	1. Relatório Número: CCR-ND-FRESP- RF-MAR/2018	
	2. Data do Relatório: Março de 2018	3. Páginas: 92
4. Título da Pesquisa: “Reciclagem de Pavimentos Asfálticos com Espuma de Asfalto Etapa 1: Estudo Laboratorial”		
5. Responsável pela coordenação da pesquisa: Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR	6. Relatório Elaborado para: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	
7. Relatório preparado por: Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR) Valéria C. de Faria (CPR)		
8. Resumo: A conservação de pavimentos asfálticos gera resíduos usualmente chamados de “material fresado” ou simplesmente “fresado”. Esse material apresenta características mecânicas muito boas e, quando estabilizado, pode ser reaproveitado na restauração de pavimentos. Neste estudo avaliou-se a estabilização do fresado com espuma de asfalto. O método consiste em pulverizar os materiais e misturá-los com água e espuma de asfalto, para posteriormente serem compactados e conformar uma nova camada de base estrutural do pavimento. A característica principal deste material resultante é que não apresenta ligação contínua, já que as partículas de fresado não são completamente cobertas pela espuma de asfalto. O objetivo desta pesquisa foi investigar um pouco mais sobre esta técnica, por meio de levantamento bibliográfico. Foram identificados os ensaios mais adequados para realizar um programa laboratorial e estudar por meio de ensaios as características mecânicas deste material estabilizado.		
9. Palavras Chave: Fresado asfáltico. Reciclagem de pavimentos. Espuma de asfalto. Ensaio triaxial.		

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	- 4 -
2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A)	- 6 -
2.1. FRESADO ASFÁLTICO	- 6 -
2.2. <i>Reciclagem de pavimentos asfálticos</i>	- 9 -
2.3. RECICLAGEM A FRIO	- 11 -
2.4. RECICLAGEM A FRIO COM ESPUMA DE ASFALTO	- 11 -
2.5. DOSAGEM DA MISTURA DE FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO	- 14 -
2.5.1. <i>Dosagem da espuma de asfalto</i>	- 14 -
2.5.2. <i>Granulometria do material estabilizado</i>	- 17 -
2.5.3. <i>Adição de fíleres</i>	- 21 -
2.5.4. <i>Umidade de mistura</i>	- 22 -
2.5.5. <i>Determinação do teor de espuma de asfalto</i>	- 24 -
2.6. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO FRESADO ESTABILIZADO COM ESPUMA DE ASFALTO	- 30 -
3. MÉTODOS E MATERIAIS (ETAPA B)	- 38 -
4. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA B)	- 45 -
4.1. MATERIAL FRESADO	- 45 -
4.1.1. <i>Coleta e caracterização granulométrica</i>	- 45 -
4.1.2. <i>Teor de ligante asfáltico residual</i>	- 47 -
4.1.3. <i>Características de resistência ao desgaste</i>	- 49 -
4.2. LIGANTE ASFÁLTICO	- 50 -
5. DOSAGEM DAS MISTURAS DE FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO (ETAPA C)	- 52 -
5.1 AMOSTRAS DO ESTADO DE SÃO PAULO	- 52 -
5.1.1. <i>Correção Granulométrica</i>	- 52 -
5.1.2. <i>Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima</i>	- 56 -
5.1.3. <i>Determinação do teor de espuma asfáltica</i>	- 57 -
5.1.3.1. <i>Cal hidratada como fíler</i>	- 57 -
5.1.3.2. <i>Cimento Portland como fíler</i>	- 61 -
5.2 AMOSTRAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	- 63 -
5.2.1. <i>Correção Granulométrica</i>	- 63 -
5.2.2. <i>Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima</i>	- 65 -

5.2.3. Determinação do teor de espuma asfáltica	- 66 -
5.2.3.1. Cal hidratada como fíler	- 66 -
5.2.3.2. Cimento Portland como fíler	- 69 -
6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA D).....	- 73 -
6.1. RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL	- 73 -
6.1.1. MATERIAIS COLETADOS NO ESTADO DE SÃO PAULO	- 73 -
6.1.1.1. Módulo de Resiliência Diametral.....	- 73 -
6.1.1.2. Resistência à tração por compressão diametral	- 76 -
6.1.2. RESULTADOS PARA OS MATERIAIS COLETADOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	- 79 -
6.1.2.1. Módulo de Resiliência Diametral.....	- 79 -
6.1.2.1. Resistência à tração por compressão diametral	- 82 -
6.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	- 85 -
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	- 88 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 90 -

1. INTRODUÇÃO

A técnica de fresagem de pavimentos é muito utilizada na Rodovia Presidente Dutra nas atividades de manutenção e restauração de pavimentos. O resíduo gerado dessas atividades é o comumente chamado “material fresado” ou simplesmente “fresado”.

A reciclagem dos pavimentos asfálticos, por meio do reaproveitamento do fresado, vem se incrementando no mundo inteiro e também no Brasil, como uma técnica atrativa para restaurar pavimentos existentes. A popularidade dessa técnica deve-se principalmente ao fato de atender aos objetivos atuais da sociedade em reduzir o consumo de recursos naturais, de energia e a emissão de poluentes ao meio ambiente.

Na atualidade existem várias alternativas para reaproveitar o material fresado. Uma alternativa é na produção de novos concretos asfálticos à quente, para sua aplicação em revestimentos asfálticos. Nesse caso, as porcentagens de fresado reciclado oscilam de 10% a 30% e podem alcançar até 50% ou mais com o emprego de aditivos rejuvenescedores.

Outra possibilidade é reaproveitar o material fresado a frio para restaurar as bases e sub-bases dos pavimentos. Nesses casos 100% do material fresado pode ser reaproveitado por meio de sua estabilização com agentes cimentantes (cimento Portland, cal hidratada), materiais asfálticos (emulsão asfáltica e espuma de asfalto) ou pela combinação destes.

A reciclagem de pavimentos com espuma de asfalto permite restaurar as camadas de revestimento asfáltico e até as camadas de bases. O método consiste, basicamente em pulverizar os materiais e misturá-los com água e a espuma de asfalto para posteriormente serem compactados e conformar a nova camada de base estrutural do pavimento. Após esse processo, é aplicada uma nova camada estrutural de revestimento asfáltico.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar laboratorialmente a técnica de estabilização do fresado com espuma de asfalto, já que é uma técnica ainda pouco investigada no país, mas com crescente desenvolvimento e aceitação internacional desde a metade da década de 1990.

Inicialmente na pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico da técnica de espuma de asfalto e seu emprego na estabilização de material fresado. No Capítulo 2 deste relatório são apresentadas as principais informações obtidas em diversos meios de divulgação.

O Capítulo 3 deste relatório apresenta os métodos e ensaios empregados no programa laboratorial, que foi executado no laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra. Já o Capítulo 4 resume as atividades de seleção e coleta realizadas para obter materiais fresados representativos da Rodovia Presidente Dutra.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da dosagem do material fresado estabilizado com espuma asfáltica. Após essa dosagem, os teores de projeto selecionados foram empregados para moldar corpos de prova utilizados na análise dos parâmetros mecânicos da mistura estabilizada. Essa etapa foi realizada no CPR e no Laboratório da Copavel Consultoria de Engenharia Ltda. e os resultados estão apresentados no Capítulo 6.

Finalmente, no Capítulo 7 deste relatório apresentam-se de forma resumida as considerações e conclusões realizadas ao longo desta pesquisa.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A)

O desenvolvimento da sociedade exige a ampliação e manutenção da infraestrutura de transportes para atender às necessidades básicas de intercâmbio de bens e produtos. No Brasil, o modo Rodoviário representa mais de 60% das cargas transportadas, com uma frota que cresceu mais de 180% nos últimos 15 anos (CNT, 2016).

A construção de novas rodovias demanda consumo elevado de recursos naturais e econômicos. Depois de um determinado período, as ações do tráfego de veículos pesados e as condições do clima deterioram os pavimentos rodoviários. Assim, é fundamental conservar o patrimônio construído por meio de atividades de manutenção e restauração, para garantir o tráfego dos veículos com segurança, economia e conforto.

Nos últimos anos, diferentes pesquisas têm buscado aplicar os conceitos de sustentabilidade nas atividades de manutenção dos pavimentos rodoviários, especialmente em aqueles com revestimento asfáltico. Uma parte dos estudos envolvem o reaproveitamento de resíduos originados em outras indústrias, tais como, pneus inservíveis, escoria de aciaria, areia de fundição, cinzas de termelétrica, fosfogesso. Outras pesquisas têm focado na reutilização de resíduos gerados na própria restauração dos pavimentos, por exemplo, o fresado asfáltico, que é o assunto de investigação neste projeto.

2.1. Fresado asfáltico

Durante muitos anos, as estradas foram conservadas pelo incremento sucessivo de revestimentos asfálticos, na procura de estender o máximo possível sua serventia. Contudo, essa técnica gerou problemas com relação aos gabaritos que deveriam ser conservados em obras de arte e com os dispositivos de drenagem, além de gerar desníveis entre a pista de rolamento e o acostamento, (TUCHUMANTEL, 1999).

Para minimizar esses problemas se desenvolveu a fresagem de pavimentos, como uma técnica apropriada para remover, em profundidade pré-estabelecida, o pavimento deteriorado. A fresagem do revestimento asfáltico gera o resíduo denominado fresado asfáltico, ou simplesmente fresado.

As fresadoras foram especialmente desenvolvidas para realizar as atividades de fresagem em pavimentos asfálticos. São equipamentos tratores, usualmente montados em esteiras e munidos de um tambor fresador que gira com elevadas revoluções em sentido contrário ao avanço. Na Figura 2.1 é apresentado o esquema básico de uma fresadora. No tambor fresador são fixados os “bits” ou dentes de corte que realizam o desbaste do pavimento, conforme apresenta a Figura 2.2.

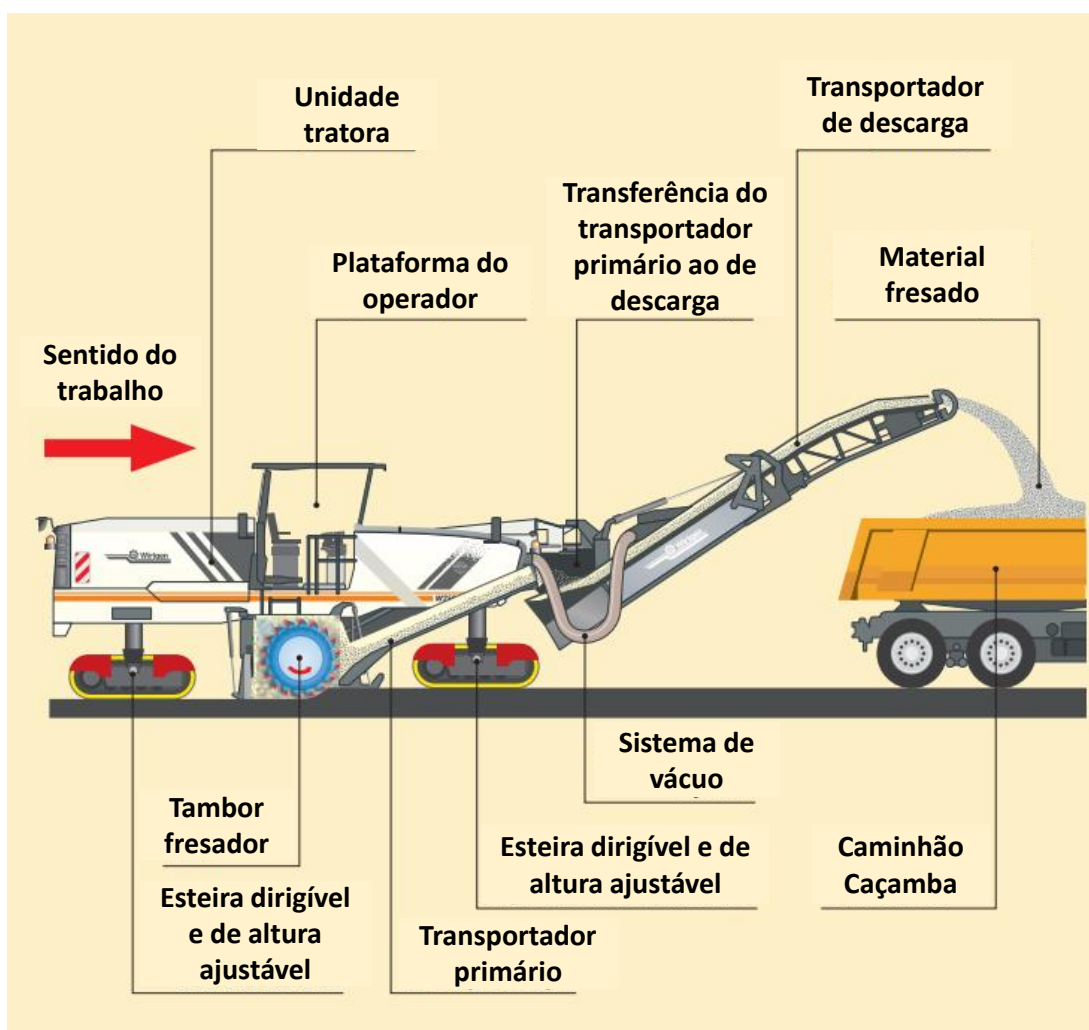


Figura 2.1. Esquema da operação de uma fresadora. FONTE: www.wirtgen.com



Figura 2.2: Detalhe dos “bits” ou dentes de corte fixados no tambor fresador. FONTE:

www.wirtgen.com

O material fresado pode ser destinado a locais especiais de descarte (Figura 2.3). No entanto, devido às suas boas propriedades mecânicas, pode ser reutilizado em substituição de materiais virgens. Esse resíduo apresenta características que dependem:

- da granulometria da mistura asfáltica original;
- do estado de deterioração do revestimento asfáltico;
- da temperatura ambiente;
- do tipo de fresadora;
- das condições de operação da fresadora, quanto à velocidade e profundidade de corte.



Figura 2.3: Descarte de material fresado

2.2. Reciclagem de pavimentos asfálticos

A reciclagem de pavimentos asfálticos é um conceito que acompanhou o desenvolvimento da construção rodoviária desde os inícios, mas que ganhou força na década de 1970 devido à crise mundial do petróleo e ao desenvolvimento de equipamentos apropriados para a reciclagem (ARRA, 2001). Basicamente, a reciclagem de pavimentos asfálticos, é baseada no princípio que os materiais existentes no pavimento são uma fonte de recursos que devem ser reutilizados para construção de novas camadas de pavimentos.

De acordo com a ARRA (2001), o emprego da reciclagem como técnica de conservação de pavimentos apresenta as seguintes vantagens:

- reuso e conservação de recursos naturais não renováveis;
- preservação do meio ambiente e redução do uso de aterros sanitários;
- economia no consumo de energia;
- redução de atrasos durante as obras;
- diminuição da duração das obras;
- aumento na segurança dos usuários nas áreas das obras;
- conservação da geometria e gabaritos da rodovia e obras de arte;
- correção das inclinações da superfície do pavimento;
- não altera as camadas mais profundas já consolidadas, (com exceção da reciclagem profunda);
- os pavimentos reciclados apresentam baixos níveis de irregularidade superficial;
- o material reciclado pode ser estabilizado granulometricamente ou com a adição de agentes estabilizantes, para obter um material com ótimas propriedades mecânicas;
- mitigação ou eliminação dos riscos de reflexão de trincas;
- demandam custos menores, quando comparados com técnicas tradicionais de restauração de pavimentos.

De acordo com Pinto (1989), a Prefeitura Municipal da Cidade do Rio de Janeiro, na década de 1960, executava a reciclagem de revestimentos betuminosos por meio da sua remoção com martelotes e seu transporte para usina, onde era remisturado. Já a Rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas, foi a primeira rodovia brasileira a ser restaurada pela técnica de reciclagem.

Existem diversas formas de realizar o reaproveitamento dos materiais rodoviários. Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo das classificações de reciclagem de pavimentos, adaptado de Bonfim (2001) e de Da Costa (2016).

Tabela 2.1: Tipos de reciclagem de pavimentos

Camada fresada	somente revestimento
	reciclagem profunda
Temperatura	a quente
	morna
	a frio
Estabilizante	nenhum
	agregados novos
	cal
	cimento Portland
	ligante asfáltico
	espuma de asfalto
	emulsão asfáltica
Local de processamento	<i>in Situ</i>
	em usina
	mista
Camada de aplicação	revestimento
	base

Na Tabela 2.1 observa-se que pode ser reciclada apenas o revestimento asfáltico ou todas as camadas dos pavimentos, na denominada reciclagem profunda, ou *Full-Depth Reclamation* (FDR). Esta técnica é apropriada, por exemplo, a pavimentos de pista dupla, nos quais as faixas externas sofrem maior grau de deterioração e, portanto, exigem técnicas de restauração mais profundas.

