,0				
Estabilidade, kN, mín		25 (compactação de 75 golpes por face) 15(compactação de 50 golpes por face)				
Fluência, mm		2,0-4,5				

Fonte: (PAVIMENTAÇÃO ASFALTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS, 2008).

A mesma norma informa que o Método Marshall modificado deverá ser usado para verificar as condições de vazios, estabilidade e fluência, observando os valores apresentados na tabela 1. Esse método assegura a obtenção da proporção volumétrica adequada dos constituintes da mistura para um pavimento durável. Desse ensaio se obtém estabilidade e fluência Marshall.

Se define estabilidade Marshall como sendo a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo-de-prova, expressa em Kgf. Fluência Marshall é definida como sendo a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação de carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros.

Tabela 3. Condições para a mistura a frio.

Porcentagem de vazios (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência
5 a 30	250 (75 golpes)	2,0 - 4,5

Fonte: (DNER-ES 317, 1997).

2.5 RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU

A história da evolução da borracha de pneu se inicia a quase 200 anos atrás, no século XIX, e daquela época até os dias atuais, sua evolução é constante. E invenção do pneu teve início com os estudos de Charles Goodyear, por volta de 1830, onde acidentalmente observou que a borracha cozida a altas temperaturas com enxofre, mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor, fato até então não constatado, pois a borracha “normal” não passava de uma goma que se dissolvia com o calor. Estava descoberto o processo de vulcanização da borracha que, além de dar forma ao pneu, aumentou a segurança nas freadas e diminuiu as trepidações nos carros. Em 1845, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóvel (SINPEC, 2016).

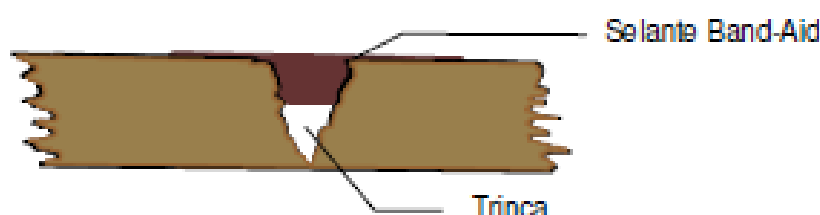
Segundo Greca (2003) a utilização do asfalto modificado por borracha de pneu iniciou-se em 1940, quando foi introduzido no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada denominada “*Ramflex*” pela Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*.

Ainda segundo Greca (2003), Charles H. *MacDonald* é o pai do Asfalto Borracha nos estados Unidos por ter desenvolvido em 1963 um material altamente elástico para ser utilizado na manutenção de pavimentos asfálticos, composto de ligante asfáltico e 25 % de borracha moída de pneu (de 0,6 a 1,2 mm), misturados a 190 °C durante 20 minutos, para ser utilizados em remendos, conhecidos como “*band-aid*”.

Esse material foi posteriormente utilizado como selante de trincas (figura 23) e através do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer, SAMI*, como camada de reforço. Após seis anos da primeira aplicação rua na cidade de Phoenix, se pôde verificar que o pavimento não apresentava a formação de trincas de reflexão (ODA, 2002).

Ainda segundo Oda (2002) o trabalho experimental na cidade de Phoenix continuou com parceria de MacDonald e a empresa *Atlos Rubber Inc.*, onde foram construídos trechos no *Phoenix Sky Harbor International Airport*, em 1966.

Figura 4. Trinca na estrutura no pavimento selada com *band-aid*.



Fonte: (ODA, 2002).

Atualmente, há interesse por misturas asfálticas com adição de resíduos de borracha de pneus, que consistem de partículas de borracha vulcanizada que conferem conformação permanente aos objetos (CLERMAN, 2004).

Por possuir excelentes propriedades físico-químicas, a borracha do pneu ao ser incorporada ao ligante convencional traz uma série de melhorias que se refletem diretamente na durabilidade do pavimento, a saber: o aumento da resistência à ação química de óleos e combustíveis, a incorporação de agentes antioxidantes e inibidores da ação de raios ultravioleta que diminuem sensivelmente o envelhecimento do CAP, a diminuição da suscetibilidade térmica e o aumento da deformação de tração admissível (melhorando o comportamento à fadiga) GRECA (2003).

Ainda segundo Grega (2003) a adição do resíduo de borracha de pneu às misturas asfálticas pode ser feita por via seca ou via úmida. Na via seca, a borracha entra na mistura como agregado, pois é introduzida diretamente no misturador. Nesse caso, as propriedades da borracha não são 100% transferidas ao ligante, embora seja possível observar melhorias em outras questões na mistura asfáltica. Já na via úmida, a borracha modifica permanentemente o ligante, pois é previamente misturada a ele, ocorrendo a transferência total de suas propriedades de elasticidade e resistência ao envelhecimento.

As denominações para os dois casos são respectivamente Borracha-Agregado ou Concreto asfáltico modificado por borracha e a outra é Asfalto-Borracha (HEITZMAN, 1992). Atualmente, também é possível o processo misto, onde as duas categorias são utilizadas.

Na tabela 4, Oda et al (2005) apresenta a aplicação da taxa de uso da borracha e sua respectiva quantidade.

Tabela 4. Aplicação da taxa de uso de borracha.

Local de Aplicação	Quantidade
Revestimento delgado antirreflexo de trincas com asfalto borracha	0,2 kg borracha/ kg
Capa de selagem com asfalto borracha	0,6 kg borracha/ m2
Ligante-asfalto-borracha (via úmida)	5 % a 25 % sobre a porcentagem de ligante asfáltico
Agregado-borracha (via seca)	3 % a 5 % de borracha moída, em relação à massa total de agregados minerais

Fonte: (Adaptado de ODA et al, 2002).

3 OBJETIVO

Este trabalho objetiva diminuir o volume de vazios e melhorar as condições de rolamento nas misturas asfálticas à frio, sem alterar demais características próprias dos pavimentos flexíveis. Ou seja, reduzir a permeabilidade das faixas de asfaltos mais abertas e melhorar as condições de rolamento superficial.

Essa possibilidade permitiria a execução de pavimentos de menor custo e a adoção de bases com menor capacidade drenante, como as constituídas por solos-cimento e solos-cal, que habitualmente apresentam sérios problemas de durabilidade quando associados a pavimentos flexíveis.

4 METODOLOGIA

A metodologia de concepção deste trabalho dividiu-se em duas partes específicas, sendo elas a pesquisa bibliográfica, onde foi possível levantar os constituintes principais das misturas asfálticas, tomar conhecimento das normas e resolução disponíveis, aprofundar em questões anteriormente desconhecidas e, de modo geral, tomar conhecimento do estado da arte acerca do tema. Tal pesquisa se baseou em artigos e teses publicados entre os anos de 2000 a 2016 e também em livros sobre estradas, transportes e normas.

Com esses conhecimentos teóricos, na segunda parte foi possível analisar experimentalmente, através da confecção de corpos de provas e elaboração de misturas os materiais previamente estudados e compreender os resultados retornados por estes. Para a execução das misturas e dos ensaios, foi necessário desenvolver parte do trabalho no Laboratório de Transportes da Universidade de Taubaté – UNITAU.

5 PESQUISA PRELIMINAR

5.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Essa pesquisa é fruto do estudo realizado no ano de 2015 dentro do programa de bolsas de apoio acadêmico oferecido pela UNESP.

A pesquisa resultou de estudos bibliográficos e ensaios práticos, onde foram moldados 8 corpos de prova dos quais dois não continham resíduos de borracha, três continham 50g e os últimos três, 100g. Os corpos de prova sem adição de borracha foram necessários para se ter parâmetro de comparação com os demais que continham a adição.

Inicialmente os agregados (brita 1, pedrisco e pó de pedra) passaram por um processo de aquecimento em estufa à 140°C por 24 horas. A borracha foi acondicionada a essa situação por cerca de 6 horas antes da preparação da mistura e moldagem. As proporções das misturas estão apresentadas na tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Composição das misturas.

Material	CP 1, 2	CP 2, 3 e 4	CP 5, 6 e 7
Brita 1	742,1 g	742,1 g	742,1 g
Pedrisco	742,1 g	742,1 g	742,1 g
Pó de Pedra	2759,3 g	2759,3 g	2759,3 g
CAP	256,5 g	256,5 g	256,5 g
Borracha	0 g	50 g	100 g

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

5.2 MATERIAIS

5.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

O Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP usado nesta pesquisa foi cedido pela Construtora SOTEP localizada na Rodovia Presidente Dutra km 80 - Roseira/SP, e é classificado por penetração como um CAP 85/100 e atende as especificações indicadas na figura 5 (ANP, 2005).

5.2.2 Agregados

Os agregados utilizados foram fornecidos pela Universidade UNITAU, local onde a pesquisa foi realizada. Estes agregados são a brita 1, o pedrisco e o pó de pedra, com dimensões expressas na tabela 6 abaixo:

Figura 5. Características do CAP 30/45.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, min		192	141	110	80			
a 150 °C, min		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, min		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, min.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor min	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, min	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, min	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, min	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, min (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Observações:

(1) O Índice de susceptibilidade térmica é obtido a partir da seguinte equação ou da Tabela 2:

$$\text{Índice de susceptibilidade térmica} = \text{IST}$$

Fonte: ANP, 2005.

Tabela 6. Granulometria dos agregados utilizados.

Granulometria	
Brita 1	4,75 mm a 25 mm
Pedrisco	> 12,5 mm
Pó de Pedra	< 6mm

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Para se tomar conhecimento do comportamento dos resíduos de borracha de pneu a altas temperaturas, analisou-se 200 g do material em estufa à 160 °C por cerca de oito horas. As características observadas neste tempo estão dispostas na tabela 7 a seguir.

Tabela 7. Comportamento da borracha.

Peso	Hora	Características Observadas
		No início do experimento:
		Elementos de granulometria variada;
200	09:20	Sem viscosidade e aparentemente sem umidade;
		Cheiro normal de borracha;
		Pouca elasticidade.
		Nenhuma alteração visível;
198,08	10:20	Alteração de peso;
		Pouco quente, mas dentro do coerente.
		Redução de peso;
197,65	11:20	Redução da totalidade preta (a borracha se apresentou um pouco esbranquiçada);
		Pouca alteração na viscosidade.
197,63	12:20	Permanência da redução da cor preta;
		Liberação de odor;
		Alteração da elasticidade, contudo nada significativo.
197,63	13:20	Muito quente;
		Redução de tonalidade;
		Percebeu-se o progressivo aumento de elasticidade.
197,6	15:20	Percebeu-se neste instante que os “grãos” menores de borracha “grudaram” a superfície metálica utilizada no manuseio da amostra.
197,63	16:20	Todas as observações anteriores persistiram.
197,55	17:20	No fim do experimento não ocorreu nenhuma alteração visual que não tenha sido percebida anteriormente.

Fonte: Produção do próprio autor.

Como os resíduos de borracha se encontravam sem granulometria definida, os mesmos foram submetidos a um processo de separação granulométrica. O resultado desse processo está apresentado na tabela 8 a seguir.

Tabela 8. Granulometria da borracha.

Granulometria			
Peneiras	Massa retida g	% Retida	% Retida Acumulada
3/8"	0,7	0,23	0,23
4	11,2	3,74	3,98
9	37,8	12,6	16,59
35	231,1	77,03	93,6
80	17,7	5,9	99,7
200	1,3	0,43	99,99
Total	300		

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A seguir, serão apresentadas as figuras de 6 a 13 referentes ao ensaio de granulometria, na qual são expostas as massas retidas em cada umas das peneiras.

Figura 6 e 7. Pesagem, da borracha para ensaio e massa retida na peneira 3/8".



Fonte: Produção do próprio auto (2017).

Figura 8 e 9. Conjunto de peneiras e massa retida na peneira 4.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 10 e 11. Massa retida nas peneiras 35 e 9.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 12 e 13. Massa retida nas peneiras 80 e 200.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

5.3 CORPOS DE PROVA

Segundo a norma do DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem 043/95, devem ser preparados no mínimo três corpos de prova para cada dosagem de misturas betuminosas, conhecidas as porcentagens em massa, em que os agregados e o ligante betuminoso serão misturados.

Os agregados foram pesados em recipientes separados, de forma que a mistura produza corpos de prova com cerca de 1200g e 63,5 +/- 1,3 mm de altura (figura 14). A seguir, esses recipientes foram aquecidos a uma temperatura de mais ou menos 135°C, não ultrapassando 177°C, conforme ilustrado na figura 15.

Segundo ainda a referida norma, após a mistura estar pronta, esta deve ser acomodada em um molde. O molde e o soquete devem estar limpos e aquecidos. A mistura deve ser acomodada com 15 golpes de espátula e após isso, deve ser compactada com 50 golpes para pavimentos de tráfego “normal” e 75 golpes para tráfego pesado. Como neste experimento simulou-se tráfego normal, foram disparados 50 golpes para a moldagem.

Após resfriados, os cp's foram extraídos de seus moldes em uma máquina extratora, medidos com o auxílio de um paquímetro e pesados na balança normal e quando em imersos em água afim de se obter a densidade de cada um, conforme figura 16.

Figura 14. Pesagem e preparação do material para mistura.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 15. Preparação da mistura à 135°C.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 16. Moldagem e extração dos corpos de prova.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Ao término, o cp foi retirado do anel inferior e cuidadosamente colocado numa superfície lisa e plana e deixado em repouso por 22 horas (a norma expressa mínimo de 12 horas), à temperatura ambiente (figura 17).

Figura 17. Corpos de prova em ordem de adição de borracha.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Para determinação da estabilidade e fluência, após o termino do tempo de resfriamento, os corpos de prova foram imersos em “banho-maria” a uma temperatura de 60°C por um período de 40 minutos, conforme ilustrado nas figuras 18 e 19. Este procedimento é necessário para simular as piores condições climáticas possíveis, que seriam calor intenso seguido de chuva ou vice-versa.

Figura 18. Pesagem dos corpos de prova na balança e imersos.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

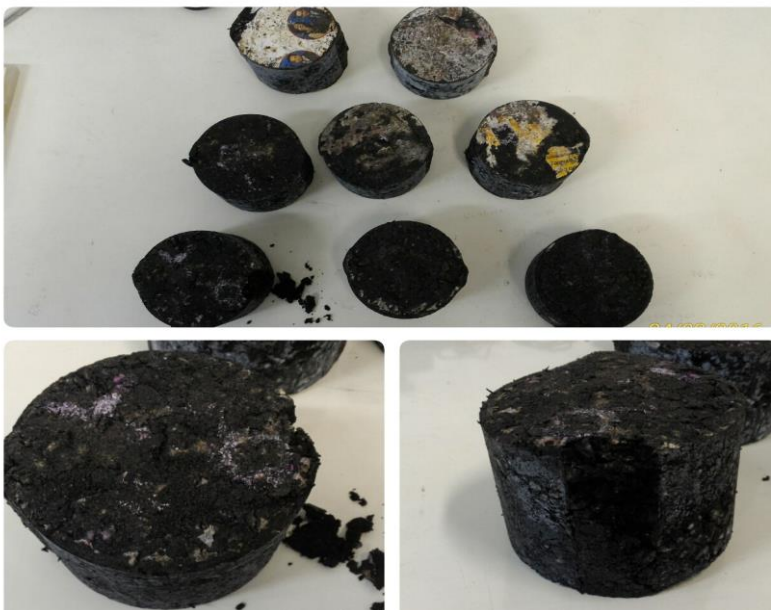
Figura 19. Corpo de prova em banho-maria a 60°C e ensaio de estabilidade e fluência.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Em seguida, os cp's foram colocados no molde de compressão, convenientemente limpos com os pinos-guias lubrificados. O molde foi posicionado na prensa Marshall e o medidor de fluência foi colocado e ajustado na posição de ensaio. A carga em N (kgf) foi aplicada e os cp's rompidos. Todos os resultados deste procedimento serão devidamente apresentados, já os dados característicos dos cp's estão apresentados na tabela 9 abaixo.

Figura 20. Corpos de prova após o ensaio de estabilidade (rompidos).



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 9. Dados dos Corpos de prova.

Corpos de Prova		cp 1	cp 2	cp 3	
Dimensão cm	Sem borracha	6,54	6,19	-	
	Com 50 g	6,44	6,6	6,55	
	Com 100 g	6,86	6,85	6,94	
Peso g	Sem borracha	1195,7	1187,2	-	
	Com 50 g	1180,9	1210,7	1190,7	
	Com 100 g	1200,8	1176,9	1193	
Peso imerso g	Sem borracha	683,5	693		
	Com 50 g	670	685,7	673,2	
	Com 100 g	660,4	642,2	653	
Densidade g/cm ³	Sem borracha	2,333	2,402		Média 2,3675
	Com 50 g	2,311	2,306	2,301	2,306
	Com 100 g	2,222	2,201	2,209	2,209

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 10. Dados do ensaio de estabilidade e fluência.