Neste estudo o objetivo é estudar a reciclagem de pavimentos a frio, com incorporação de espuma de asfalto, agregados novos e cal hidratada. Assim, a seguir será descrito com maior detalhe as características deste tipo de material.

2.3. Reciclagem a frio

A técnica de reciclagem de pavimentos a frio dispensa a aplicação de calor nos processos de estabilização dos materiais reciclados e, em vista disso, é considerada a mais eficiente. Pode ser executada *in situ* com as recicladoras ou em usinas fixas ou móveis, sendo que sua aplicação *in situ* apresenta vantagens econômicas por dispensar o transporte do material reciclado até as usinas.

Com relação às camadas recicladas, esta técnica pode ser aplicada apenas no revestimento asfáltico ou em todas as camadas do pavimento. No segundo caso, o material reciclado resultante é destinado a compor as camadas de base ou sub-base, devido à sua variabilidade. Usualmente, sobre esta camada reciclada é aplicado um revestimento de concreto asfáltico usinado à quente.

A reciclagem a frio apresenta a vantagem de reciclar até 100% das camadas de pavimentos, sendo usuais valores de 90% (DNER, 1997). No entanto, o material reciclado pode ser estabilizado granulometricamente com a incorporação de agregados minerais novos e fíleres do tipo cimento Portland ou cal. Também pode ser adicionado ligante asfáltico na forma de emulsão asfáltica ou espuma de asfalto.

2.4. Reciclagem a frio com espuma de asfalto

O conceito de espuma de asfalto foi desenvolvido no ano 1956 pelo Professor Ladis Csanyi na *Iowa State University Engeneering Experiment Station*. Na época, o Professor introduziu uma pequena quantidade de água vaporizando ligante asfáltico aquecido a 177°C, promovendo a expansão do asfalto em aproximadamente 15 vezes. Esse processo produziu um ligante asfáltico espumado, similar ao creme de barbear, e reduziu consideravelmente sua viscosidade. A espuma apresenta a vantagem de facilitar sua mistura com ingredientes frios e até úmidos, nos quais se impregna sem enrijecer imediatamente, (Raffaelli, 2004).

O primeiro registro do uso da espuma de asfalto é de 1957 em uma rodovia do condado de Iowa, Estados Unidos. Algumas outras aplicações contemporâneas foram realizadas no Estado de Arizona e no Canadá, (Kowalski e Starry, 2007).

No ano 1968, a companhia australiana *Mobil Oil* modificou e melhorou o processo pela injeção de água atomizada e pressurizada a temperatura ambiente, em uma câmara de expansão. Essa técnica foi patenteada logo depois na América do Norte, o que limitou sua disseminação técnica nos Estados Unidos até expiração da patente. Durante esse período, países da Europa, Austrália e África

do Sul utilizaram esta técnica em vários projetos com sucesso e desenvolveram suas especificações para o emprego da espuma de asfalto (Kowalski e Starry, 2007).

Distintos fabricantes de equipamentos perceberam o potencial da espuma de asfalto para sua aplicação na reciclagem de pavimentos e investiram no desenvolvimento da técnica para melhorar sua confiabilidade e a segurança da sua aplicação.

A tecnologia atual para espumar o asfalto controla com bastante precisão o volume e a proporção dos três ingredientes que ingressam na câmara de expansão: asfalto, água e ar. A água a temperatura ambiente ao entrar em contato com o ligante asfáltico quente é explosivamente transformada em vapor e é preso em milhares de pequenas bolhas de asfalto. Esse fenômeno origina uma mudança temporária das propriedades físicas do ligante asfáltico, já que as bolhas de espuma de asfalto se desmancham em menos de um minuto, (Wirtgen, 2012). Na Figura 2.4 é apresentada uma ilustração da produção de espuma de asfalto na câmara de expansão.

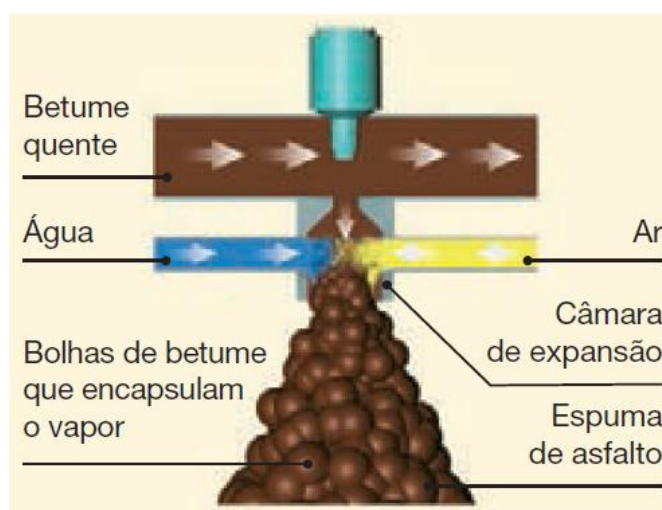


Figura 2.4: Produção de espuma de asfalto na câmara de expansão. FONTE: Wirtgen (2012)

Usualmente é empregado uma parte de ar para duas partes de água. A proporção de água adicionada oscila de 2 a 3% em peso com relação ao ligante asfáltico. A água é injetada na câmara de expansão com uma pressão de aproximadamente 5 bar e, ao entrar em contato com o ligante asfáltico que está aquecido na temperatura média de 175°C, evapora produzindo a expansão do asfalto em torno de 15 a 20 vezes do seu volume original.

O asfalto espumado sai da câmara de expansão por meio de um bico espargidor para ser incorporado aos agregados enquanto ainda estiver em seu estágio espumoso “instável”. Quanto maior o volume da espuma, melhor será a distribuição do betume no agregado, (Wirtgen, 2012).

As bolhas do asfalto espumado estouram ao entrar em contato com os agregados e se aderem às partículas mais finas para formar um mastique. É importante salientar que a umidade do material a ser estabilizado desempenha um papel importante na dispersão do asfalto. Com a compactação, as partículas de asfalto no mastique são pressionadas fisicamente contra os agregados maiores, onde se aderem, gerando ligações localizadas e não contínuas, ao que é chamado de “solda a ponto”, (Wirtgen, 2012). A Figura 2.5 apresenta uma ilustração dessa estabilização do material com espuma, enquanto que a Figura 2.6 apresenta uma fotografia ampliada.

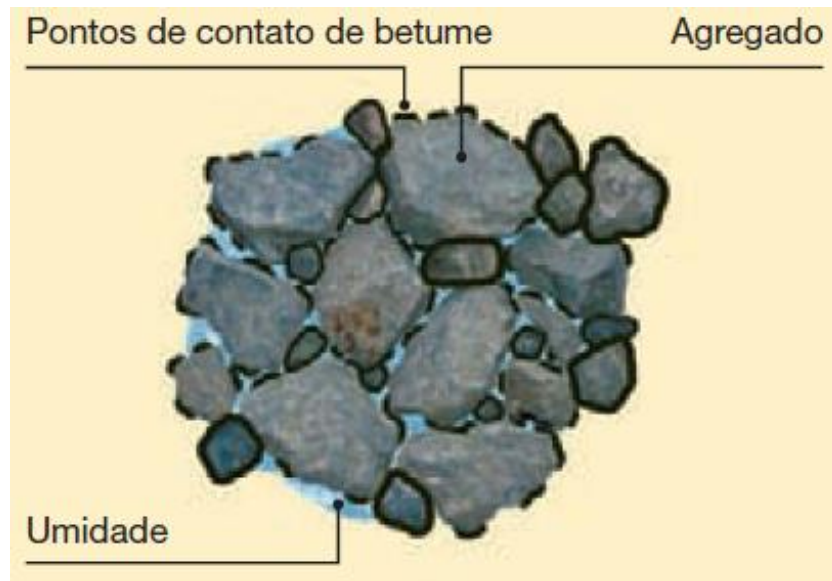


Figura 2.5: Agregados estabilizados com espuma de asfalto. FONTE: Wirtgen (2012)

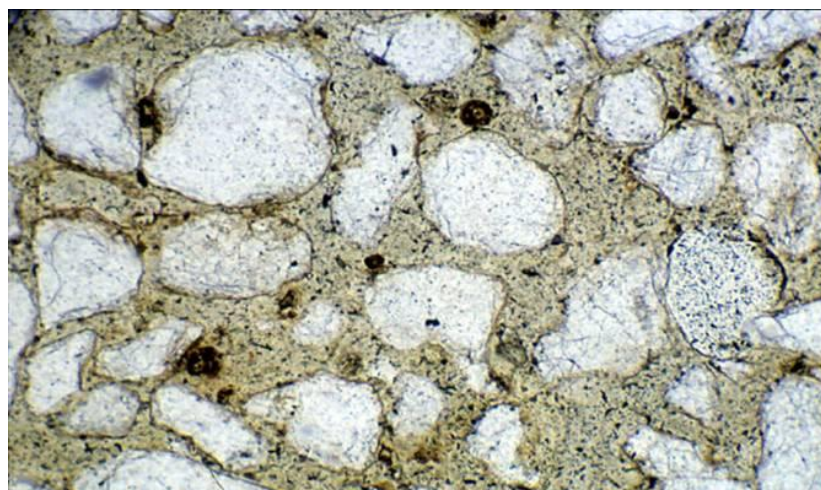


Figura 2.6: Distribuição da espuma de asfalto nos agregados. FONTE: Kowalsky e Starry (2007)

2.5. Dosagem da mistura de fresado com espuma de asfalto

A seguir é realizado uma breve descrição dos passos necessários para desenvolver a dosagem do material fresado com espuma de asfalto. Utilizaram-se como referência o Manual de Reciclagem a Frio da Wirtgen (2012), o TG2 da Asphalt Academy (2009) e o Guia preparado por Jones et al. (2009) para o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans).

2.5.1. Dosagem da espuma de asfalto

A espuma de asfalto é caracterizada pela sua boa distribuição em agregados frios e secos ou úmidos, como foi visto na Figura 2.6. Para atingir essas características devem ser controlados os parâmetros:

- a) Taxa de expansão: avalia a viscosidade da espuma de asfalto, calculada como o coeficiente do volume máximo de espuma em relação ao volume original de ligante asfáltico;
- b) Meia vida: é um parâmetro que indica a estabilidade da espuma de asfalto, calculada como o tempo em segundos que a espuma leva a colapsar até a metade do seu volume máximo.

Para controlar esses parâmetros de taxa de expansão e meia vida da espuma de asfalto é necessário determinar em laboratório:

- a temperatura e o tipo de ligante asfáltico;
- teor de água a ser adicionada;
- pressão de ar.

O equipamento Wirtgen WLB 10S pode ser utilizado para reproduzir em laboratório a espuma de asfalto, conforme ilustram as Figuras 2.7 e 2.8.



Figura 2.7: Equipamento Wirtgen WLB 10S para produzir em laboratório a espuma de asfalto



Figura 2.8: Detalhe da formação de espuma de asfalto no WLB 10S

A Wirtgen (2012) recomenda iniciar o teste de um ligante asfáltico na temperatura de 160°C e adicionar taxas de 2%, 3% e 4% de água a temperatura ambiente, com relação à massa de ligante asfáltico que usualmente é de 500gr. A pressão de injeção de ar utilizada no sistema é de 5bar. No recipiente de coleta da espuma de asfalto é aferida a taxa de expansão e a meia vida, conforme apresenta-se na Figura 2.8.



Figura 2.9: Aferição da taxa de expansão e meia vida da espuma de asfalto

Com as leituras dos parâmetros para distintos teores de água, pode-se construir um gráfico como apresentado na Figura 2.10. Para a Wirtgen (2012), os agregados a serem estabilizados devem apresentar temperatura mínima de 15°C e a espuma de asfalto deve apresentar as seguintes características:

- taxa expansão superior a 8 vezes;
- meia vida de 6 segundos.

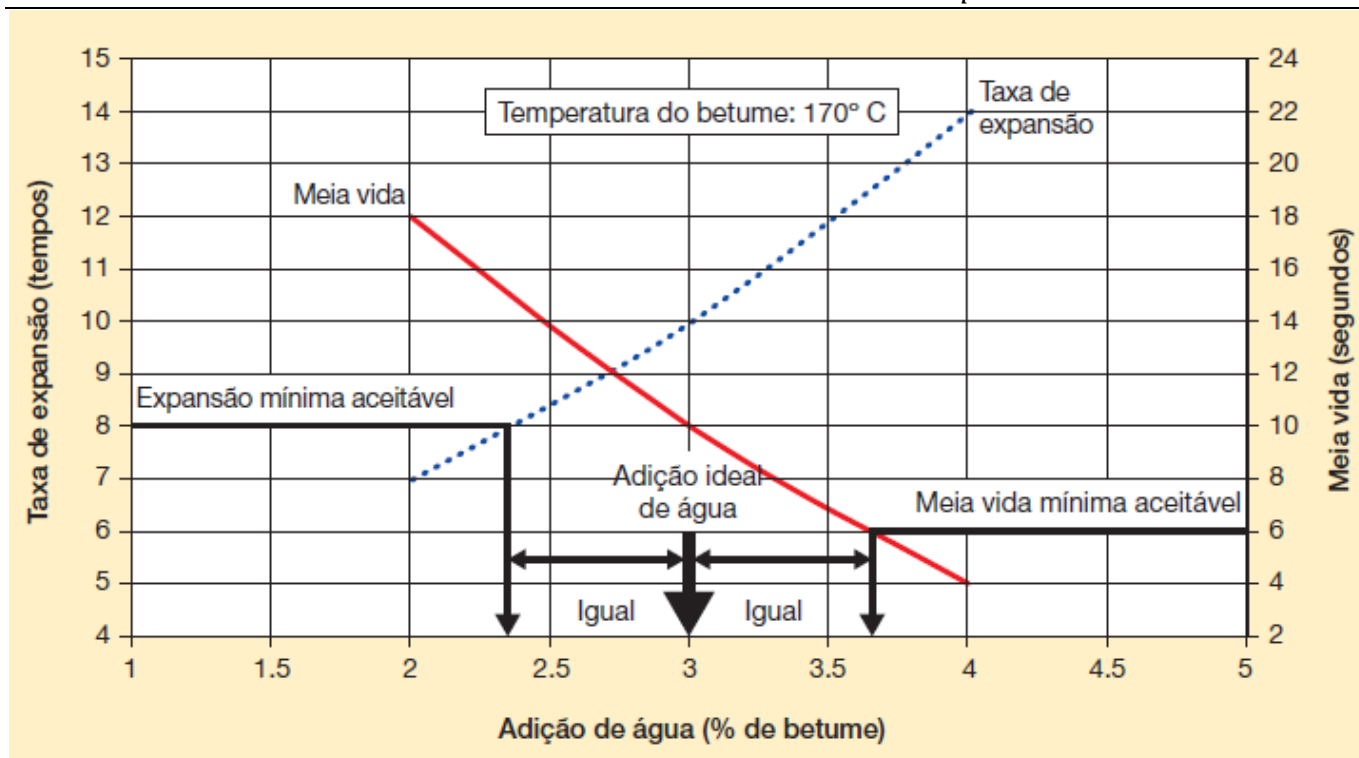


Figura 2.10: Taxa de expansão e meia vida em função do teor de água adicionada no ligante asfáltico. FONTE: Wirtgen (2012)

Os ensaios podem ser repetidos com o ligante asfáltico aquecido a 170 e a 180°C. É usualmente empregado o ligante asfáltico mais comum da região onde será aplicada a técnica de reciclagem com espuma de asfalto. Pinto (2002) no seu estudo laboratorial empregou CAP 50/70, CAP 100/120 e CAP 150/200 e verificou que ligantes asfálticos menos viscosos precisam temperaturas menores para atingirem taxa de expansão adequada e, conseqüentemente, podem ajudar na dispersão da espuma de asfalto nos finos da mistura. Esse comportamento ajudaria a obter um mastique de boa qualidade e evitaria a formação de grumos indesejáveis.

2.5.2. Granulometria do material estabilizado

Diversos materiais podem ser estabilizados com a espuma de asfalto, além do fresado asfáltico. Como se mostra na Tabela 2.2, podem ser também materiais novos, desde um pedregulho bem graduado, até uma areia argilosa.

Tabela 2.2: Teores médios de espuma de asfalto utilizados para distintos tipos de materiais. FONTE: Kendall et al. (1999)

Material	Espuma de Asfalto (%)	Material Adicional
Pedregulho bem graduado	2,0 - 2,5	
Pedregulho silto argiloso	2,0 - 2,5	
Pedregulho argiloso	4,0 - 6,0	Cal
Areia bem graduada	4,0 - 5,0	Fíler (material fino)
Areia siltosa	2,5 - 4,5	
Areia silto argilosa	3,0 - 4,0	Cal
Areia argilosa	3,0 - 4,0	Cal

Com relação ao material fresado, obtido em pavimentos deteriorados, deve-se obter uma amostra representativa para avaliar em laboratório suas características de granulometria e plasticidade. A Wirtgen (2012) recomenda as faixas granulométricas apresentadas na Figura 2.11 e Tabela 2.3. Caso o material fresado não apresente granulometria que se enquadre nessas faixas, é necessário adicionar agregados novos. No material fresado obtido integralmente do fresado asfáltico ou de camadas granulares, usualmente é necessário adicionar pó de pedra britada.