Corpo de prova	Altura Média cm	Fator de Correção	Leitura do defletor	K constante kg/mm
Sem adição cp 1	6,54	0,95	1090	1,717
Sem adição cp 2	6,19	1,04	890	1,717
Com 50g cp 1	6,44	0,98	790	1,717
Com 50g cp 2	6,6	0,94	890	1,717
Com 50g cp 3	6,55	0,95	790	1,717
Com 100g cp 1	6,86	0,88	450	1,717
Com 100g cp 2	6,85	0,89	540	1,717
Com 100g cp 3	6,94	0,87	630	1,717

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

5.4 RESULTADOS

Tabela 11. Resultados do ensaio de estabilidade e fluência.

Corpo de prova	Fluência Inicial 1/100"	Fluência Final 1/100"	Fluência	Estabilidade kg	Estabilidade Corrigida kg
Sem adição cp 1	20,175	21,55	5,41	1871,53	1777,95
Sem adição cp 2	20,25	21,77	5,98	1528,13	1589,26
Com 50g cp 1	20,25	22,58	9,17	1356,43	1329,3
Com 50g cp 2	20,26	22,31	8,07	1528,13	1436,44
Com 50g cp 3	20,15	22,51	9,29	1356,43	1288,61
Com 100g cp 1	20,2	23,68	13,7	772,65	679,93
Com 100g cp 2	20,15	24,7	17,91	927,18	825,19
Com 100g cp 3	20,19	24,72	17,83	1081,71	941,09

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 12. Resultados do ensaio de estabilidade e fluência.

Valores Médios do Ensaio Marshall							
% CAP	Massa esp. Aparente	Massa esp. Real	Estabilidade Corrigida	Fluência	V.V	V.A.M	R.B.V
6	2,452	2,333	1777,95	5,41	4,85	7,13	31,93
6	2,452	2,402	1589,26	5,98	2,04	4,38	53,47
6	2,452	2,311	1329,3	9,17	5,75	8,01	28,17
6	2,452	2,306	1436,44	8,07	5,95	8,2	27,42
6	2,452	2,301	1288,61	9,29	6,16	8,4	26,71
6	2,452	2,222	679,93	13,7	9,38	11,55	18,77
6	2,452	2,201	825,19	17,91	10,24	12,38	17,34
6	2,452	2,209	941,09	17,83	9,91	12,07	17,86

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

O fator de correção da estabilidade é obtido em função da espessura do corpo de prova e que está apresentado na tabela 13.

O V.V ou volume de vazios é calculado pela fórmula:

$$V.V = \frac{Massa_{ap} - Massa_{real} \times 100}{Massa_{ap}} \quad (1)$$

O V.A.M ou vazios do agregado mineral foi calculado pela fórmula:

$$V.A.M = \frac{Massa_{real} \times CAP + V.V}{1,025 \times CAP} \quad (2)$$

O R.B.V ou relação de betumes e vazios foi calculado pela fórmula:

$$R.B.V = \frac{V.A.M - V.V \times 100}{V.A.M} \quad (3)$$

Para verificar se os dados obtidos estão condizentes, segue os valores expressos pela norma, apresentados na figura 21.

Tabela 13. Tabela para correção da estabilidade.

Espessura (cm)	Fator	Espessura (cm)	Fator	Espessura (cm)	Fator
5,08	1,46	5,63	1,22	6,43	0,98
5,10	1,45	5,66	1,21	6,47	0,97
5,12	1,44	5,68	1,20	6,51	0,96
5,16	1,43	5,71	1,19	6,56	0,95
5,18	1,42	5,74	1,18	6,61	0,94
5,20	1,41	5,77	1,17	6,67	0,93
5,22	1,40	5,81	1,16	6,71	0,92
5,24	1,39	5,84	1,15	6,75	0,91
5,26	1,38	5,87	1,14	6,79	0,90
5,29	1,37	5,90	1,13	6,83	0,89
5,31	1,36	5,93	1,12	6,88	0,88
5,33	1,35	5,97	1,11	6,93	0,87
5,35	1,34	6,00	1,10	6,98	0,86
5,38	1,33	6,03	1,09	7,03	0,85
5,40	1,32	6,06	1,08	7,08	0,84
5,42	1,31	6,09	1,07	7,14	0,83
5,45	1,30	6,11	1,06	7,22	0,82
5,47	1,29	6,14	1,05	7,30	0,81
5,49	1,28	6,19	1,04	7,35	0,80
5,51	1,27	6,23	1,03	7,40	0,79
5,54	1,26	6,27	1,02	7,46	0,78
5,56	1,25	6,31	1,01	7,54	0,77
5,58	1,24	6,35	1,00	7,62	0,76
5,61	1,23	6,39	0,99		

Fonte: Apostila de Transportes II - UNITAU, 2016.

Figura 21. Valores expressos pela norma para resultados do ensaio de estabilidade.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: NORMA DNIT 031/2006 – ES.

Desta forma, pode-se perceber a fluência dos corpos de prova estão dentro do esperado, bem como a estabilidade. Nos demais fatores, obteve-se discrepância na relação de betume e vazios e no volume de vazios dos corpos de prova com adição 100 g de borracha.

5.5 ANÁLISE

A pesquisa foi desenvolvida conforme o esperado e os resultados obtidos mostraram que o objetivo inicial foi atingido.

A partir da figura abaixo pode -se notar que a porcentagem de vazios dos corpos de prova com 50 g de asfalto ficou dentro do esperado, mesmo este tendo densidade menor que o corpo de prova sem adição de borracha. Cabe ressaltar que, mesmo os corpos de prova apresentando em números, um volume de vazios acima do esperado, visualmente percebe-se uma significativa redução destes, conforme comparação na figura 22 a seguir.

No corpo de prova representativo da faixa A (faixa na qual o trabalho foi realizado), percebe-se inúmeros pontos de vazios e aberturas. Isso por que os agregados que o compõem não são suficientes para fornecer um acabamento melhor ou mais compactado. Com a adição dos resíduos de borracha de pneu, foi possível perceber melhor compactação do material e como a borracha possui flexibilidade e menor densidade, diferente dos outros agregados, estes corpos de prova tiveram desempenho considerável dentro do esperado, mesmo tendo menor densidade.

Figura 22. Diferença de vazios nos corpos de prova faixa A.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

6 DESENVOLVIMENTO – PREPARAÇÃO DA MISTURA

Para desenvolver este trabalho foram utilizados agregados miúdos, graúdos, ligante asfáltico e borracha triturada de pneus. Tais materiais foram devidamente caracterizados seguindo as normas do DNIT ou procedimentos específicos.

Foram executadas misturas em uma faixa mais aberta de pré-misturados à frio, a faixa A. A adição de cada componente da mistura foi estudada e obtida a partir dos valores dos ensaios de caracterização e conduzidos ao método gráfico de Rothfuchs para definição das porcentagens da mistura.

6.1 AGREGADOS

Os agregados minerais disponíveis para a confecção da mistura se apresentavam nas seguintes faixas granulométricas: brita 19 mm, pedrisco 9,5 mm e areia 4,8 mm. Contudo, pode ser observado que a areia, parte integrante do sistema de fechamento da mistura, era constituída em sua maioria de minerais “grossos” que não auxiliavam na obtenção do objetivo deste trabalho. Dessa forma, foi necessário tratamento posterior de peneiramento da mesma, para obtenção da granulométrica desejada.

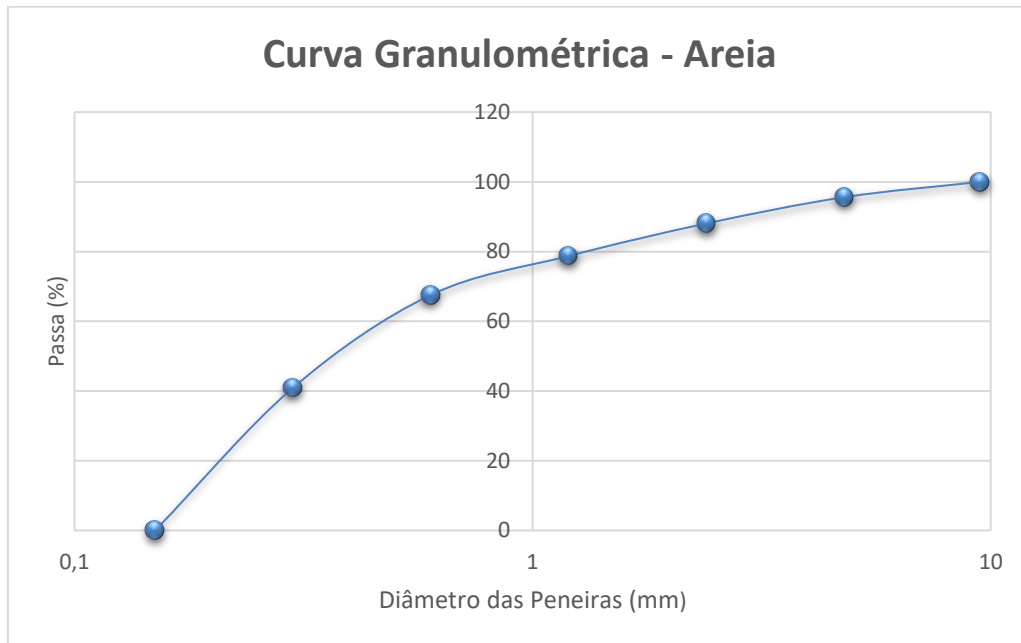
Os gráficos 1, 2, e 3 abaixo, apresentam as curvas granulométricas dos agregados ensaiados e a tabela 14 informa os valores utilizados para a formação dos gráficos. O gráfico 4 é uma composição das granulometrias dos materiais.

Tabela 14. Granulometria dos materiais utilizados.

Peneiras		Percentual passando (em peso)		
Mm	Polegadas/número	Areia	Pedrisco	Brita
19,1	3/4"	100	100	95,62
12,7	1/2"	100	99,86	33,54
9,5	3/8"	100	98,44	11,33
4,8	Nº 4	96,09	40,34	1,06
2,4	Nº 10	88	5,12	0,24
1,2	Nº 16	79	0,1	0
0,6	Nº 30	68	0	0
0,3	Nº 50	41	0	0
0,15	Nº 100	0	0	0

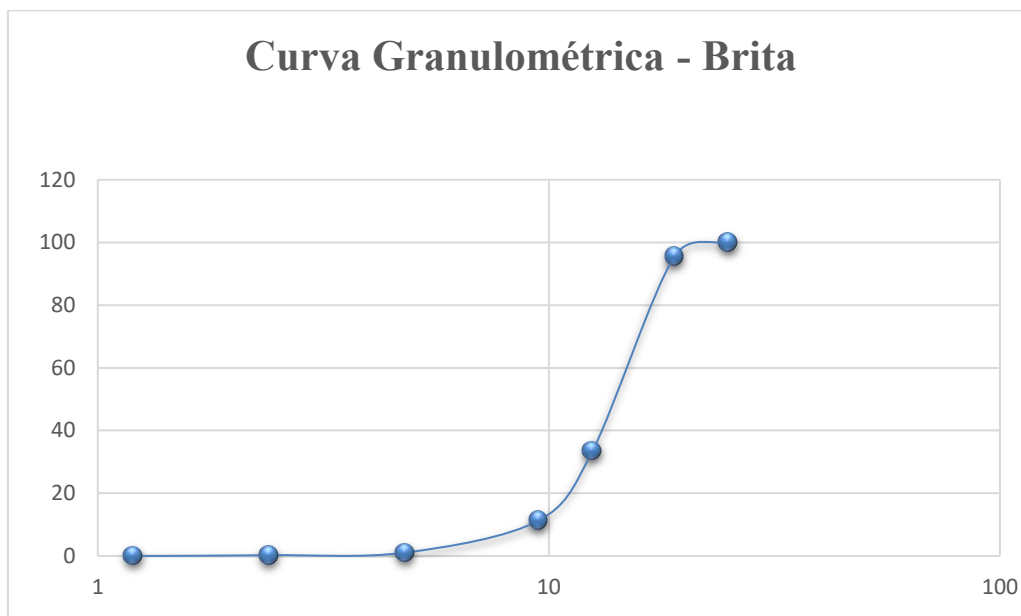
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 1. Curva Granulométrica da areia.



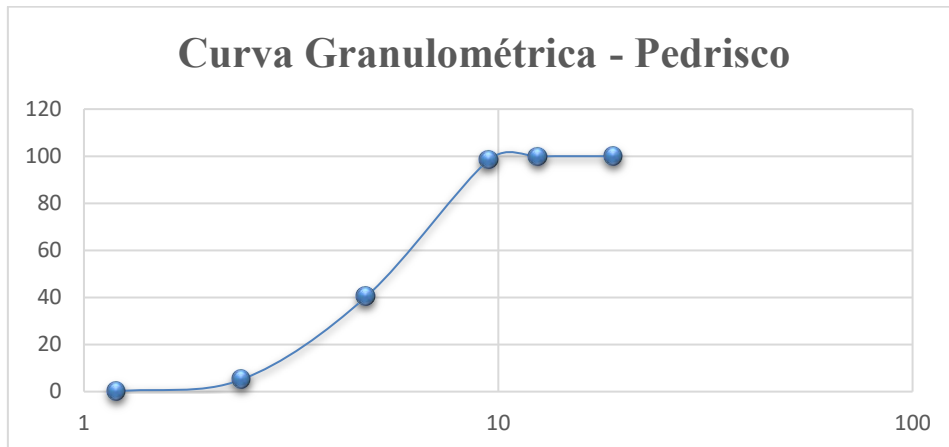
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 2. Curva Granulométrica do brita.



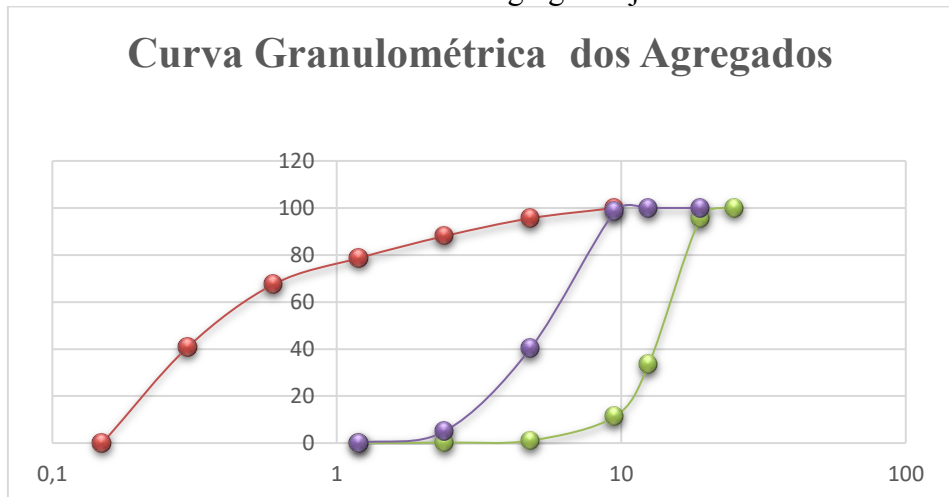
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 3. Curva Granulométrica do pedrisco.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 4. Curva Granulométrica dos agregados juntos.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A tabela 15 apresenta os valores dos ensaios de caracterização dos agregados. Os ensaios neles realizados foram os prescritos pelas normas NBR NM 52 – Determinação da massa específica e massa específica aparente; NBR 7251 – Determinação da massa unitária; NBR-9776, CB-18, 1986, MB-2643 – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman; e NBR 6508/84 – Determinação do peso específico.

Tabela 15. Granulometria dos agregados.

Agregado	Peso específico (g/cm³)	Módulo de Finura	Massa Unitária (kg/dm³)
Brita	2,632	3,59	-
Pedrisco	2,63	2,57	-
Areia	2,604	2,29	1,427

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Inicialmente, os agregados foram dispostos em fôrmas metálicas próprias e levados a estufa por 48 horas para retirar toda umidade existente. Somente após encerrados este procedimento é que os materiais foram ensaiados.

6.1.2 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada no laboratório foi concedida pela Prefeitura Municipal de Guaratinguetá. Trata-se de um asfalto diluído tipo CM 30 – Cura Média. Suas propriedades estão dispostas na figura 23 apresentada abaixo fornecida pela Betunel - Tecnologia em asfalto.

Figura 23. Características da emulsão asfáltica de cura média – CM 30.