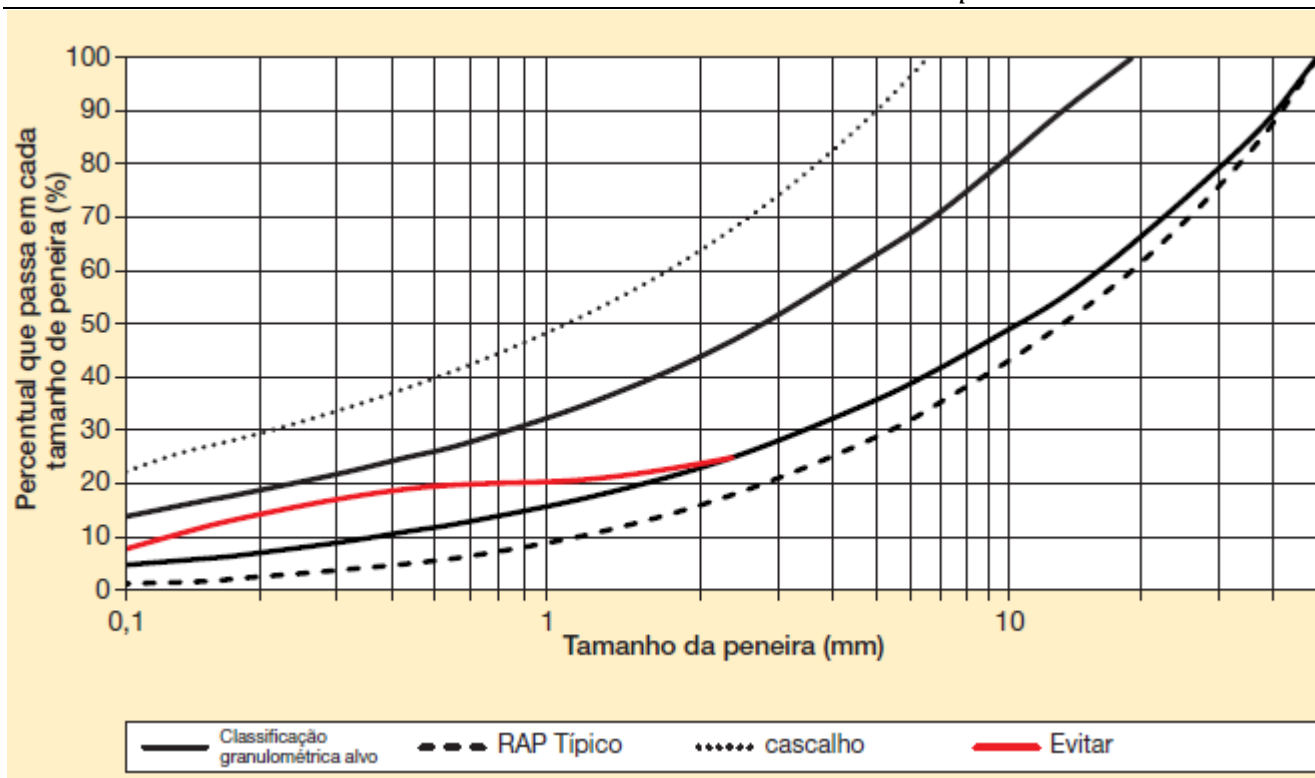


Figura 2.11: Faixa granulométrica para o material fresado. FONTE: Wirtgen (2012)

Tabela 2.3: Faixa granulométrica para o material fresado. FONTE: Wirtgen (2012)

Peneira (mm)	Percentual passante em cada peneira			
	Classificação granulométrica alvo		Material RAP típico	Cascalho natural
	Graúdo	Fino		
50	100	100	100	100
37,5	87	100	85	100
26,5	76	100	72	100
19	65	100	60	100
13,2	55	90	50	100
9,5	48	80	42	100
6,7	41	70	35	100
4,75	35	62	28	88
2,36	25	47	18	68
1,18	18	36	11	53
0,6	13	28	7	42
0,425	11	25	5	38
0,3	9	22	4	34
0,15	6	17	2	27
0,0755	4	12	1	20

Jones e Harvey (2009) desenvolveram um Guia de Reciclagem de Pavimentos a Frio com Espuma de Asfalto, para o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), nos Estados Unidos. Nesse guia também se apresenta uma faixa granulométrica ideal e uma faixa granulométrica com tolerância para controle de campo. Na Tabela 2.4 são apresentadas essas faixas e na Figura 2.12 é realizado um comparativo com as faixas recomendadas pela Wirtgen (2012).

Tabela 2.4: Faixas granulométricas para o material fresado a ser estabilizado. FONTE: Jones et al (2009)

Peneira (mm)	Percentual passante em cada peneira			
	Granulometria Alvo		Granulometria Tolerável	
	Graúdo	Fino	Graúdo	Fino
50	100	100	100	100
37,5	90	100	87	100
19	50	85	45	90
4,75	25	45	20	50
0,6	10	25	6	29
0,075	5	12	5	15

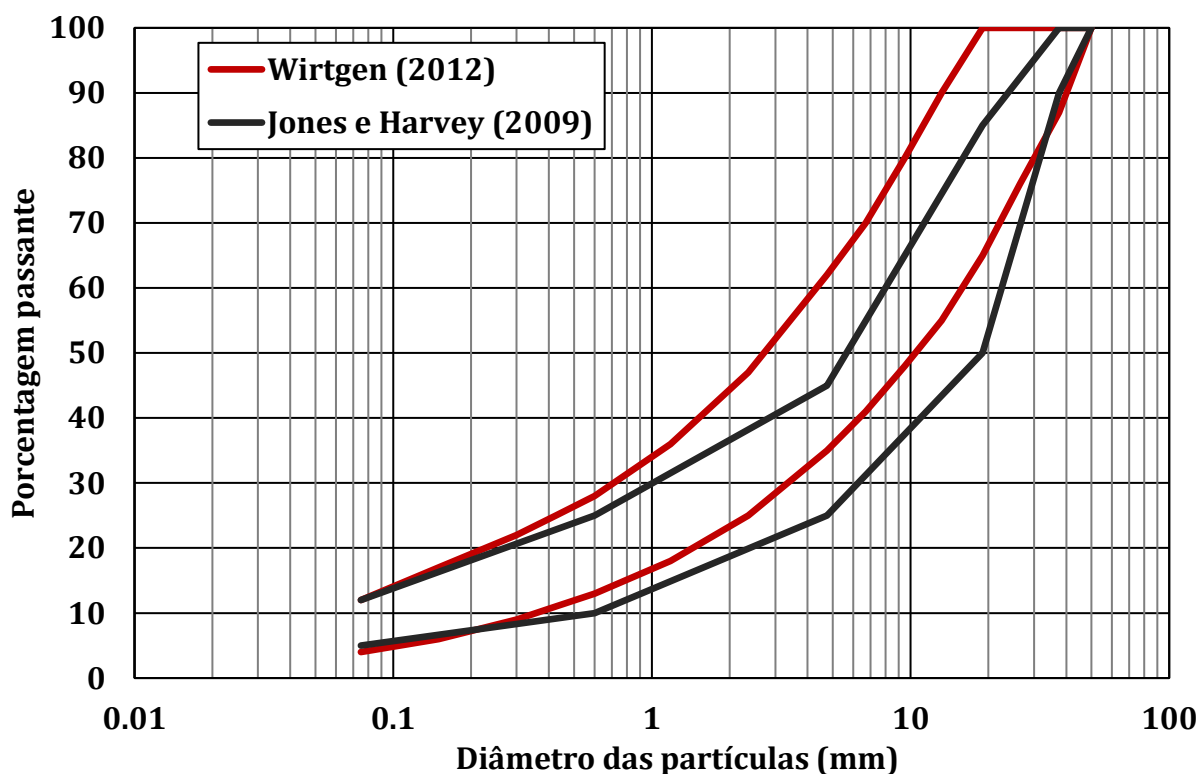


Figura 2.12. Faixas granulométricas do material fresado

2.5.3. Adição de fíleres

O emprego de materiais de enchimento ou fíleres, pode ser utilizado também para corrigir a granulometria do material fresado. O cimento Portland e a cal são usualmente empregados para incrementar a resistência do material estabilizado. Pinto (2002) e De Castro (2003) obtiveram maiores valores de resistência à tração por compressão diametral em misturas recicladas com espuma de asfalto e adição de cimento Portland, quando comparados com os resultados obtidos em misturas recicladas com cal.

No caso de materiais em que é reciclado o revestimento asfáltico junto com bases de granulometria fina, a cal e o cimento Portland, em proporções adequadas, reduzem a plasticidade dos materiais e facilitam sua trabalhabilidade. Outra vantagem do emprego de cal é que permite que o material estabilizado possa ser estocado durante dias, enquanto que o emprego de cimento demanda sua imediata aplicação.

Jones et al (2009), indicam que o cimento Portland é mais recomendado para material pulverizado com origem granítica ou quartzítica. No entanto, recomendam realizar as dosagens com ambos fíleres, cimento e cal, até obter uma certa experiência sobre o uso destes materiais.

O Manual da Asphalt Academy (2009), da República da África do Sul, e o Manual Wirtgen (2012) listam os benefícios da adição de filer na material estabilizado com espuma:

- melhora a aderência do ligante asfáltico com o agregado;
- melhora a dispersão do ligante asfáltico na mistura;
- modifica a plasticidade dos materiais naturais;
- aumenta a rigidez da mistura e a taxa do ganho de resistência;
- acelera a cura da mistura compactada.

Recomenda-se limitar a 1% o emprego de cimento Portland e em torno de 1,5% o teor de cal nas misturas estabilizadas. Essa recomendação tem por objetivo evitar o aumento significativo da rigidez da mistura, que levaria a perda do benefício da flexibilidade do material asfáltico (WIRTGEN, 2012).

Nos casos em que o material reciclado inclui a base do pavimento deteriorado, é possível que na composição final se inclua uma grande quantidade de finos que podem elevar o índice de plasticidade (IP). Assim, inicialmente, devem ser realizados ensaios de consistência no material reciclado para determinação do IP. Para IP inferior a 10 é possível utilizar cal ou cimento, enquanto

que para IP superior a 10, é necessário fazer um tratamento prévio do material reciclado com cal hidratada, no mínimo, duas horas antes da adição de espuma de asfalto, (WIRTGEN, 2012).

2.5.4. Umidade de mistura

O material estabilizado com espuma de asfalto deve conter certa umidade para facilitar sua trabalhabilidade a temperatura ambiente, tanto no seu transporte como na sua compactação. Além disso, a água separa e suspende os finos, disponibilizando-os para o betume durante a mistura e atua como um transportador de “lascas” de asfalto durante a mistura, (Wirtgen, 2012).

Após aplicação e compactação, a água no material estabilizado com espuma de asfalto começa a evaporar, iniciando o processo conhecido como cura. Conforme o teor de umidade é reduzido na mistura, a resistência do material se incrementa, (Wirtgen, 2012).

A determinação do teor de umidade ótimo têm sido motivo de discussões por distintas agências rodoviárias e autores. Jones et al (2009) indicam que o teor de umidade ótimo do material a ser estabilizado pode ser determinado de forma convencional, como realizado para outros materiais rodoviários usuais. Esses autores recomendam seguir a Norma AASHTO T-180 (Método D), que emprega o soquete Proctor grande para produzir a energia modificada. A determinação do teor de umidade ótimo pode ser determinada de acordo com a AASHTO T-265. No entanto, a experiência indica que teores de umidade de 75 a 90% da ótima, são suficientes para alcançar a máxima densificação do material estabilizado com espuma de asfalto em campo.

O Relatório Técnico AP-T247-13 da Agência Rodoviária Australiana (Austroads, 2013) apresenta também guia para o processo de dosagem de material estabilizado com espuma de asfalto. Nesse relatório, recomenda-se utilizar o compactador giratório Superpave (CGS) com 80 giros ou o compactador Marshall com 50 golpes por face no corpo de prova. Nos casos em que o tamanho máximo nominal das partículas do material a ser estabilizado seja superior a 20mm, a Austroads (2013) recomenda empregar corpos de prova com diâmetro de 150mm e adotar energia modificada de compactação. Vale notar que nesse relatório considera-se o emprego de até 4,0% de espuma de asfalto para estabilizar o material fresado.

O Manual da Wirtgen (2012), recomenda iniciar o processo de dosagem pelo ajuste da granulometria do material a ser estabilizado dentro da faixa recomendada, com a adição do fíler ativo selecionado. Em seguida, desenvolve-se o ensaio de compactação em corpos de prova (CPs) de 150mm de diâmetro e 95mm de altura com um compactador vibratório, como mostra a Figura 2.13.

De acordo com o Método 8 da Asphalt Academy (2009), o compactador vibratório precisa ter um peso de 30kg + 1,5kg e deve atender as seguintes especificações:

- Potência de 1.500W
- Frequência de 900 a 1.890 golpes/minuto
- Energia elétrica 25J



Figura 2.13: Compactador vibratório. FONTE: Asphalt Academy (2009)

A energia de compactação com o compactador vibratório é controlada pelo tempo de compactação dos corpos de prova. A Tabela 2.5 apresenta tempos para a compactação de corpos de prova (CPs) estabilizados com espuma de asfalto, adaptada do Método 8 da Asphalt Academy (2009). Nos casos em que é realizada a compactação em mais de uma camada, recomenda-se escarificar para garantir boa aderência entre as camadas.

Tabela 2.5: Recomendações para a compactação de CPs com o compactador vibratório. FONTE: Asphalt Academy (2009)

Fase	Nível 1	Nível 2		Nível 3
Ensaio	Compressão Diametral	Compressão Diametral	Compressão Axial	Triaxial
Diâmetro do CP (mm)	101	152	152	152
Altura do CP (mm)	65	95	125	300
Volume aproximado do CP (cm³)	520	1725	2270	5445
Sobrecarga no compactador (kg)	5	10	10	10
Número de camadas	1	2	2	5
Tempo de compactação (seg)	10/face	25	25	25

A curva de compactação com o compactador vibratório, seguindo as recomendações da Asphalt Academy (2009) é realizada de forma similar ao realizado na metodologia Proctor. Após correção granulométrica do material a ser estabilizado, adiciona-se no material teores crescentes de água, pelo menos cinco, e coleta-se 1kg da amostra para determinação da umidade em estufa a 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova são pesados após compactação e a massa específica seca é determinada para cada teor de umidade. Assim, é possível se traçar a curva de compactação para determinar a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo.

2.5.5. Determinação do teor de espuma de asfalto

Após determinação das características ideais da espuma de asfalto, deve-se determinar laboratorialmente o teor adequado para estabilizar o material fresado dentro da faixa granulométrica recomendada.

A Wirtgen (2012) indica teores prováveis para a estabilização de distintos tipos de material com espuma de asfalto, em função da sua granulometria, como apresentado na Tabela 2.6. Esse valor pode ser considerado o teor central de ao menos cinco teores de espuma de asfalto que devem ser testados no processo de dosagem.

Tabela 2.6: Diretrizes para estimar a adição ideal de espuma de asfalto. FONTE: Wirtgen (2012)

Fração que passa na peneira de 0.075mm	Adição de espuma de asfalto (% por massa de agregado seco)		Tipo característico de material
	Fração que passa na peneira de 4.75mm		
	<50%	>50%	
< 4	2.0	2	Asfalto Reciclado (RA/RAP)
4 - 7	2.2	2.4	RA / Pedra Triturada / Cascalho Natural / misturas
4 - 7	2.2	2.4	
7 - 10	2.4	2.8	
> 10	2.6	3.2	Cascalho / Areias

Inicialmente, o material reciclado deve ser corrigido para atender a faixa granulométrica recomendada, por meio da adição de agregados novos e fíler. Adiciona-se em torno de 75% da umidade ótima determinada no ensaio de compactação, para atingir uma consistência denominada de “*fluffed*”, no qual não há mais suspensão de finos durante a mistura e tampouco se encontra pegajoso, com acúmulo de material nos cantos do misturador por excesso de umidade. A homogeneização dos materiais adicionais e da umidade pode ser realizado no misturador da Wirtgen WLM 30, que é um complemento da WLB 10S, como mostra a Figura 2.14.



Figura 2.14: Misturador Wirtgen WLM 30 acoplado ao equipamento para produzir espuma de asfalto em laboratório Wirtgen WLB 10S. FONTE: Wirtgen (2016)

Após a homogeneização do material reciclado com a umidade, adiciona-se no misturador a espuma de asfalto nas proporções inicialmente estabelecidas e continua-se a mistura até obter um material homogêneo como apresenta a Figura 2.15.



Figura 2.15: Material fresado após homogeneização com materiais novos, água e espuma de asfalto. FONTE: Wirtgen (2012)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é usualmente empregado no processo de dosagem. Por exemplo, a Wirtgen (2012) e o Workshop de Kassel (2016), por meio da especificação: “Procedimento de Ensaio para determinação de Resistência à Tração Indireta (ITS) para o material reciclado com espuma de asfalto”, estabelecem recomendações para execução da dosagem do teor de espuma de asfalto em materiais reciclados. Nesses guias, para cada teor de espuma de asfalto adicionado ao material reciclado, devem ser moldados 6 corpos de prova de 150mm de diâmetro e 95mm de altura no compactador vibratório. Após compactação, determina-se a massa dos corpos de prova para avaliar o grau de compactação (GC) e descarte daqueles com desvio superior a 2,5% do valor médio de massa específica seca máxima. Também devem ser determinadas as dimensões dos corpos de prova, diâmetro e altura.

Após determinação da massa e dimensões, os CPs são submetidos a um processo de cura de 72 horas em estufa com ar ventilado na temperatura de 40°C e determina-se novamente sua massa. Três dos corpos de prova são imersos em água durante 24 horas a 25°C (Figura 2.16) e os outros três CPs são conservados na temperatura de 25°C. Após esse período de cura e condicionamento, procede-se à execução do ensaio de ruptura por compressão diametral, como apresenta-se na Figura 2.17, nos dois conjuntos, os CPs saturados e os CPs secos. A velocidade de ruptura deve ser de 50,8mm por minuto e o cálculo da resistência à tração por compressão diametral é realizada pela Equação 2.1.

$$RT = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1.000.000 \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: RT = Resistência à tração por compressão diametral (kPa)

P = carga máxima aplicada (kN)

h = altura média do corpo de prova (mm)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

Determina-se a resistência à tração retida pela relação entre a resistência à tração média dos CPs saturados e a resistência à tração média dos CPs secos, como mostra a Equação 2.2.

$$RTR = \frac{RT_{saturada}}{RT_{seca}} \times 100 \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde: RTR = Resistência à tração retida (%)

RT_{saturada} = média da resistência à tração do conjunto de CPs saturados

RT_{seca} = média da resistência à tração do conjunto de CPs secos

O Manual Wirtgen (2012) estabelece a nomenclatura de RT_{seca} , para corpos de prova de diâmetro de 100mm, submetidos à cura durante 72 horas em estufa ventilada na temperatura de 40°C. O termo $RT_{equilíbrio}$ refere-se à resistência à tração obtida na condição de umidade de equilíbrio que é considerada como 43 até 50% da umidade ótima de compactação (Asphalt Academy, 2009). Para obter a umidade de equilíbrio, os CPs são colocados em estufa ventilada na temperatura de 30°C até a umidade ser reduzida e, posteriormente, são envelopados com plástico e curados durante 48 horas em estufa na temperatura de 40°C.



Figura 2.16: Imersão em água dos corpos de prova de material reciclado estabilizados com espuma de asfalto. FONTE: Van Niekerk (2016)



Figura 2.17: Compressão diametral do corpo de prova. FONTE: Van Niekerk (2016)

Os valores médios de resistência à tração podem ser lançados em um gráfico versus o teor de espuma utilizado, como apresenta a Figura 2.18.

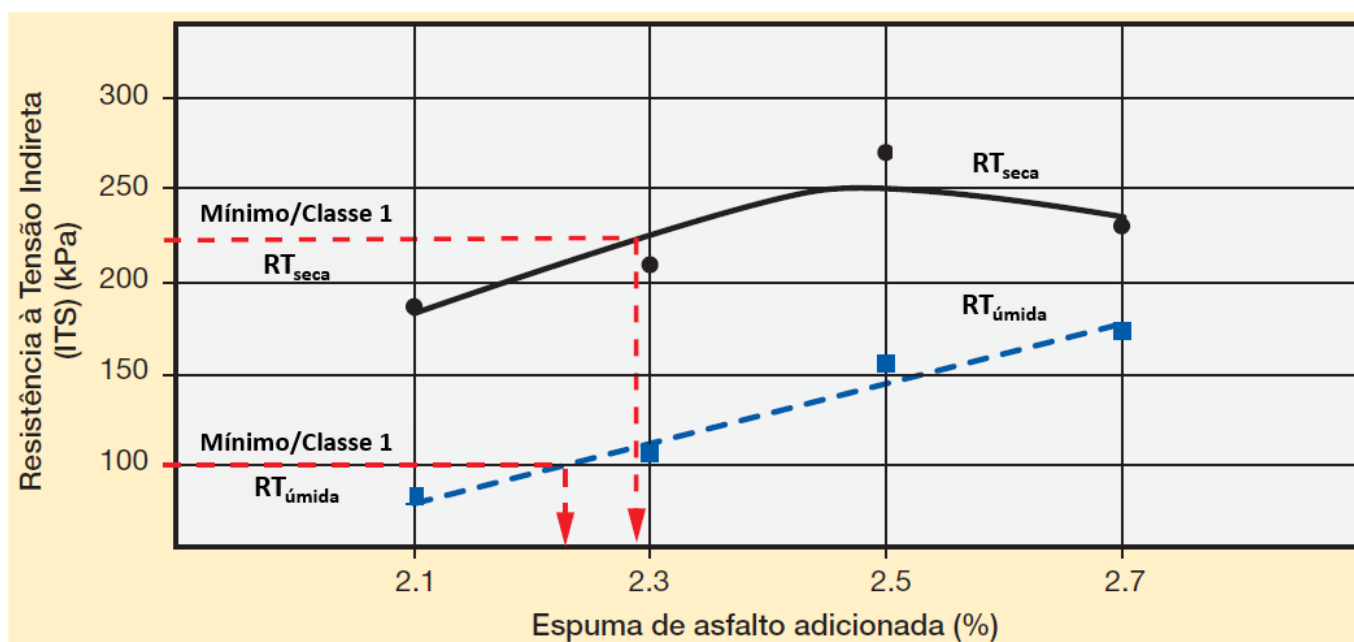


Figura 2.18: Resistência à tração seca e úmida em função do teor de espuma de asfalto. FONTE: Wirtgen (2012)

A Asphalt Academy (2009) estabelece distintos tipos de material reciclado estabilizado com espuma, em função da resistência à tração seca e saturada, como apresenta a Tabela 2.7. Nessa tabela distinguem-se três tipos de material, de melhor qualidade para menor qualidade são: BSM1, BSM2 e BSM3. BSM refere-se à sigla em inglês de “*Bitumen Stabilized Material*”.

Tabela 2.7: Tipos de material reciclado em função da resistência à tração seca e saturada e do diâmetro dos corpos de prova utilizados. FONTE: Asphalt Academy (2009)

Parâmetro	Unidade	Diâmetro CP (mm)	BSM1	BSM2	BSM3
RT _{seca}	kPa	100	> 225	175 a 225	125 a 175
RT _{úmida}	kPa	100	> 100	75 a 100	50 a 75
RT _{equilíbrio}	kPa	150	> 175	135 a 175	95 a 135
RT _{úmida}	kPa	150	> 150	100 a 150	60 a 100

Os materiais do tipo BSM1 são obtidos de material fresado e britado, com elevada resistência ao cisalhamento e aplicáveis em rodovias de elevado volume de tráfego. O tipo BSM2 tem origem na estabilização de agregados naturais o material fresado, com boa resistência ao cisalhamento e recomendado para rodovias com tráfego de até 6×10^6 repetições do eixo padrão. Finalmente, o tipo BSM3 se originam do tratamento de solos-brita e/ou areias, indicado para estradas de tráfego leve, (ASPHALT ACADEMY, 2009).

2.6. Características mecânicas do fresado estabilizado com espuma de asfalto

Para a Asphalt Academy (2009), o fresado estabilizado com espuma de asfalto (BSM), caracteriza-se por ser um material com teores de ligante asfáltico não superiores a 3% e com adição de cimento ou cal em uma proporção inferior. A incorporação do asfalto aumenta a resistência do material e reduz sua susceptibilidade à umidade devido à dispersão do ligante nas partículas mais finas, gerando mastique que funciona como ligação pontual descontínua das partículas maiores, como mostram as Figuras 2.19 e 2.20.

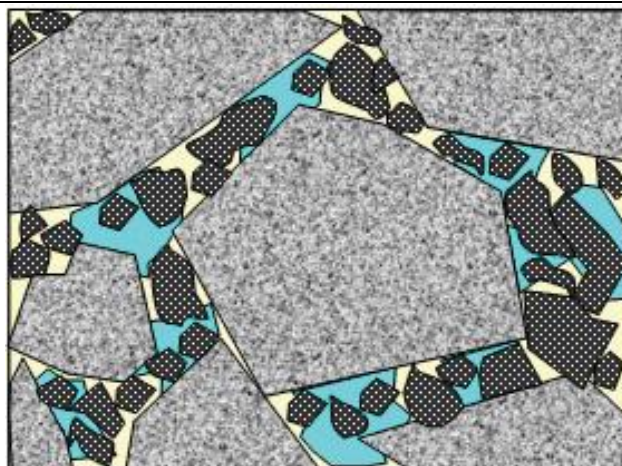


Figura 2.19: Mastique asfáltico não contínuo. FONTE: Asphalt Academy (2009)

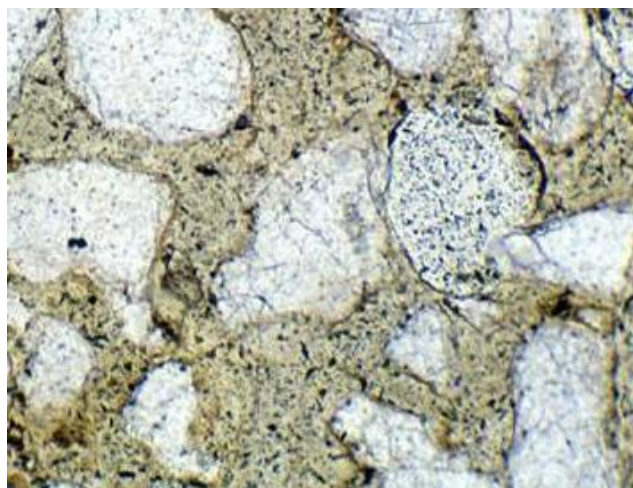


Figura 2.20: Detalhe da distribuição do ligante asfáltico nos agregados. FONTE: Wirtgen (2012)

O comportamento mecânico deste material não pode ser caracterizado dentro dos padrões dos tradicionalmente utilizados em pavimentação rodoviária. Segundo Jones et al (2009), o BSM é um material híbrido com características únicas e Jooste e Long (2007) afirmam que possuem comportamento mais próximo aos materiais granulares do que com o concreto asfáltico, já que não há continuidade na estabilização pela pouca ou nenhuma conexão entre as partículas de asfalto.

A presença de ligante asfáltico na mistura de BSM lhe confere um comportamento parcialmente viscoelástico, que pode influenciar na sua resposta mecânica a distintas temperaturas e frequências de carregamento. Com relação ao trincamento por fadiga, a experiência e demonstrações teóricas com aplicação da mecânica da fratura indicam que o BSM não tem características de desenvolver este tipo de manifestação patológica (JENKINS, 2012).

A Asphalt Academy (2009) afirma que a dispersão do asfalto na mistura altera suas características de resistência ao cisalhamento. Essa modificação pode ser atribuída ao incremento da coesão na mistura sem alterar significativamente o atrito interno. A Figura 2.21 apresenta um quadro no qual pode-se comparar o comportamento mecânico da mistura de BSM com outros materiais usualmente empregados em pavimentação.

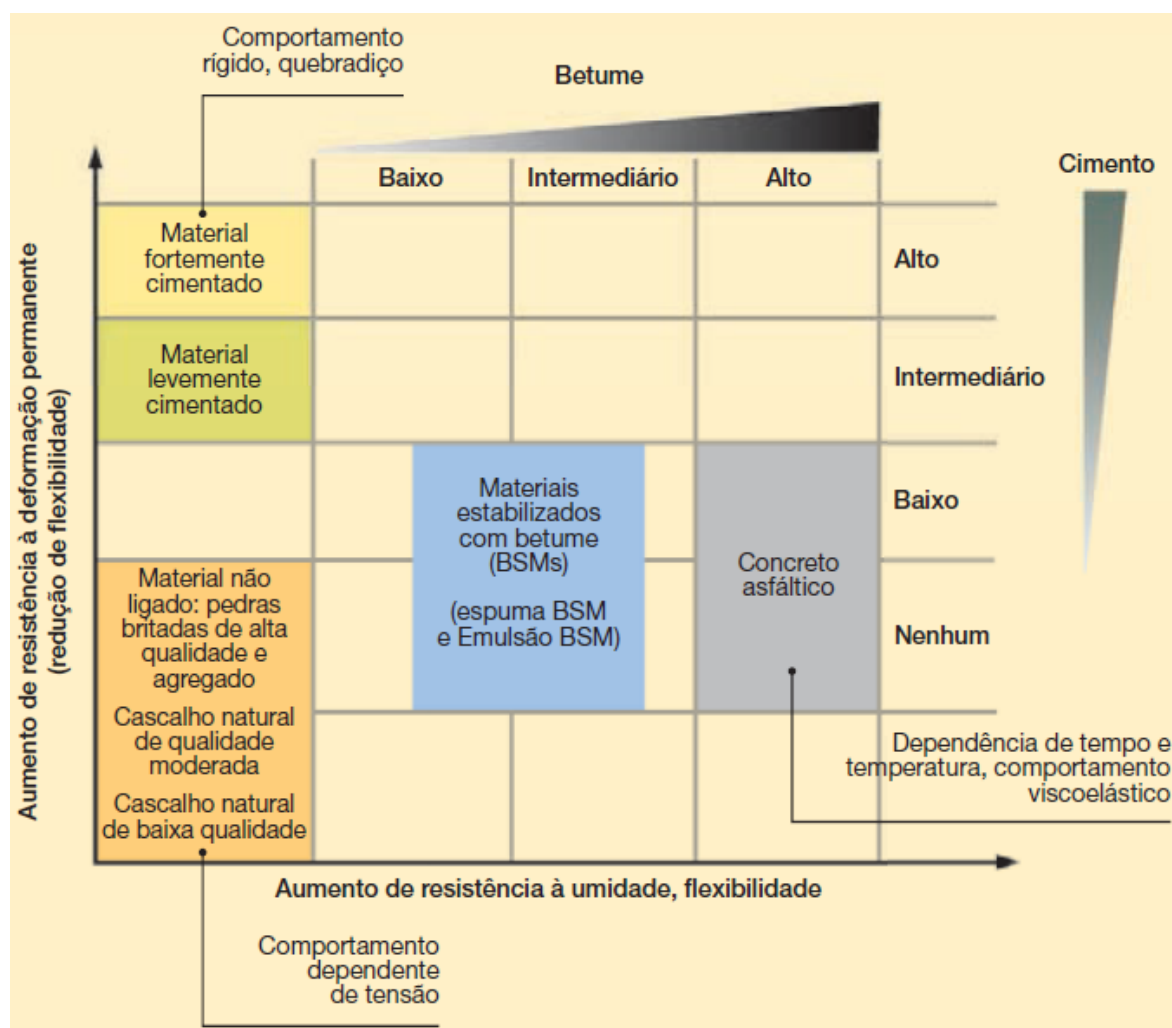


Figura 2.21: Comportamentos dos materiais empregados em pavimentos em função do tipo e quantidade de estabilizante. FONTE: Wirtgen (2012)

Distintos ensaios laboratoriais têm sido empregados durante décadas para caracterizar o comportamento mecânico do fresado estabilizado com espuma de asfalto ou BSM. Jenkins (2000) resumiu os ensaios que têm sido empregados para caracterizar o BSM, conforme apresenta a Tabela 2.8, considerando que alguns ensaios são indicativos para vários parâmetros de desempenho do material analisado.

Tabela 2.8: Métodos de ensaios utilizados para caracterizar as propriedades mecânicas do BSM.