Característica	Unidade	Limite		Método	
Tipo		CM-30	CM-70	ABNT/NBR	ASTM
Água, máx.	% vol	0,2	0,2	14236	D 95
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	30 - 60	70 - 140	14756	D 2170
Viscosidade Saybolt-Furol (S):					
25°C	SSF	75 - 150	-	14950	D 88
50°C	SSF	-	60 - 120	14950	D 88
Ponto de Fulgor, mín.	°C	38	38	5765	D 3143
Destilação até 360°C, % volume do total destilado, mín.:					
225°C	% vol	25	20	14856	D 402
260°C	% vol	40 - 70	20 - 60	14856	D 402
316°C	% vol	75 - 93	65 - 90	14856	D 402
Resíduo a 360°C, por diferença, mín.	% vol	50	55	14856	D 402
Viscosidade a 60°C ^(a)	P	300 - 1200	300 - 1200	5847	D 2171
Betume, mín. ^(a)	% massa	99,0	99,0	14855	D 2042
Ductilidade a 25°C, mín. ^{(a)(b)}	cm	100	100	6293	D 113

Fonte: (BETUNEL, 2016).

O material ficou armazenado no laboratório da UNITAU – Universidade de Taubaté, em local reservado, protegido de agentes externos afim de garantir a manutenção de suas propriedades, até o momento de se realizar os estudos.

6.1.3 Borracha

O resíduo de borracha de pneus empregado na mistura foi obtido por trituração do material resultante de decapagem fornecido pela empresa Eskelsen Pneus, localizada às margens da Rodovia Presidente Dutra km 56, Lorena/SP. O material inicial apresentava-se de forma não homogênea com relação ao tamanho e tipo dos grãos. Significativa porcentagem desse material não era interessante sob o ponto de vista de preenchimento da mistura. Então os

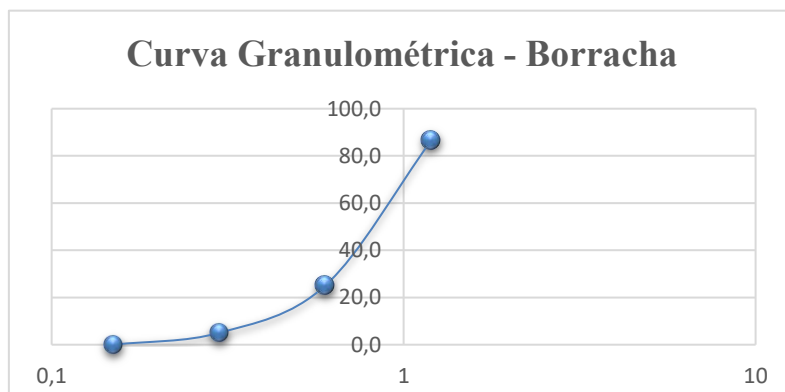
resíduos foram submetidos a um processo de moagem simples em um liquidificador doméstico, afim de se obter maior concentração de material fino e diminuição dos resíduos maior. A seguir, o produto foi peneirado na peneira 1,2, descartando o material retido. O montante final passou por análise granulométrica que resultou na tabela 16 e no gráfico 5 expostos abaixo.

Tabela 16. Granulometria dos resíduos de borracha de pneu.

Borracha				
Peneira	Massa (g)	%		
		Retida	Acumulada	Passa
1,2	66,5	13,3	13,3	86,7
0,6	307,6	61,52	74,8	25,2
0,3	100,6	20,12	94,9	5,1
0,15	25,7	5,14	100	0
Fundo	0			
Total	500			

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 5. Curva Granulométrica dos resíduos de borracha de pneu.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

6.2 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Visando atingir os objetivos deste trabalho, foram executados alguns procedimentos para a confecção das porcentagens das amostras e alguns outros para preparação, moldagem e execução dos corpos de prova. Os principais aspectos para tais procedimentos serão descritos a seguir.

6.2.1 Método de Rothfuchs

O método de Rothfuchs fornece, a partir de gráficos, as porcentagens de cada material utilizado na mistura. Por se tratar de um método gráfico, seus valores não são muito precisos, e necessita de algumas correções, porém é o mais aproximado que se tem posse.

Inicialmente é necessário calcular a curva granulométrica, com os dados do material que passa pelas peneiras. Logo após, calcula-se a curva padrão, pela seguinte formula:

(4)

$$p = (d/D)^n$$

Onde:

p = porcentagem passando

D = diâmetro máximo

n = média entre 0,4 e 0,6 – graduação densa

d = diâmetro da peneira

Os cálculos envolvendo a formula resultaram na seguinte tabela.

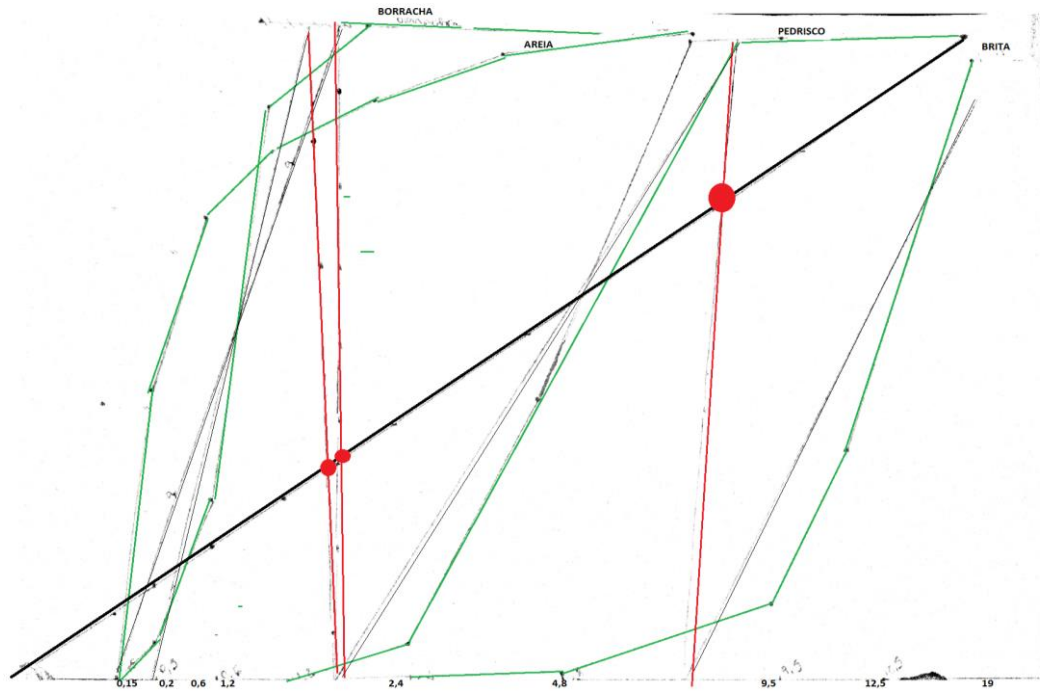
Tabela 17. Valores resultantes do cálculo de p.

	p	P	p
d	n = 0,4	n = 0,5	n = 0,6
19	100	100	100
12,5	85	82	78
9,5	76	71	66
4,8	58	51	44
2,4	44	36	29
1,2	34	26	20
0,6	26	18	13
0,3	20	13	9
0,15	15	9	6