FONTE: JENKINS (2000)

Propriedade / Desempenho	Propriedade de Engenharia da Mistura	Ensaio
Trabalhabilidade	Coesão	<i>Vane Shear</i>
Resistência à Fratura	Resistência à tração e energia de fratura	Ruptura por compressão diametral
Resistência à Fadiga	Coesão Deformação na tração e rigidez	Coesímetro Hveen <i>Long Term Pavement Performance (LTPP)</i>
Resistência à deformação Permanente	Deformação Plástica Resistência ao cisalhamento Estabilidade	Fluência estática / dinâmica Triaxial Coesímetro Hveen <i>Vane Shear</i> Estabilidade Marshall Resistência Hveen
Distribuição de tensões e cargas	Módulo de resiliência e rigidez	Compressão diametral Triaxial estático ou cíclico
Suscetibilidade à umidade	Resistência, estabilidade ou rigidez retida após exposição à água	Estabilidade Marshall Compressão diametral Triaxial
Resistência ao esmagamento	Compressão simples	Compressão axial simples

Nos métodos de dosagem utilizados na atualidade, o ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos é o mais utilizado para determinação do teor ideal de espuma de asfalto (ASPHALT ACADEMY, 2009; WIRTGEN, 2009, CALTRANS, 2009). Esse ensaio é bastante conhecido no meio nacional e tradicionalmente empregado para determinação da resistência à tração de forma indireta de outros materiais, tais como concreto asfáltico, materiais estabilizados com cimento ou cal e concreto de cimento Portland. Foi citado anteriormente que este parâmetro é empregado para diferenciar os tipos de BSM quanto à sua aplicação.

Os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos demandam o conhecimento das características de deformabilidade dos materiais. Nesse sentido, são necessários ensaios laboratoriais para determinar o módulo de elasticidade ou módulo de resiliência do BSM. O ensaio de compressão diametral cíclica de corpos de prova cilíndricos, usualmente empregado para

determinação do MR de concreto asfáltico, também foi utilizado para caracterizar a rigidez das misturas do tipo BSM. Pinto (2002), por exemplo, empregou este ensaio para avaliar o emprego de três tipos de ligante asfáltico, distintos teores de espuma de asfalto e cal e cimento na estabilização de material fresado. Na Tabela 2.9 é apresentado um resumo dos resultados obtidos por esse autor, que empregou a metodologia Marshall para compactação dos CPs.

Tabela 2.9: Resistência à tração e Módulo de Resiliência de fresado estabilizado com espuma de asfalto. FONTE: Pinto (2002)

Tipo de CAP	Teor de CAP (%)	Aditivo	Teor de Aditivo (%)	RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	MR seco (MPa)	MR saturado (MPa)
50/70	3,2	Cimento	1,0	0,69	0,56	2.980	2.378
	2,8	Cal	1,0	0,42	0,4	1.607	1.184
100/120	2,4	Cimento	1,0	0,65	0,49	2.855	2.153
	2,3	Cal	1,0	0,52	0,39	1.967	1.297
150/200	1,6	Cimento	1,0	0,67	0,5	3.450	2.387
	2,3	Cal	1,0	0,52	0,42	2.060	1.649

De Castro (2003) também empregou o ensaio de módulo de resiliência diametral para avaliar a rigidez de material fresado estabilizado com espuma. A autora fez o acompanhamento da execução de um segmento teste na RJ-106, entre as cidades de Tribobó e Maricá. O segmento teste foi estabilizado com 1% de cimento e espuma de ligante asfáltico nos teores de 2,5%, 3,0% e 3,5%. Durante a etapa construtiva foram coletadas amostras e enviadas para serem compactadas em laboratório. Após 20 meses da obra também foi realizada a extração de testemunhos no segmento teste e estes foram testados em laboratório no ensaio de módulo de resiliência. Na Tabela 2.10 são apresentados os resultados desses ensaios.

Tabela 2.10: Resistência à tração e Módulo de Resiliência de fresado estabilizado com espuma de asfalto na RJ-106. FONTE: De Castro (2003)

Teor de Espuma (%)	Aditivo/ Teor	CPs Laboratório			Testemunhos após 20 meses
		RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
2,5	CP III / 1%	0,15	0,11	890	5.647
3,0	CP III / 1%	0,23	0,21	1.448	3.837
3,5	CP III / 1%	0,36	0,25	1.673	3.439

Alguns autores utilizaram o ensaio de compressão triaxial, comumente utilizado para solos e materiais granulares não cimentados, para avaliar a resposta elástica os efeitos da tensão de confinamento em materiais do tipo BSM (EBELS, 2008; TWAGIRA, 2010; DAL BEN, 2014; GUATIMOSIM, 2015). No ensaio triaxial cíclico é aplicado um carregamento axial cíclico a um corpo de prova cilíndrico confinado, sendo que durante a execução do ensaio aplicam-se pares de tensão distintos para avaliar a resposta do material. Os valores do módulo de resiliência obtidos nesse ensaio variam de acordo com as características do material fresado, do teor de espuma de asfalto, do tempo de cura e do filler ativo empregado. Na bibliografia consultada (EBELS, 2008; TWAGIRA, 2010; DAL BEN, 2014; GUATIMOSIM, 2015), o módulo obtido na configuração desse ensaio oscila desde 300 MPa até 6.000MPa.

O ensaio triaxial com carregamento monotônico também têm sido empregado para caracterizar o comportamento mecânico das misturas do tipo BSM. No ensaio é aplicado um carregamento axial em um corpo de prova cilíndrico confinado até sua ruptura por cisalhamento. A Figura 2.22 representa o estágio de ruptura de em nível de partícula na amostra.

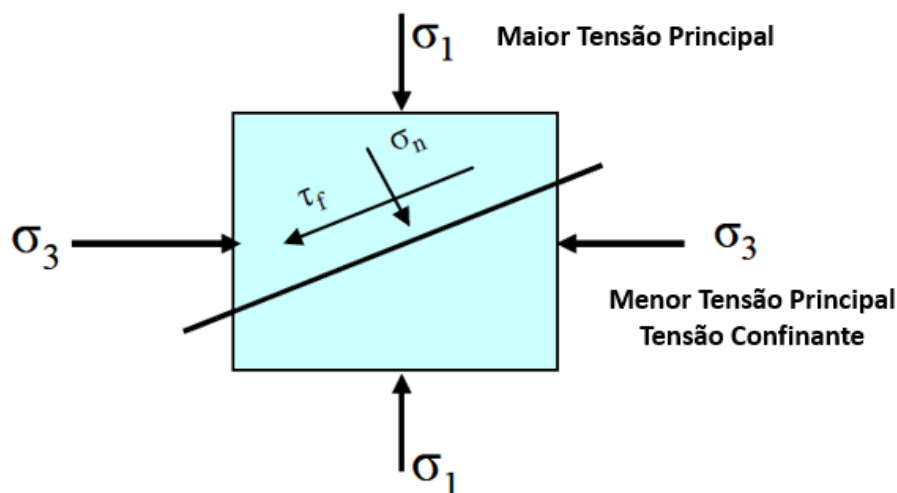


Figura 2.22: Estágio de ruptura em nível de partícula na amostra, no ensaio triaxial monotônico.

FONTE: MULUSA (2009)

A tensão de cisalhamento do material pode ser obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb representada pela relação matemática da Equação 2.3.

$$\tau_f = C + \sigma \cdot \tan \varphi \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: τ_f = tensão de cisalhamento;

C = coesão;

σ = tensão normal atuante no plano de ruptura;

φ = ângulo de atrito interno.

Os parâmetros C e φ do material podem ser determinados pela aplicação de ensaios de compressão triaxial com distintos níveis de tensão de confinamento. De modo geral, são necessários no mínimo três 3 corpos de prova para caracterizar o material.

Jenkins et al. (2002) estudaram materiais estabilizados com distintos teores de espuma de asfalto e observaram uma redução do ângulo de atrito e incremento da coesão no fresado tratado com espuma de asfalto, quando comparado com o material sem adição de espuma de asfalto. Nesse estudo, os materiais estabilizados mostraram valores de coesão de 150 até 300 kPa enquanto que o ângulo de atrito oscilou de 30° até 45°.

Mulasa (2009) desenvolveu um equipamento para executar o ensaio triaxial monotônico de forma simplificada, com uma câmara triaxial de metal para aplicação da tensão confinante com ar comprimido, conforme ilustra a Figura 2.23. O equipamento e os procedimentos simplificados por

esse autor foram adotados pelo Método 7 da Asphalt Academy (2009) para determinação dos parâmetros de cisalhamento.



Figura 2.23: Câmara de metal para aplicação da tensão de confinamento no corpo de prova. FONTE: Mulasa (2009)

A Asphalt Academy (2009) da República da África do Sul estabelece valores de coesão e ângulo de atrito para os distintos tipos de BSM, conforme apresenta a Tabela 2.11. Nessa tabela também indica-se o parâmetro de “coesão retida”, que se refere à perda de coesão que o material pode sofrer pela exposição à umidade.

Tabela 2.11: Valores de coesão e ângulo de atrito dos tipos de BSM. FONTE: Asphalt Academy (2009)

Parâmetro	BSM1	BSM2	BSM3
Coesão (kPa)	> 250	100 a 250	50 a 100
Ângulo de atrito (°)	> 40	30 a 40	< 30
Coesão Retida (%)	> 75	60 a 75	50 a 60

3. MÉTODOS E MATERIAIS (ETAPA B)

Neste estudo foram seguidos os procedimentos de dosagem estabelecidos pela Wirtgen (2012) e pela Asphalt Academy (2009), para a estabilização de material fresado com espuma de asfalto. Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo do processo e dos ensaios utilizados na dosagem do fresado com espuma de asfalto (BSM).

Tabela 3.1: Ensaios e normas utilizadas no processo de dosagem da BSM

Ensaio / Atividade	Objetivo	Norma / Referência
Coleta de amostras	obter quantidades representativas do material	DNER-PRO 120/97
Análise granulométrica	avaliar a necessidade da incorporação de agregados novos	DNER-ME 080/94
Limites de consistência	avaliar a necessidade da incorporação de fileres ativos	DNER-ME 122/94 DNER-ME 082/94
Compactação do Fresado	obter a massa específica seca máxima e a umidade ótima	Asphalt Academy (2009)
Espuma de Asfalto	determinar o teor de água a ser adicionado no asfalto	Asphalt Academy (2009)
Compactação de corpos de prova com espuma de asfalto	moldar corpos de prova para execução do ensaio de compressão diametral	Asphalt Academy (2009)
Cura dos corpos de prova	simular o processo de cura de campo	Asphalt Academy (2009)
Imersão dos corpos de prova	avaliar a susceptibilidade à umidade da mistura	Asphalt Academy (2009)
Ruptura por compressão diametral	determinar a resistência à tração indireta	Asphalt Academy (2009)

Inicialmente foi realizada a coleta do material fresado em áreas da Concessionária CCR NovaDutra, destinadas para seu armazenamento, como mostra a Figura 3.1. Foi necessário coletar 500kg de material fresado para a execução de todos os ensaios planejados neste estudo. Este material foi analisado por meio de ensaios de granulometria e índices de consistência para verificação da necessidade de incorporação de agregados novos e fileres ativos.



Figura 3.1: Coleta do material fresado em depósito de armazenamento da CCR NovaDutra

Para execução da compactação vibratória seguiram-se as recomendações do Método 8 da Asphalt Academy (2009). Para isso, foi utilizado um compactador vibratório da marca Bosch, modelo GSH 11 E, como mostra a Figura 3.2. No processo de dosagem foram empregados moldes do CBR para obter CPs de 150mm de diâmetro e 95mm, compactados em 4 camadas com aplicação de compactação vibratória, na frequência máxima do equipamento, durante 20 segundos. Dessa forma, atingiram-se resultados similares aos obtidos na compactação Proctor com energia modificada.



Figura 3.2: Compactação vibratória dos corpos de prova

Primeiro foi realizada a compactação do fresado com agregados novos, fíler e água, para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima (Figura 3.3). Com esses dados, procedeu-se à compactação de CPs com cinco teores de espuma de asfalto. Os 6 CPs compactados para cada teor foram curados em estufa ventilada na temperatura de 40°C durante 72 horas (Figura 3.4). Após esse período de cura, 3 CPs foram imersos em água durante 24 horas na temperatura de 25°C e os outros 3CPs foram conservados em incubadora também a 25°C durante 24 horas (Figura 3.5). Após esse período os CPs foram testados no ensaio compressão diametral, como mostra a Figura 3.6.



Figura 3.3: Determinação da massa do fresado com agregados novos, fíler e água



Figura 3.4: Cura dos CPs com espuma de asfalto em estufa ventilada



Figura 3.5: Imersão dos corpos de prova em água



Figura 3.6: Ruptura por compressão diametral

O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral também foi executado na BSM. Neste caso foram seguidas as recomendações da ASTM D4123 para misturas asfálticas, considerando que os CPs de BSM foram moldados no compactador vibratório nas dimensões de 150mm de diâmetro e 65mm de altura, como mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Execução do ensaio de módulo de resiliência

O ensaio de compressão triaxial será executado seguindo as recomendações da Asphalt Academy (2009). No ensaio é aplicada uma carga axial monotônica a um corpo de prova de BSM com confinamento, para obtenção dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito e módulo tangente. Na Figura 3.8 é apresentado o equipamento que será utilizado neste estudo, que no momento da elaboração deste relatório se encontrava em transporte ao país.

Os corpos de prova para o ensaio triaxial monotônicos devem ter 150mm de diâmetro e 300mm de altura, preparados com o compactador vibratório citado anteriormente e curados durante 72 horas antes do início do ensaio. O carregamento deve ser aplicado na velocidade de 2,1% de deformação do corpo de prova, a uma temperatura de 25°C. As tensões de confinamento normalmente recomendadas são de 0kPa, 50kPa, 100kPa e 200kPa. Durante o ensaio é registrada a carga aplicada e o deslocamento do corpo de prova até que o deslocamento do CP alcançar 18mm ou 6% de deformação.



Figura 3.8: Equipamento para execução do ensaio triaxial utilizado na COPAVEL LTDA.

4. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA B)

Nesta seção do relatório parcial são apresentados os resultados parciais dos ensaios laboratoriais realizados nas amostras de fresado coletadas em depósitos da Concessionária CCR NovaDutra, ao longo da Rodovia Presidente Dutra (BR-116).

4.1. MATERIAL FRESADO

4.1.1. Coleta e caracterização granulométrica

Após a coleta do material fresado foram executados ensaios de granulometria em laboratório, para verificar a necessidade de adição de agregados novos e fíler ativo. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados de granulometria das amostras coletadas em distintos pontos da Rodovia no Estado de São Paulo e no Estado de Rio de Janeiro, respectivamente. Nas Figuras 4.1 e 4.2 apresentam-se esses resultados junto com a faixa recomendada pela Wirtgen (2012).

Tabela 4.1: Granulometria do material fresado coletado em distintos locais da rodovia Presidente Dutra no Estado de São Paulo

Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 5 SP/PS	km 106 SP/PN	km 156 SP/PN	km 207 SP/PN
Nº	(mm)	Min.	Max.				
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	88,3	89,1	96,2	88,4
1/2"	12,7	55	100	76,3	77,9	86,6	72,3
Nº 4	4,8	35	62	42,5	40,1	49,9	38,0
Nº 8	2,4	25	47	27,9	25,3	32,2	24,2
Nº 30	0,6	13	28	10,9	10,4	13,1	7,8
Nº 50	0,3	9	22	5,3	6,9	5,7	3,9
Nº 100	0,15	6	17	2,3	4,0	2,0	2,1
Nº 200	0,074	4	12	0,9	1,9	1,0	1,0

Tabela 4.2: Granulometria do material fresado coletado em distintos locais da rodovia Presidente Dutra no Estado de Rio de Janeiro

Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 197 PN RJ	km 238 PN RJ	km 266 PN RJ	km 292 PS RJ	km 313 PS RJ	km 322 PS RJ
Nº	(mm)	Min.	Max.						
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	98,1	88,3	98,5	89,1	100,0	96,2
1/2"	12,7	55	90	88,5	76,3	88,8	77,9	90,6	86,6
Nº 4	4,8	35	62	56,3	42,5	52,3	40,1	54,5	49,9
Nº 8	2,4	25	47	39,3	27,9	35,1	25,3	35,7	32,2
Nº 30	0,6	13	28	18,2	10,9	16,1	10,4	16,7	13,1
Nº 50	0,3	9	22	10,3	5,3	9,0	6,9	9,9	5,7
Nº 100	0,15	6	17	5,6	2,3	4,0	4,0	6,1	2,0
Nº 200	0,074	4	12	2,9	0,9	1,5	1,9	2,1	1,0

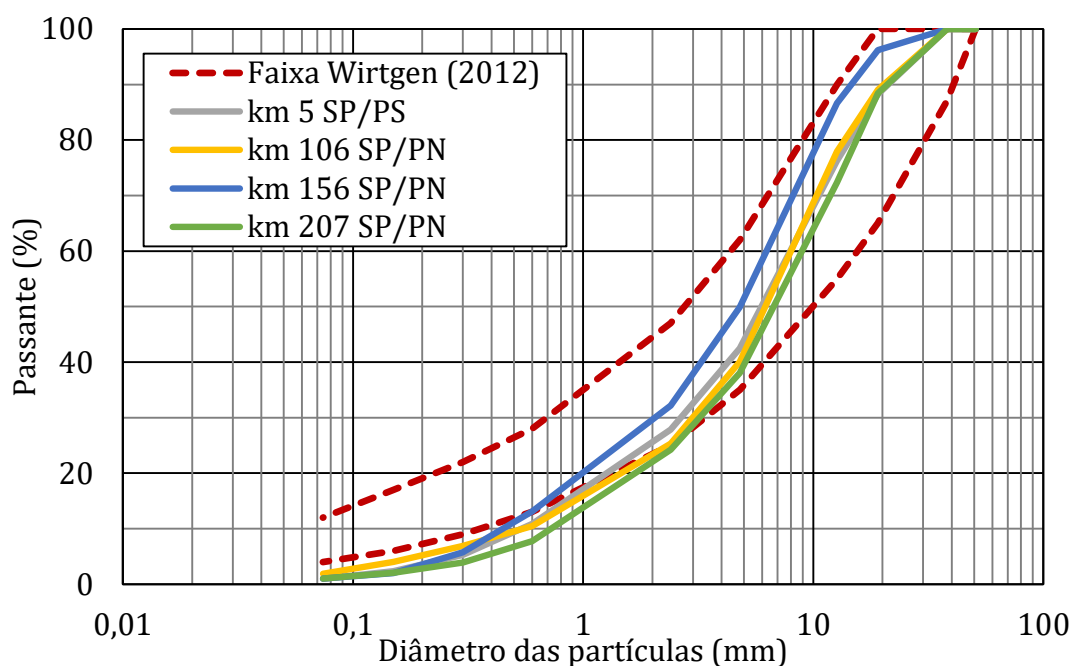


Figura 4.1: Granulometria do material fresado do Estado de São Paulo

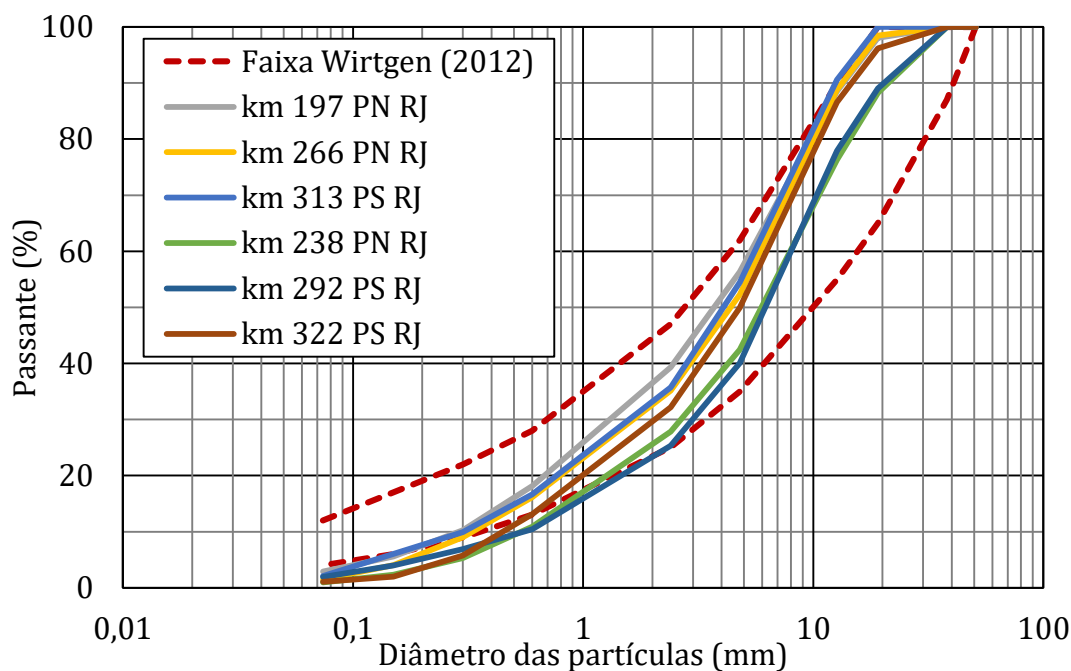


Figura 4.2: Granulometria do material fresado do Estado do Rio de Janeiro

4.1.2. Teor de ligante asfáltico residual

Após realização dos ensaios granulométricos, o material fresado foi submetido à ignição para determinação do teor residual de ligante asfáltico, conforme a normativa ASTM D6307-16. A Figura 4.3 ilustra o equipamento utilizado no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.



Figura 4.3: Forno de ignição utilizado para determinação do teor residual e asfalto

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados de extração de ligante asfálticos do material fresado coletado no Estado de São Paulo e no Estado de Rio de Janeiro.

Tabela 4.3: Teores de ligante asfáltico residual no material fresado

ID	Amostra	Teor de Ligante Asfáltico Residual (%)
A	km 5 PS/SP	4,7
B	km 106 PN/SP	4,9
C	km 156 PN/SP	4,4
D	km 207 PN/SP	4,2
E	km 197 PN RJ	4,8
F	km 238 PN RJ	4,7
G	km 266 PN RJ	4,9
H	km 292 PS RJ	5,1
I	km 313 PS RJ	4,7
J	km 322 PS RJ	4,5

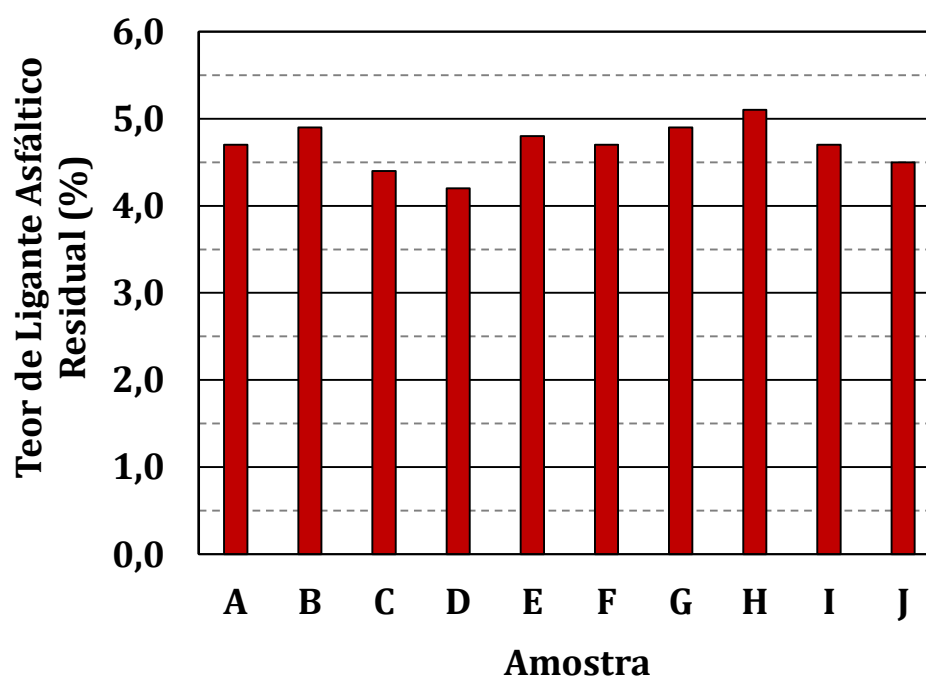


Figura 4.4: Teores de ligante asfáltico residual no material fresado

4.1.3. Características de resistência ao desgaste

O ensaio de abrasão Los Angeles foi executado nas amostras de material fresado para se obter uma ideia do desgaste desse material. Na Tabela 4.4 e na Figura 4.5 é apresentado um resumo dos resultados obtidos até elaboração deste relatório e nota-se que quase todas as amostras apresentaram valores inferiores a 40%, que são os valores usualmente recomendados para agregados empregados na construção de pavimentos, com exceção da amostra do Rio de Janeiro km 197 PN RJ.

Tabela 4.4: Resultados do ensaio de abrasão “Los Angeles” nas amostras de fresado

Estado	Amostra	Desgaste Los Angeles (%)
São Paulo	km 5 PS/SP	32,8
	km 106 PN/SP	24,3
	km 156 PN/SP	27,7
	km 207 PN/SP	37,4
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	44,3
	km 238 PN RJ	39,9
	km 266 PN RJ	36,5
	km 292 PS RJ	34,3
	km 313 PS RJ	38,7
	km 322 PS RJ	29,9

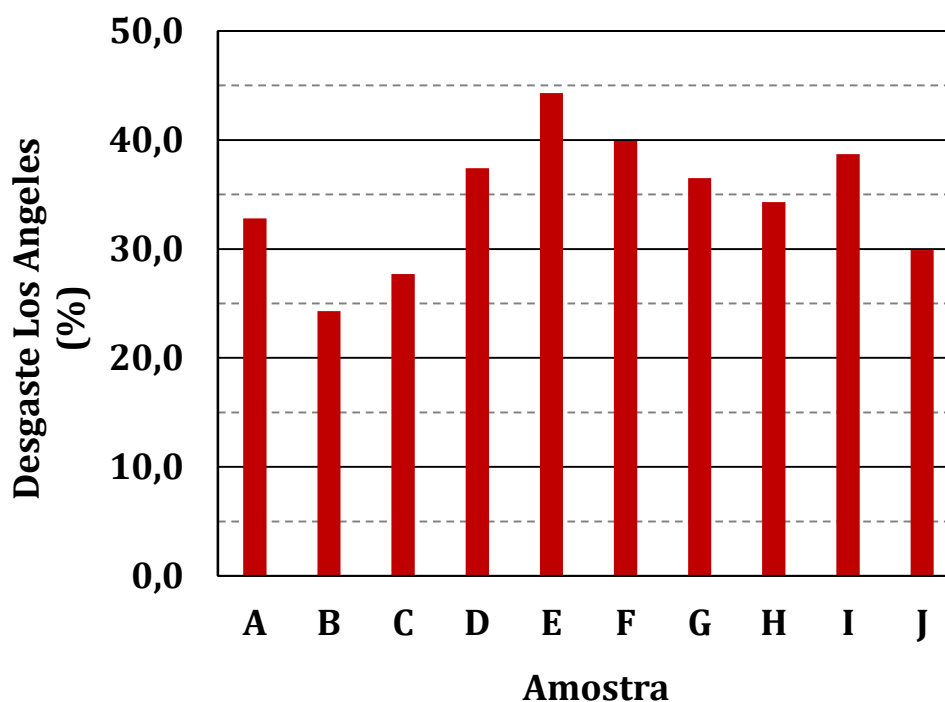


Figura 4.5: Resultados do ensaio de abrasão “Los Angeles” nas amostras de fresado

4.2. LIGANTE ASFÁLTICO

Para desenvolvimento deste estudo foi selecionado o CAP 50/70 para a produção da espuma de asfalto, já que é o ligante asfáltico mais comum no mercado nacional. Ao longo do estudo foi realizada a sua caracterização pelos ensaios convencionais, conforme apresenta a Tabela 4.5, para controlar os parâmetros de controle e verificar possíveis mudanças.

Tabela 4.5: Caracterização do CAP 50/70 ao longo do uso nesta pesquisa

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	MÉTODO DE ENSAIO	UNIDADES	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Densidade	DNER ME 193-96	g/dm ³	1,016	1,011	1,016	1,016
Recuperação Elástica	DNER ME 130-10	(%)	0	0	0	0
Penetração	DNER-ME 155-10	0,1mm	57	53	53	55
Ponto de amolecimento	DNER-ME 131-10	°C	47	49	51	50
Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21	ASTM D 4402M-13	cP	372	400	407	372
Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21		cP	184	197	201	182
Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21		cP	68	73	73	67
Espuma de asfalto	(ANP-R19)	-	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

O laboratório móvel da Wirtgen, modelo WLB 10S, foi utilizado para avaliar a espuma de asfalto quanto a sua meia vida e expansibilidade. Nos ensaios realizados, o teor de 2% de água adicionado ao CAP 50/70 na temperatura de 170°C, foi suficiente para produzir espuma de asfalto com expansão superior a 8 vezes e meia vida mínima de 6 segundos, como apresentado na Figura 4.6.

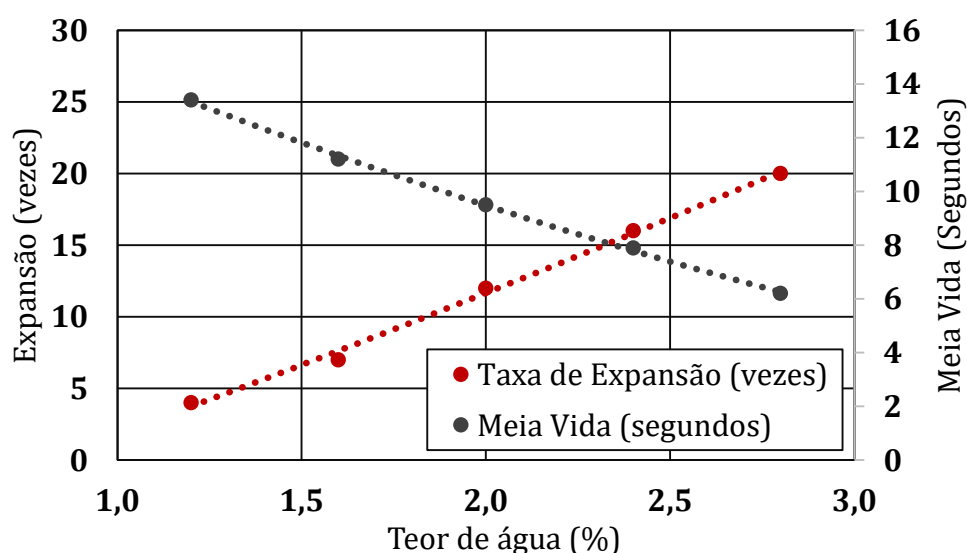


Figura 4.6: Expansão e meia vida do CAP 50/70 a 170°C com 2% de água

5. DOSAGEM DAS MISTURAS DE FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO (ETAPA C)

Nesta seção são apresentadas as atividades relacionadas à dosagem e estabilização do material fresado com espuma asfáltica. Inicialmente é apresentada a correção granulométrica realizada com pó de pedra e fíler. Neste estudo foi avaliado o uso de cal hidratada e cimento Portland como material de fíler. Posteriormente, o material estabilizado granulometricamente foi compactado no Proctor modificado para determinação do teor ótimo de umidade e massa específica seca máxima. Nessas condições, o material é compactado com distintos teores de espuma para determinar o teor adequado para atender os parâmetros recomendados pela bibliografia estudada.

5.1 AMOSTRAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

5.1.1. Correção Granulométrica

Notou-se na caracterização granulométrica, apresentada na seção 4 deste relatório, que o material fresado apresenta baixos conteúdos de finos e, de modo geral, a partir da Peneira N° 30 é mais grossa que a granulometria recomendada pela Wirtgen (2012), principalmente para o material fresado do Estado de São Paulo. Assim, analisou-se a possibilidade de adicionar pó de pedra britada e cal hidratada, com granulometria apresentada na Tabela 5.1. Assim, obtiveram-se as granulometrias da Tabela 5.2 e da Figura 5.1, para os materiais do Estado de São Paulo.