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

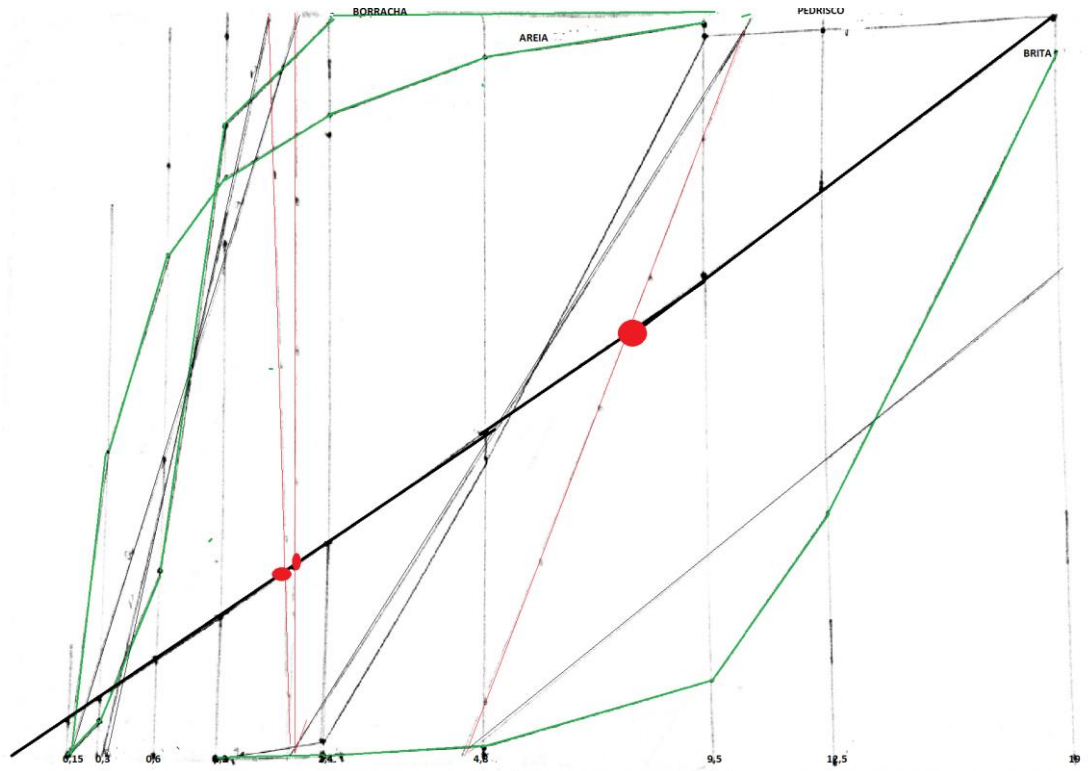
A partir desses valores se constroem três gráficos, um para cada valor de n. Na vertical coloca-se os valores em escala de 0 a 100%, que será a referência para as porcentagens que passam das amostras. Marca-se um ponto arbitrário 0' sobre o eixo horizontal referente à “ % que passa” igual a 100. Traça-se uma diagonal ligando o ponto 0% ao 0', que representa da granulometria desejada da mistura. Ao longo dessa diagonal, cria-se eixos verticais referentes

Gráfico 7. Processo gráfico de Rothfuchs para $p=0,5$.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 8. Processo gráfico de Rothfuchs para $p=0,6$.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A partir dos gráficos, retirou-se as % referentes a cada agregado que se seguem na tabela 18:

Tabela 18. Porcentagem de cada material que comporá a mistura.

	n =0,4	n =0,5	n =0,6
Brita	24	285	41
Pedrisco	32	40	31,5
Areia	4,5	12,8	1,5
Borracha	39,5	16,7	26

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

6.2.2 Desenvolvimento dos Cálculos

A partir do Método de Rothfuchs foi necessário fazer uma composição das porcentagens encontradas com as porcentagens de cada material que passa pelas peneiras. O resultado dessa combinação esta informada nas tabelas 19,20 e 21 abaixo.

Tabela 19. Composição granulométrica para curva padrão de n = 0,4

Peneira	% Brita x %	% Pedrisco x %	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
19	22,95	32	4,5	39,5	98,95
12,5	8,05	31,96	4,5	39,5	84,01
9,5	2,72	31,5	4,5	39,5	78,22
4,8	0,25	12,91	4,3	39,5	56,97
2,4	0,06	1,64	3,96	39,5	45,16
1,2	0	0,03	3,54	34,25	37,82
0,6	0	0	3,04	9,95	12,99
0,3	0	0	1,84	2	3,84
0,15	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 20. Composição granulométrica para curva padrão de n = 0,5.

Peneira	% Brita x %	% Pedrisco x %	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
19	27,25	40	12,8	16,7	96,75
12,5	9,56	39,94	12,8	16,7	79
9,5	3,23	39,38	12,8	16,7	72,1
4,8	0,3	16,14	12,24	16,7	45,38
2,4	0,07	2,05	11,27	16,7	30,09
1,2	0	0,04	12,79	14,48	27,31
0,6	0	0	11,95	4,21	16,17
0,3	0	0	8,88	0,85	9,79
0,15	0	0	1,38	0	1,38

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

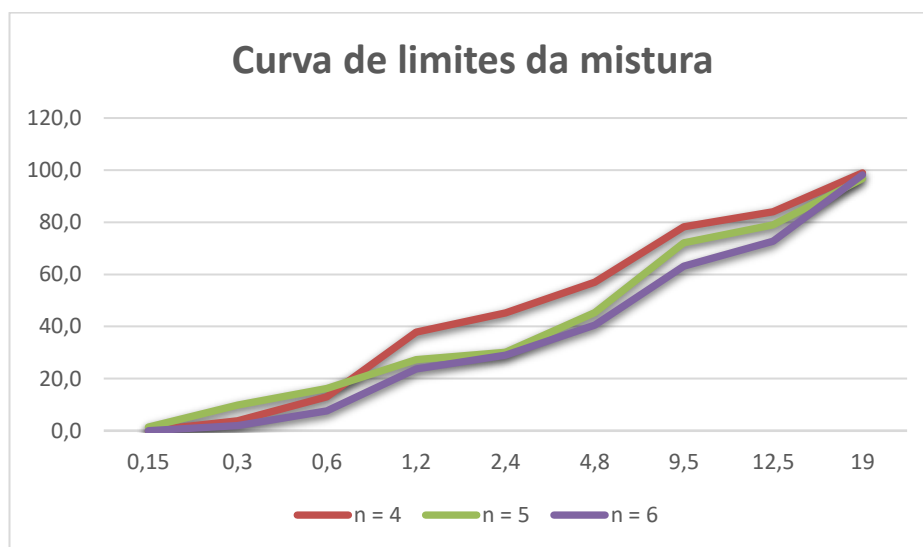
Tabela 21. Composição granulométrica para curva padrão de $n = 0,6$.

Peneira	% Brita x %	% Pedrisco x %	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
19	39,2	31,5	1,5	26	98,2
12,5	13,75	31,46	1,5	26	72,71
9,5	4,65	31,01	1,5	26	63,15
4,8	0,43	12,71	1,43	26	40,58
2,4	0,1	1,61	1,32	26	29,03
1,2	0	0,03	1,18	22,54	23,76
0,6	0	0	1,01	6,55	7,56
0,3	0	0	0,61	1,32	1,93
0,15	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Dispondo os valores da tabela de curva padrão com $n = 0,5$ coluna “total” em um gráfico, é possível perceber que existe uma deficiência quanto a granulometria da areia. Isso porque este agregado será usado para preenchimento dos vazios na amostra, e o que obtivemos foi um material “grosso” demais para realizar tal função. Cabe ressaltar que se utilizou $n = 0,5$ pois é a curva intermediária, garantindo que todos os dados estarão dentro dos limites dispostos pelos demais valores de n . Tal gráfico se segue.

Gráfico 9. Curva representativa da mistura calculada.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Devido a isso, submeteu-se este agregado a um processo de refinamento, na qual todo o material foi peneirado na peneira 1,2, descartando todo material retido. Esse “novo” material, foi reanalisado granulometricamente, obtendo-se a tabela 22 a seguir.

Tabela 22. Agregada areia peneirado.

Peneira	Massa (g)	Areia		
		%		
		Retida	Acumulada	Passa
1,2	0,7	0,07	0,07	99,93
0,6	64,9	6,6	6,7	93,3
0,3	235,9	23,99	30,7	69,3
0,15	591	60,12	90,8	9,2
0,075	90,6	9,22	100	0
FUNDO	17			

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Como o problema se encontrava no material de enchimento composto por areia e borracha, todo o método gráfico de Rothfuchs foi refeito usando estes dois, utilizando neste caso, a areia peneirada. O resultado está exposto nas tabelas 23 ao 26 a seguir.

Tabela 23. Areia peneirado.

	n = 0,4	n = 0,5	n = 0,6
Areia	34	40	46
Borracha	66	60	54

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 24. Composição granulométrica para a curva padrão de n = 0,4 com a areia peneirada.

Peneira	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
1,2	33,98	57,22	91,2
0,6	31,73	16,62	48,35
0,3	23,58	3,34	26,92
0,15	3,13	0	3,13

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 25. Composição granulométrica para a curva padrão de n = 0,5 com a areia peneirada.

Peneira	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
1,2	39,97	52	91,99
0,6	37,33	15,1	52,44
0,3	27,74	3	30,77
0,15	3,69	0	3,69

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 26. Composição granulométrica para a curva padrão de n = 0,6 com a areia peneirada.

Peneira	% Areia x %	% Borracha x %	TOTAL
1,2	45,968	46,82	92,786
0,6	42,932	13,6	56,529
0,3	31,896	2,73	34,629
0,15	4,241	0	4,241

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Com isso foi possível encontrar a proporção exata de cada material que comporá a mistura. Os valores em % de cada um deles se encontra na tabela 27 abaixo.

Tabela 27. Porcentagem relativa de cada material que comporá a mistura.

Mistura Final	
Brita	28,5
Pedrisco	40,0
Areia	12,6
Borracha	18,9

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Na posse de todos os parâmetros dos agregados, a partir desse momento foi necessário calcular a quantidade necessária de cura média (CM 30) que participará da mistura. Para obtenção desse valor, foi utilizado o Método de Duriez, que faz o cálculo do teor de ligante em função da superfície específica dos agregados. Tal método foi encontrado na apostila da disciplina de Transportes II da Universidade de Taubaté. O método utiliza a fórmula apresentada a seguir.

(5)

$$\Sigma = \frac{0,17G + 0,33g + 2,30A + 12S + 135f}{100}$$

Onde

G = % que passa na peneira 3/8", subtraída de 100%;

g = % que passa na peneira n° 4, subtraída da % que passa na peneira 3/8";

A = % que passa na peneira n° 40, subtraída da % que passa na peneira n° 4;

S = % que passa na peneira n° 200, subtraída da % que passa na peneira n° 40; e

f = Todo material fino (%) que passa na peneira n°200.

Os valores de G, g, A, S e f são apresentados na tabela 28. Houve a necessidade de se fazer um cálculo médio com os valores das peneiras 0,6 e 0,3 mm e posteriormente subtrair do valor da peneira 2,4 mm para obtenção do valor de A.

Tabela 28. Valores para o cálculo do teor de ligante pelo Método de Duriez.

G	% que passa na peneira 3/8", subtraída de 100%	27,9
g	% que passa na peneira n° 4, subtraída da % que passa na peneira 3/8".	26,73
A	% que passa na peneira n° 40, subtraída da % que passa na peneira n° 4.	32,4
S	% que passa na peneira n° 200, subtraída da % que passa na peneira n° 40.	11,6
f	Todo material fino (%) que passa na peneira n°200.	1,38

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Aplicando os valores a fórmula, tem-se:

$$\Sigma = \frac{(0,17 \times 27,9) + (0,33 \times 26,73) + (2,30 \times 32,40) + (12 \times 11,60) + (135 \times 1,38)}{100}$$

$$\Sigma = 4,13$$

(6)

$$P = k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Onde:

P = teor de ligante.

K= Módulo de Riqueza. Para este cálculo, k= 4,25, que é referente ao ligante usado, sendo este CM – 30.

$$P = 4,25 \sqrt[5]{4,13} = 5,65$$

Para obter a % de ligante em relação do peso dos agregados necessita-se corrigir o valor de P, utilizando a seguinte fórmula.

(7)

$$P_1 = \frac{100 \times P}{100 + P} = \frac{100 \times 5,65}{100 + 5,65} = 5,34$$

Onde:

P₁ = teor de ligante corrigido em %.

Com esse valor pode-se fazer a composição do traço em diferentes porcentagens de material. Este traço está apresentado na tabela 29.

Para moldar os corpos de prova foi necessário calcular a quantidade em massa de cada componente. A massa total necessária era de 4,5 kg, considerando que moldar-se-iam 3 corpos de prova mais perdas. A massa necessária está informada na tabela 30 a seguir.

Tabela 29. Composição em % da mistura.

Composição do traço em diferentes %	
CM	5,34
MATERIAIS %	94,66
M-1=	27
M-2=	37,86
M-3=	11,93
M-4=	17,89

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Tabela 30. Composição da mistura em massa.

Massa para 4,5 kg	
CM=	240,3
M-1=	1215
M-2=	1703,7
M-3=	536,85
M-4=	805,05

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

6.2.3 Preparação e Execução dos Corpos de Prova

Segundo a apostila de Transportes II da UNITAU, para a preparação dos corpos de provas deve-se garantir que os agregados estejam a uma temperatura de 60°C. Desta forma, após aquecer em estufa, os agregados estavam preparados para mistura. Para garantir as devidas proporções, pesou-se os materiais. Esse procedimento foi registrado e será apresentado na figura 24, página 51.

Os corpos de prova foram moldados em cilindros anteriormente lubrificados e compactados com ajuda de soquete com 75 golpes por face. A figura 25 abaixo ilustra essa compactação.

Afim de se ter dados comparativos, decidiu-se realizar mais que uma mistura variando a sequência de mistura e também a composição da mistura. Primeiramente, misturou-se os agregados estando a temperatura ambiente (25°C) e moldou-se os corpos de prova. Em seguida, misturou-se apenas brita, pedrisco e areia com o ligante, compactando os corpos de prova posteriormente. Por último, decidiu-se misturar a borracha por último, depois de já se ter misturado os demais agregados com o ligante.

Nestes dois últimos casos, observou-se diferença visual na mistura. Essa diferença está ilustrada nas figuras 26 e 27 a seguir.

Figura 24. Pesagem dos componentes da mistura.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 25. Moldagem e compactação dos corpos de prova.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 26. Mistura dos agregados com ligante e com borracha.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Figura 27. Mistura dos agregados com ligante sem borracha.



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

No total, moldou-se e compactou-se 8 corpos de prova. Os mesmos foram levados a estufa por 36 horas a 60°C para que a constância de peso fosse obtida. Após decorrido este tempo, os mesmos foram retirados da estufa para deixar que atingissem a temperatura ambiente. Neste ponto, os corpos de prova foram retirados do cilindro.

Voltou-se com o CP, agora desenformado, para a estufa durante uma hora a 35°C. Logo após, os mesmos foram rompidos e ensaiados segundo o que descreve o Ensaio Marshall.

7 RESULTADOS

Todo os ensaios foram baseados em normas específicas padronizadas pelos órgãos responsáveis como o DNIT, DNER e etc. Contudo, ocorreu uma série erros e resultados não esperados, que só foram entendidos posteriormente.

O trabalho se baseou no processo de mistura à frio por via seca. Os resíduos de borracha de pneu foram dispostos para atuar como um agregado e não como um agente modificador do ligante, sendo que nesse processo não foram necessários equipamentos especiais para a incorporação da mesma. Dessa forma, o método de incorporação do material ao conjunto seria possível por apenas dois métodos, o método PlusRide e o sistema genérico (generic system). Sendo assim, utilizar o método de Rothfuchs estaria logo de início incorreto e incoerente com o estudado até o momento.

Em relação ao peso total da mistura, esses sistemas permitem a incorporação de até 3% de borracha com diâmetros que variam entre 2 e 5,35 mm e o tipo de asfalto utilizado pode ser o mesmo das misturas convencionais, devendo apenas que a quantidade seja de 1,5 a 2% maior que está (BERTOLLO, 2002). Já no método Marshall, volume de vazios é o único critério utilizado para a determinação do teor ótimo de asfalto, que deve variar entre 2% a 4% dependendo do volume de tráfego. Nesse sentido, percebe-se que o valor de 17% de borracha adicionados foram não somente incorretos como também muito acima do valor indicado por um método utilizado internacionalmente, mostrando a ineficiência do método de Rothfuchs para a questão. A quantidade de emulsão asfáltica utilizada está de acordo pois o método utilizado para sua determinação foi exatamente o método Marshall.

Após o término de compactação dos corpos de prova foi observado o fenômeno de expansão da mistura, que está relacionado à complexa interação entre tipo de borracha/graduação, porcentagem de borracha e ligante e temperatura durante o processo de compactação. Como a temperatura foi controlada do início ao fim do processo, acredita-se que o fenômeno foi causado e potencializado por falha nas demais variáveis, resultando nas falhas evidenciadas durante os ensaios.

A fluência encontrada foi muito maior do que a esperada e a estabilidade Marshall não pode ser verificada em alguns dos corpos de prova pois os mesmos rompiam antes mesmo de se realizar o ensaio e os demais rompiam com baixíssimas cargas.

Partindo de observações visuais durante o experimento, resolveu-se modificar por completo a forma de preparar e as quantidades da mistura. Inicialmente adicionou-se a porcentagem de areia, brita, pó de pedra e a emulsão. Todos foram misturados, apresentando

características uniformes. A seguir misturou-se apenas um quarto da porcentagem de borracha fazendo com que a mistura começasse a apresentar pontos de falha, e a borracha em contato com a emulsão formasse pequenos glóbulos dentro da mistura. Conforme se foi acrescentando o restante de borracha, percebeu-se que a brita e o pó de pedra, antes banhado completamente por emulsão, agora já estavam quase livres desta, e apenas borracha, areia e emulsão compunham a mistura. Diante disto, observou-se que por um simples conceito de atração e repulsão de moléculas, todas as moléculas de emulsão eram atraídas pelas partes de borracha, impedindo que a mesma se desprendesse e se juntasse aos demais componentes.