Tabela 5.1: Granulometria do pó de pedra e da cal hidratada utilizadas no estudo

Peneira		Pó de Pedra	Cal Hidratada
N°	(mm)		
2"	50,8	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	100,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	100,0
1/2"	12,7	100,0	100,0
N° 4	4,8	96,3	100,0
N° 8	2,4	77,6	100,0
N° 30	0,6	47,6	100,0
N° 50	0,3	30,9	100,0
N° 100	0,15	16,8	98,0
N° 200	0,074	10,5	92,0

Tabela 5.2: Composição granulométrica do fresado de São Paulo com pó de pedra e cal hidratada

ID Amostra				A	B	C-15%	D
Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 5 SP/PS	km 106 SP/PN	km 156 SP/PN	km 207 SP/PN
Nº	(mm)	Min.	Max.				
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	91,0	90,8	96,8	91,1
1/2"	12,7	55	90	81,7	81,4	88,8	78,7
Nº 4	4,8	35	62	54,9	49,1	57,4	51,5
Nº 8	2,4	25	47	39,5	33,9	39,7	36,7
Nº 30	0,6	13	28	19,8	16,9	19,2	17,4
Nº 50	0,3	9	22	11,9	11,4	10,4	10,8
Nº 100	0,15	6	17	6,5	6,9	5,2	6,3
Nº 200	0,074	4	12	4,0	4,1	3,4	4,0
Fresado (%) =				77,0	84,0	84,0	77,0
Pó de Pedra Adicionado (%) =				22,0	15,0	15,0	22,0
Cal Hidratada Adicionada (%) =				1,0	1,0	1,0	1,0
TOTAL (%) =				100,0	100,0	100,0	100,0

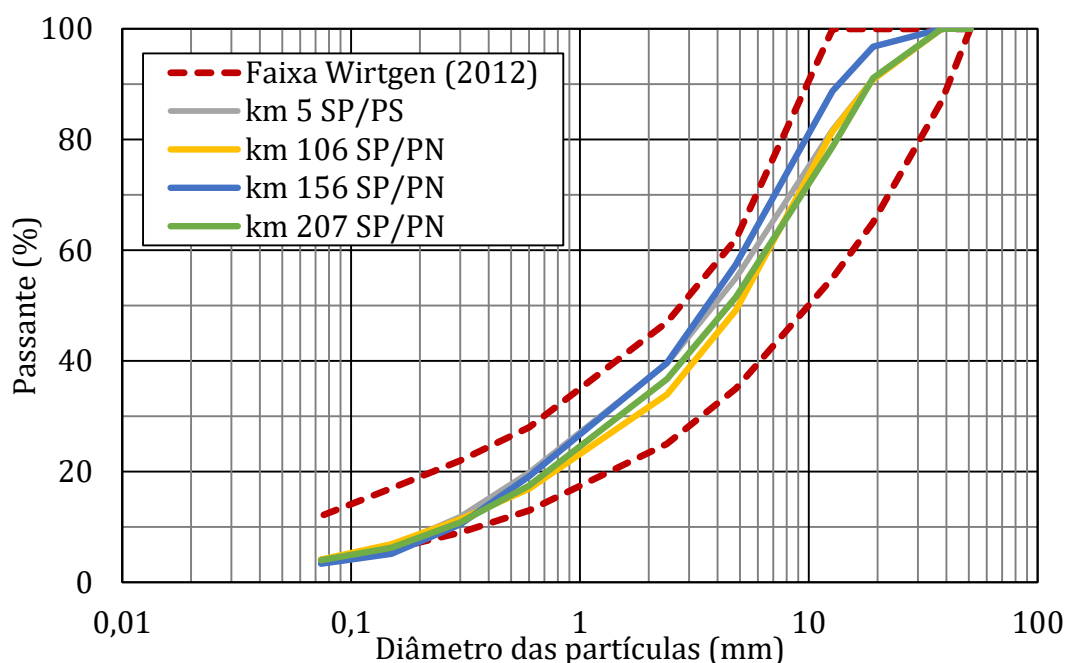


Figura 5.1: Granulometria das composições de fresado de São Paulo com pó de pedra e cal hidratada

Vale salientar que o material fresado do km 156 SP/PN foi previamente britado em equipamento britador móvel, como mostra a Figura 5.2, para verificar a possibilidade de incremento de finos e, assim, reduzir a quantidade de material virgem a ser utilizado. Nessa amostra foi adicionado distintas porcentagens de material fino, como apresenta a Tabela 5.3 e a Figura 5.3, para analisar o efeito de finos no comportamento mecânico do material.



Figura 5.2: Britador móvel utilizado para britar o material fresado do km 156 SP/PN

Tabela 5.3: Composição granulométrica do fresado do km 156 SP/PN cal hidratada e distintos conteúdos de pó de pedra

ID Amostra				C-7,5%	C-15%	C-25%
Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 156 SP/PN 7,5%	km 156 SP/PN 15%	km 156 SP/PN 25%
Nº	(mm)	Min.	Max.			
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	96,5	96,8	97,2
1/2"	12,7	55	100	87,8	88,8	90,1
Nº 4	4,8	35	62	53,9	57,4	62,0
Nº 8	2,4	25	47	36,3	39,7	44,2
Nº 30	0,6	13	28	16,6	19,2	22,6
Nº 50	0,3	9	22	8,6	10,4	13,0
Nº 100	0,15	6	17	4,1	5,2	6,7
Nº 200	0,074	4	12	2,7	3,4	4,3
Fresado (%) =				91,5	84,0	74,0
Pó de Pedra Adicionado (%) =				7,5	15,0	25,0
Cal Hidratada Adicionada (%) =				1,0	1,0	1,0
TOTAL (%) =				100,0	100,0	100,0

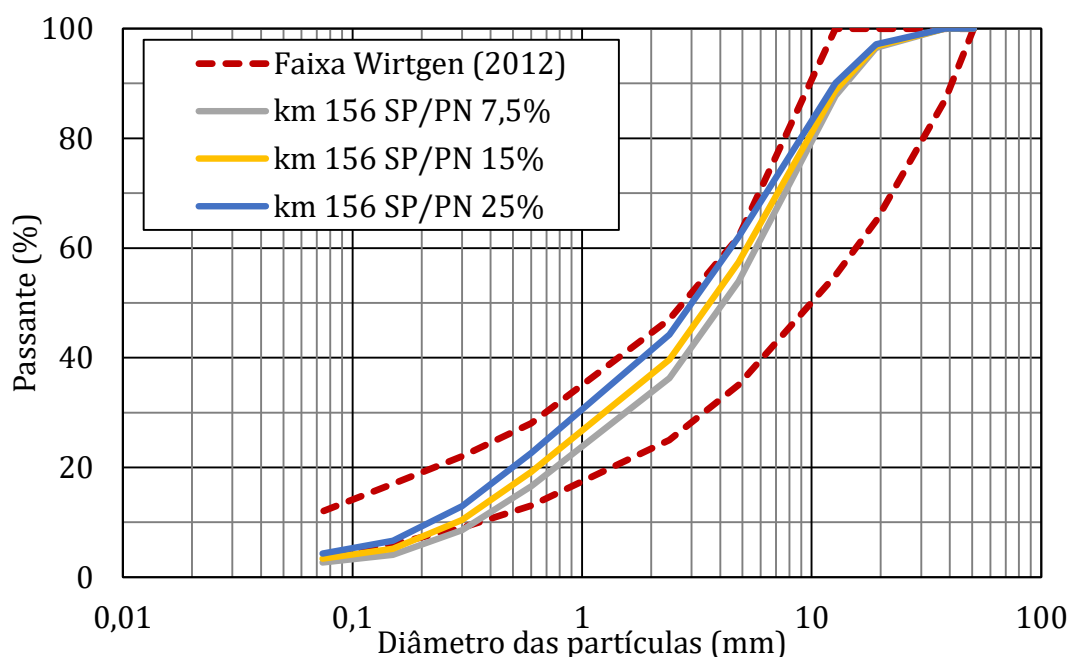


Figura 5.3: Granulometria das composições de fresado do km 156 SP/PN cal hidratada e distintos conteúdos de pó de pedra

Para simplificar a identificação em gráficos e tabelas neste relatório, os materiais fresados foram identificados de A até D, para os materiais do Estado de São Paulo, conforme apresenta a Tabela 5.4. Nota-se que a amostra C foi analisada com distintos teores de pó de pedra, pelo qual foi identificada como C-7,5, C-15, C-25, sendo que o número indica a porcentagem de pó de pedra utilizada na amostra.

Tabela 5.4: Identificação das amostras de material fresado do Estado de São Paulo

Estado	Local da Coleta	Identificação
São Paulo	km 5 SP/PS	A
São Paulo	km 106 SP/PN	B
São Paulo	km 156 SP/PN + 7,5%	C-7,5
São Paulo	km 156 SP/PN + 15%	C-15
São Paulo	km 156 SP/PN + 25%	C-25
São Paulo	km 207 SP/PN	D

5.1.2. Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima

Após análise e correção granulométrica do material fresado, foi realizada a compactação de corpos de prova com distintos teores de umidade, para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima. Na Tabela 5.5 é apresentado um resumo dessa compactação e dos resultados obtidos para os materiais coletados no Estado de São Paulo. Na Tabela 5.6 resumem-se também os resultados obtidos para o material fresado do km 156 SP/PN que foi estudado com distintas porcentagens de material fino.

Tabela 5.5: Resultados da compactação do material fresado do Estado de São Paulo, com pó de pedra e cal hidratada

Local da Coleta	km 5 SP/PS		km 106 SP/PN		km 156 SP/PN		km 207 SP/PN	
Ponto	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)
1	3,2	2,014	2,7	2,027	3,0	1,962	2,5	2,095
2	4,5	2,025	3,9	2,037	3,9	2,017	3,8	2,104
3	5,7	2,030	4,5	2,055	5,1	2,075	4,9	2,110
4	6,8	2,009	5,9	2,046	5,9	2,062	5,8	2,112
5	8,1	1,955	7,8	2,016	7,7	2,032	7,6	2,104
Wot (%)	5,5		4,9		4,9		5,4	
MESmax (g/cm ³)	2,036		2,061		2,075		2,112	

Tabela 5.6: Resultados da compactação do material fresado do km 156 SP/PN com cal hidratada e distintas porcentagens de pó de pedra

Local da Coleta	km 156 SP/PN + 7,5%		km 156 SP/PN + 15%		km 156 SP/PN + 25%	
Ponto	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)
1	3,5	1,950	3,0	1,962	3,4	2,018
2	4,8	1,968	3,9	2,017	4,6	2,027
3	6,0	1,983	5,1	2,075	5,7	2,051
4	6,7	1,978	5,9	2,062	6,4	2,050
5	7,7	1,965	7,7	2,032	7,6	2,016
Wot (%)	5,8		4,9		6,1	
MESmax (g/cm ³)	1,986		2,075		2,054	

5.1.3. Determinação do teor de espuma asfáltica

A determinação do teor de espuma de asfalto é realizada pela incorporação de distintas porcentagens na mistura estabilizada granulometricamente e selecionando aquela que atende aos parâmetros de resistência pré-estabelecidos. Neste estudo a estabilização foi realizada com pó de pedra e filer do tipo cal hidratada e cimento Portland e nos itens seguintes são apresentados os resultados obtidos.

5.1.3.1. Cal hidratada como filer

Na execução da dosagem do material fresado com espuma de asfalto, inicialmente o material fresado é homogeneizado com 75% da umidade ótima determinada no ensaio de compactação. Essa quantidade de água usualmente é suficiente para obter um material no qual não há mais suspensão de finos durante a mistura e tampouco excesso de umidade, pela segregação de materiais úmidos nos cantos do misturador. Após incorporação da espuma de asfalto, adiciona-se o restante de água e finaliza-se a homogeneização dos materiais.

Após a compactação dos corpos de prova, foram submetidos ao condicionamento seco e saturado, previamente à execução do ensaio de resistência à tração. Os resultados são apresentados na forma de resumo na Tabela 5.7

Tabela 5.7: Resistência à tração seca e saturada do material fresado do Estado de São Paulo com distintos teores de espuma de asfalto e cal hidratada

Material	Teor de Espuma de Asfalto (%)	Resistência à Tração Seca (MPa)	Resistência à Tração Úmida (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
km 5 SP/PS	1,6	325	288	89
	1,8	331	291	88
	2,0	356	357	100
	2,2	362	399	110
	2,4	328	317	97
km 106 SP/PN	1,8	204	196	96
	2,0	212	202	95
	2,2	223	225	101
	2,4	269	316	118
	2,6	257	282	109
km 156 SP/PN + 7,5%	1,6	232	253	109
	1,8	224	235	105
	2,0	294	291	99
	2,2	215	251	117
	2,4	253	252	100
km 156 SP/PN + 15%	1,6	232	176	76
	1,8	273	234	86
	2,0	251	225	90
	2,2	291	278	95
	2,4	243	245	101
km 156 SP/PN + 25%	1,6	275	265	96
	1,8	253	253	100
	2,0	240	240	100
	2,2	290	236	81
	2,4	308	284	92
km 207 SP/PN	1,6	192	181	94
	1,8	179	139	78
	2,0	179	160	90
	2,2	194	195	101
	2,4	207	187	90

Sabe-se que o material fresado é um material com certo grau de heterogeneidade e, portanto, recomenda-se adotar um teor de espuma de asfalto conservador no início dos projetos. Durante a execução das obras, o acompanhamento e o controle de qualidade ajuda a definir o atendimento

dos valores mínimos estabelecidos. Nesses casos, é possível modificar o teor de espuma para mais ou para menos, para garantir a qualidade de execução do BSM.

Selecionaram-se os teores de espuma asfáltica apresentados na Tabela 5.8 para os materiais estudados no Estado de São Paulo. Os resultados de resistência à tração seca e saturada também são apresentados nessa tabela, e na Figura 5.4 são ilustrados estes valores. Nessa figura também são traçados os valores de RT mínimos recomendados pela Wirtgen (2012) para o BSM (*Bitumen Stabilized Material*), tipo I, de melhor qualidade. Nota-se que, inclusive para teores de espuma baixos, em torno de 1,6%, os materiais apresentam valores de RT superiores aos mínimos recomendados. Esse comportamento pode ser um indicativo da boa qualidade do material fresado obtido nas atividades de manutenção da Rodovia Presidente Dutra, que precisa de poucas modificações para ser estabilizado e reaproveitado em bases de obras de restauração de pavimentos.

Tabela 5.8: Teores de espuma de asfalto adotados para os materiais fresados do Estado de São Paulo com cal hidratada

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
São Paulo	km 5 SP/PS	A	1,8	331	291	88
São Paulo	km 106 SP/PN	B	2,0	232	202	95
São Paulo	km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	1,8	224	235	105
São Paulo	km 156 SP/PN + 15%	C-15	1,8	273	234	86
São Paulo	km 156 SP/PN + 25%	C-25	1,8	253	253	100
São Paulo	km 207 SP/PN	D	2,0	244	184	75

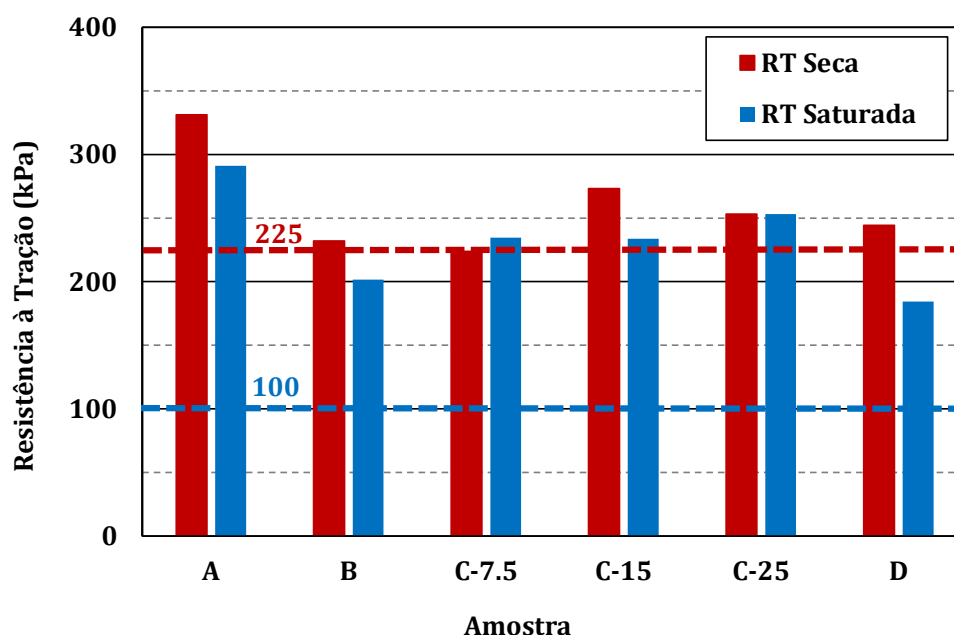


Figura 5.4: Resultados de resistência à tração seca e saturada para os teores de espuma adotados. Nas Tabelas 5.7 e 5.8 também são apresentados os valores de resistência à tração retida, obtidos pela relação entre a RT_{seca} e a $RT_{saturada}$. A Asphalt Academy (2009) recomenda o valor mínimo de 50% para esse parâmetro, com o objetivo de evitar maior susceptibilidade do material estabilizado em contato com umidade. A Figura 5.5 mostra os valores de RTR e verifica-se que para os teores de espuma adotados na dosagem, obtiveram-se valores superiores a esses limites inferiores. Esse comportamento indica uma boa resistência dos materiais estabilizados à ação deletéria da água.