8 CONCLUSÕES

Na pesquisa realizada em 2015 dentro do programa BAAE, as misturas realizadas com adição de borracha dosadas e moldadas pela norma DNER 043 apresentaram resultados de estabilidade e fluência dentro do esperado, bem como um aspecto granular mais estável e com menos vazios superficiais, sugerindo que as adições feitas atingiram a necessidade para esse tipo de mistura. Essas misturas possuíram menor densificação, porém volume de vazios dentro do esperado, ou seja, densidade menor que 2,452 g/cm³ e volume de vazios entre 3 e 5%.

Para aos parâmetros mecânicos investigados, as misturas com borracha apresentaram RBV e VAM inferiores aos da mistura de referência e ao estipulado pela norma DNIT 031. Para este, acredita-se que decorreu do fato de a borracha possui características longitudinais provocando redução no intertravamento entre os agregados e consequente redução dos valores dos parâmetros analisados. Com relação a isso, considerou-se que se a borracha possuísse mais proporção de matéria fina e sem tais características, estes parâmetros seriam compatíveis.

Já a incorporação de resíduos de borracha de pneus em mistura a frio não se mostrou satisfatória. Ficou evidenciado que, devido a atração e repulsão de moléculas, a emulsão utilizada atraía todas as partículas de borracha de pneu, fazendo com que os demais agregados ficassem expostos e não homogêneos na mistura, tornando inviável a combinação de ambas para obtenção dos resultados e objetivos inicialmente previstos. Ou seja, a borracha adicionada a emulsão funcionou como um polímero, absorvendo líquidos e inchando. A quantidade que absorvida foi dependente do tipo de polímero e da natureza, temperatura e viscosidade da emulsão, que agiu como um solvente orgânico.

Comparando os resultados deste trabalho com o estudo previamente realizado, percebe-se que quando se trata de mistura a quente, a atração entre as moléculas não é um fator decisivo, considerando que os resultados obtidos nesses estudos foram considerados satisfatórios e aceitos, tornando sua aplicação viável.

Pode ser observado também que a granulometria do agregado borracha utilizada para a mistura foi inferior ao que anteriormente se havia estudado, dado que este acabou modificar o ligante asfáltico ao invés de participar da mistura apenas como enchimento.

O interesse mundial por soluções sustentáveis por meio da reciclagem ou reuso pode contribuir de forma significativa na diminuição da liberação de matéria no meio ambiente. Dessa forma, o uso de resíduos de pneus em pavimentos asfálticos surge como alternativa para um descarte mais “limpo” de pneus velhos ou fora de utilização que tanto contribuem para poluição de rios e mares, causando enchentes e propagando doenças. Seguindo o cenário atual

cenário de consumo e descarte indevido, os índices de poluição e degradação só tende a aumentar.

De forma geral, o ensaio não retornou nenhum parâmetro compatível com o exigido pela norma do DNER 107 (1994). Contudo ressalta-se que todo esse estudo serve como base pesquisas futuras, onde estas devem partir do princípio de que deve ser considerado a atração das moléculas de emulsão pela borracha, a formação da película interfacial e a composição química dos demais agregados utilizados. Há a preocupação em salientar que é necessário se investir no estabelecimento de procedimentos padronizados para os projetos e avaliação de misturas asfálticas modificadas por adição de resíduos de borrachas de pneu, juntamente com as especificações de tipo e teor de cimento asfáltico e emulsão, tipo e granulometria da borracha, temperaturas e compactação da mistura, entre outros, que estão relativamente indefinidos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6300: Emulsões asfálticas-Determinação da resistência a água (adesividade). Disponível em:
< <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=317027> >. Acesso em: 20 set. 2016.

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Manual básico de emulsões asfálticas:** soluções para pavimentar sua cidade. Brasil, 2001.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº19, de 11 de julho de 2005.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Indicadores de atividades do setor.** Disponível em:< <http://www.anip.com.br> >. Acesso em: 10 set. 2016.

BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; VILLAYERDE, R. B.; MIGOTTO FILHO, D. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista de limpeza pública**, n. 54, p. 23-30, 2000.

BETUNEL – Tecnologia em asfaltos. **Emulsões convencionais.** Disponível em:
<http://www.betunel.com.br/emulsoes_convencionais.html>. Acesso em: 25 set. 2016.

BRASQUIMICA – Produtos Asfálticos Ltda. **Emulsões asfálticas para pavimentação.** Disponível em < http://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg_pub_det.cfm/emulsoes-asfalticas-para-pavimentacao>. Acesso em: 25 set. 2016.

CALDATO, DA SILVA. S.C. **Ensaio comparativos de misturas asfálticas pré-misturado a frio com adição de borracha de pneu.** 2008. 102 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência e tecnologia dos Materiais). Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

CLERMAN, D. S. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus.**2004. 125 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2004.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SANTA CATARINA. **DNER/SC.** Especificações gerais para obras rodoviárias. Florianópolis, 2013. Disponível em: < http://deinfra.sc.gov.br/jsp/relatorios_documentos/doc_tecnico/download/engenharia_rodovia_ria/Especificacao_de_Servico-CAUQ_normal.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 035: Agregados** – determinação da abrasão “Los Angeles”, 1998. Disponível em: < http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20035-98.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 054:** Equivalente de areia, 1997. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me054-97.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 059**: emulsões asfálticas – determinação da resistência à água (adesividade) (ABNT NBR 6300), 1994. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me059-94.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 083**: agregados–análise granulométrica, 1994. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 086**: agregado – determinação do índice de forma, 1994. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me086-94.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 089**: agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, 1994. Disponível em: < http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20089-94.pdf>. Acesso em: 13 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 107**: mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica – ensaio. Marshall, 1994. Disponível em: < <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me107-94.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ES 317**: pavimentação - pré-misturados a frio, 1997. Disponível em: < <http://www1.dnit.gov.br/normas/PAV%20Flexiveis%20-%20Pre-Misturado%20a%20Frio.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ES 369**: emulsões asfálticas catiônicas, 1997. Disponível em: < <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/DNER-EM369-97.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – DNER. **Manual de pavimentação**, 1996. Disponível em: < https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 16 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – **DNIT 031**. pavimentos flexíveis – concreto asfáltico. especificação de serviço, 2004. Disponível em: http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/DNIT031_2006_ES.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – **DNIT 165**. emulsões asfálticas para pavimentação. especificação de material, 2013. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit165_2013_em.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

GRECA, M.R.; MORILHA, A.J. **Asfalto borracha**. Curitiba: Ecoflex, 2003.

IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: < <https://www.ibp.org.br/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

MORILHA JUNIOR, A; DANTAS, G. A. **Aplicações práticas de ligantes asfálticos modificados por borracha de pneus de alta viscosidade**, 2002.

ODA, S.; NASCIMENTO, L.A.H; EDEL, G. Aplicação de asfalto-borracha na Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3.,2005, Bahia. **Anais...** Bahia: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP ,2005.

ODA, S, **Análise da viabilidade técnica do uso de ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Tese de Doutorado.2002. 251 f. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP. 2002.

PAVIMENTAÇÃO asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A. **Pré-misturado a frio (PMF)**. Disponível em: < <http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/0/09702B401A66490F03256DAD004A7381?OpenDocument&Sasfalto>> Acesso em: 24 set. 2016.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Brasil, 1993.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, v. 1, p.282-298, 1997.

SILVA JUNIOR, C. A.P.; SÓRIA, M.H.A. Influências da perda de umidade antes da compactação em misturas de areia-asfalto a frio feitas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta. Panorama nacional de Pesquisa em Transportes 2000. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 14, Gramado. **Anais...** Gramado: ANPET, 2000. p. 485 a 496.

SINPEC –Sindicato Nacional da Industria de Pneumáticos. **Quase 200 anos de tecnologia na busca de um rodar mais seguro**. Disponível em: < <http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/>> Acesso em: 30 set. 2016.

VILLAYERDE, R. B.; MIGOTTO FILHO, D. BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista de Limpeza Pública**, n.54. p. 23-30, 2000.

WALLER JUNIOR, H.F. Emulsion mix design methods: an overview. **Transportation research board**. n.754. p.1-9. Washington, DC 1980.