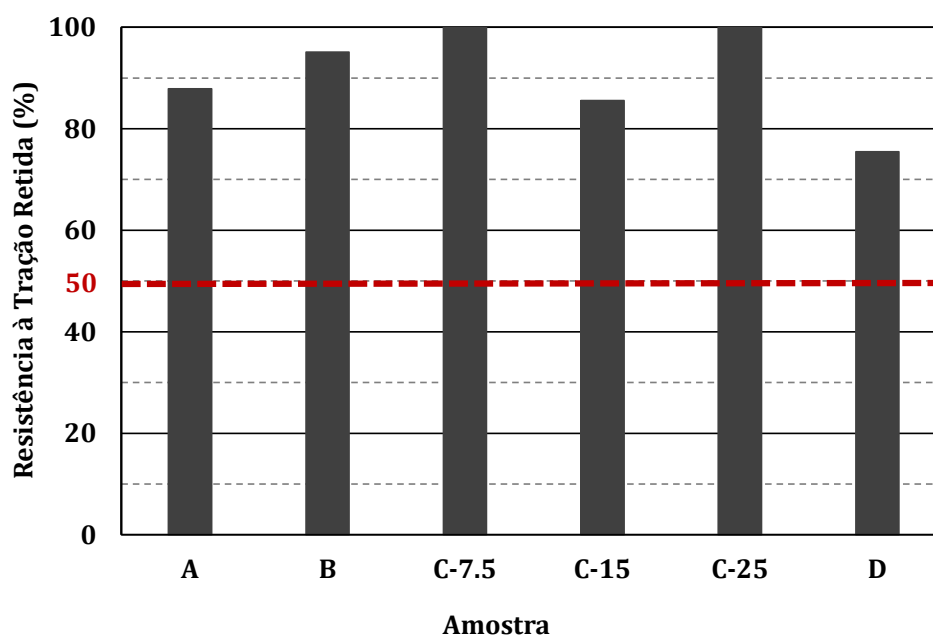


Figura 5.5: Resistência à tração retida após imersão dos corpos de prova

5.1.3.2. Cimento Portland como filer

O material fresado também foi estudado com a estabilização de espuma de asfalto e cimento Portland como material de filer. Os resultados dessas dosagens são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resistência à tração seca e saturada do material fresado do Estado de São Paulo com distintos teores de espuma de asfalto e cimento Portland

Amostra	Material	Teor de Espuma de Asfalto (%)	Resistência à Tração Seca (MPa)	Resistência à Tração Úmida (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
A	km 5 SP/PS	1,6	386	319	83
		1,8	391	353	90
		2,0	409	401	98
		2,2	417	416	100
		2,4	401	398	99
B	km 106 SP/PN	1,8	315	268	85
		2,0	322	273	85
		2,2	351	286	81
		2,4	342	292	85
		2,6	344	299	87
C-7.5	km 156 SP/PN + 7,5%	1,6	291	290	100
		1,8	301	275	91
		2,0	315	311	99
		2,2	314	288	92
		2,4	326	292	90
C-15	km 156 SP/PN + 15%	1,6	295	256	87
		1,8	322	275	85
		2,0	361	289	80
		2,2	360	329	91
		2,4	355	341	96
C-25	km 156 SP/PN + 25%	1,6	315	291	92
		1,8	322	301	93
		2,0	342	315	92
		2,2	356	321	90
		2,4	350	315	90
D	km 207 SP/PN	1,6	243	209	86
		1,8	273	251	92
		2,0	291	288	99
		2,2	308	302	98
		2,4	306	307	100

Na Tabela 5.10 e na Figura 5.6 são apresentados os valores de resistência à tração seca e saturada com o teor de espuma adotado, enquanto que na Figura 5.7 apresentam-se graficamente os resultados de resistência retida após imersão dos corpos de prova e verifica-se que para todos os teores de espuma utilizados na dosagem, obtiveram-se valores de 80 a 100%. Esse comportamento indica uma boa resistência dos materiais estabilizados à ação deletéria da água. Vale salientar que os valores adotados foram os mesmos adotados quando foi empregada a cal hidratada, para simplificar os efeitos comparativos entre esses materiais.

Tabela 5.8: Teores de espuma de asfalto adotados para os materiais fresados do Estado de São Paulo com cimento Portland

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
São Paulo	km 5 SP/PS	A	1,8	391	353	90
São Paulo	km 106 SP/PN	B	2,0	322	273	85
São Paulo	km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	1,8	301	275	91
São Paulo	km 156 SP/PN + 15%	C-15	1,8	322	275	85
São Paulo	km 156 SP/PN + 25%	C-25	1,8	322	301	93
São Paulo	km 207 SP/PN	D	2,0	291	288	99

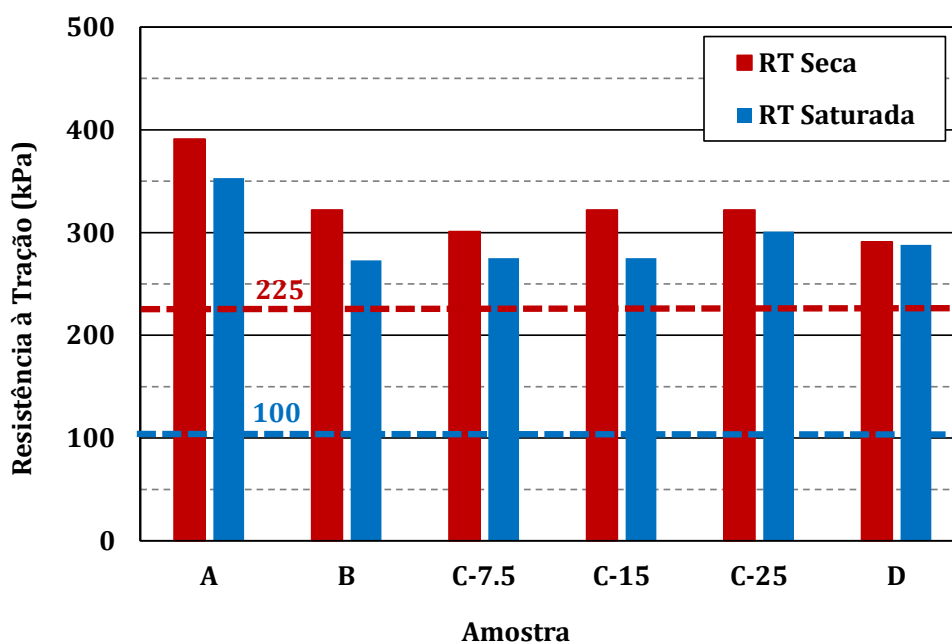


Figura 5.6: Resultados de resistência à tração seca e saturada para os teores de espuma adotados

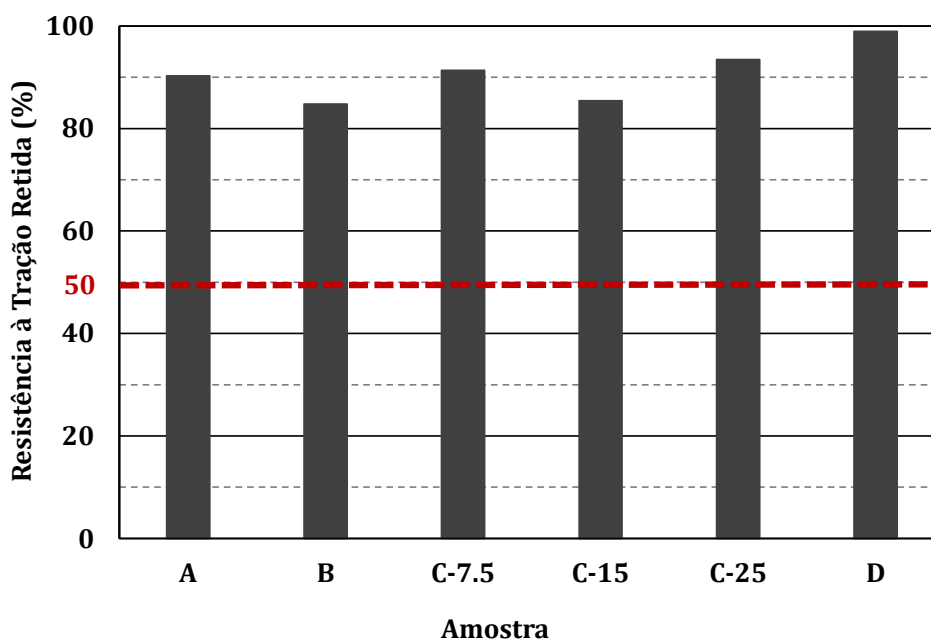


Figura 5.7: Resistência à tração retida após imersão dos corpos de prova

5.2 AMOSTRAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

5.2.1. Correção Granulométrica

Da mesma forma que foi realizado para as amostras do Estado de São Paulo, as amostras do Estado do Rio de Janeiro foram estabilizadas granulometricamente para atender as faixas da Wirtgen (2012), com o pó de pedra apresentado anteriormente na Tabela 5.1. Os resultados das granulometrias obtidas são apresentados na Tabela 5.9 e na Figura 5.8

Tabela 5.9: Composição granulométrica do fresado do Estado do Rio de Janeiro com pó de pedra e cal hidratada

ID Amostra				E	F	G	H	I	J
Peneira		Faixa Wirtgen (2012)		km 197 PN RJ	km 238 PN RJ	km 266 PN RJ	km 292 PS RJ	km 313 PS RJ	km 322 PS RJ
Nº	(mm)	Min.	Max.						
2"	50,8	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,1	87	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	65	100	98,3	98,8	98,8	97,4	100,0	98,6
1/2"	12,7	55	90	89,8	93,2	90,9	91,7	92,1	89,9
Nº 4	4,8	35	62	60,8	63,3	60,7	58,1	61,2	57,2
Nº 8	2,4	25	47	43,8	44,4	43,4	38,6	42,6	40,9
Nº 30	0,6	13	28	21,9	23,3	22,6	20,1	22,1	21,6
Nº 50	0,3	9	22	13,2	14,1	13,8	12,4	14,0	13,7
Nº 100	0,15	6	17	7,6	7,5	7,3	6,7	8,6	7,9
Nº 200	0,074	4	12	4,5	4,2	4,0	4,0	4,2	4,6
Fresado (%) =				89,0	84,0	81,0	77,0	84,0	99,0
Pó de Pedra Adicionado (%) =				10,0	15,0	18,0	22,0	15,0	-
Cal Hidratada Adicionada (%) =				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
TOTAL (%) =				100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

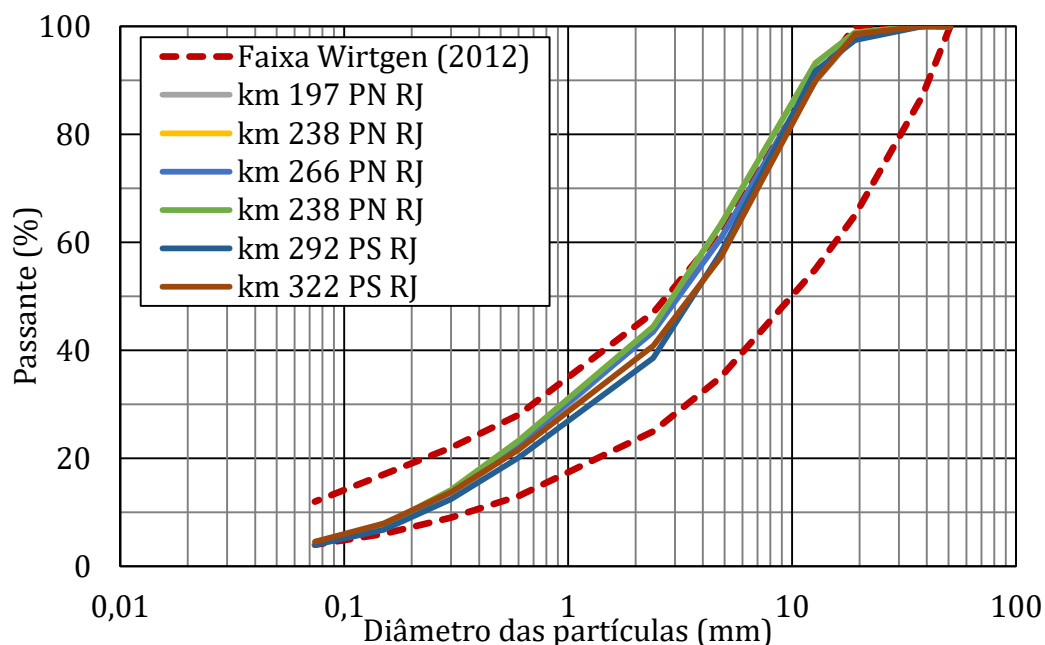


Figura 5.8: Granulometria das composições de fresado de São Paulo com pó de pedra e cal hidratada

Para simplificar a identificação em gráficos e tabelas neste relatório, os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro foram identificados de E até J, conforme apresenta a Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Identificação das amostras de material fresado utilizado no estudo

Estado	Local da Coleta	Identificação
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	E
Rio de Janeiro	km 238 PN RJ	F
Rio de Janeiro	km 266 PN RJ	G
Rio de Janeiro	km 292 PS RJ	H
Rio de Janeiro	km 313 PS RJ	I
Rio de Janeiro	km 322 PS RJ	J

5.2.2. Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima

Nas Tabelas 5.11 e 5.12 são apresentados os resultados da compactação Proctor na energia modificada realizada no material fresado estabilizado com pó de pedra e cal hidratada, para o material coletado no Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 5.11: Resultados da compactação do material fresado do Estado do Rio de Janeiro, com pó de pedra e cal hidratada – Parte 1

Amostra	E		F		G	
Local da Coleta	km 197 PN RJ		km 238 PN RJ		km 266 PN RJ	
Ponto	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm³)
1	3,9	1,956	3,7	1,961	4,9	1,961
2	4,7	1,972	4,4	1,997	5,6	1,993
3	5,8	2,004	5,4	2,024	6,7	2,005
4	7,1	1,995	6,6	2,027	7,6	1,995
5	7,8	1,973	7,8	2,001	8,5	1,988
Wot (%)	6,2		6		6,1	
MESmax (g/cm³)	2,012		2,038		2,007	

Tabela 5.12: Resultados da compactação do material fresado do Estado do Rio de Janeiro, com pó de pedra e cal hidratada – Parte 2

Amostra	H		I		J	
Local da Coleta	km 292 PS RJ		km 313 PS RJ		km 322 PS RJ	
Ponto	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)
1	3,1	2,015	3,5	1,940	3,9	1,985
2	4,3	2,005	4,3	1,976	5,0	2,007
3	5,0	2,030	5,4	2,000	6,2	2,015
4	6,1	2,043	6,2	1,990	7,4	2,019
5	7,1	2,029	7,4	1,970	8,0	2,017
Wot (%)	5,8		5,5		5,6	
MESmax (g/cm ³)	2,048		2,001		2,018	

5.2.3. Determinação do teor de espuma asfáltica

Como foi citado anteriormente, neste estudo a estabilização do material fresado foi realizada com pó de pedra e filer do tipo cal hidratada e cimento Portland e nos itens seguintes são apresentados os resultados obtidos para os materiais coletados no Estado de Rio de Janeiro.

5.2.3.1. Cal hidratada como filer

Os resultados da dosagem realizada com materiais fresados do Estado de Rio de Janeiro e cal hidratada são apresentados na forma de resumo na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resistência à tração seca e saturada do material fresado do Estado do Rio de Janeiro com distintos teores de espuma de asfalto e cal hidratada

Amostra	Material	Teor de Espuma de Asfalto (%)	Resistência à Tração Seca (MPa)	Resistência à Tração Úmida (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
E	km 197 PN RJ	1,8	323	358	111
		2,0	370	404	136
		2,2	295	330	112
		2,4	294	314	107
		2,6	321	333	104
F	km 238 PN RJ	1,8	308	280	91
		2,0	299	313	105
		2,2	267	268	101
		2,4	337	295	88
		2,6	380	348	92
G	km 266 PN RJ	1,8	412	408	99
		2,0	398	290	73
		2,2	239	243	102
		2,4	261	220	84
		2,6	262	224	86
H	km 292 PS RJ	1,6	274	231	84
		1,8	224	184	82
		2,0	227	193	85
		2,2	367	360	98
		2,4	263	268	102
I	km 313 PS RJ	1,8	274	257	94
		2,0	249	279	112
		2,2	248	317	128
		2,4	313	241	77
		2,6	264	252	95
J	km 322 PS RJ	1,8	342	286	84
		2,0	395	377	95
		2,2	397	472	119
		2,4	361	375	104
		2,6	312	314	101

Na Tabela 5.14 são apresentados os teores de espuma de asfalto adotados para os materiais do Estado do Rio de Janeiro, e os valores correspondentes de resistência à tração seca, saturada e a

resistência à tração retida, sendo que as Figuras 5.9 e 5.10 apresentam também esses resultados de forma gráfica.

Tabela 5.14: Teores de espuma de asfalto adotados para os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro com cal hidratada

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	E	2,0	370	404	136
Rio de Janeiro	km 238 PN RJ	F	2,0	299	313	105
Rio de Janeiro	km 266 PN RJ	G	2,0	398	290	73
Rio de Janeiro	km 292 PS RJ	H	2,0	227	193	85
Rio de Janeiro	km 313 PS RJ	I	2,0	249	279	112
Rio de Janeiro	km 322 PS RJ	J	2,0	395	377	95

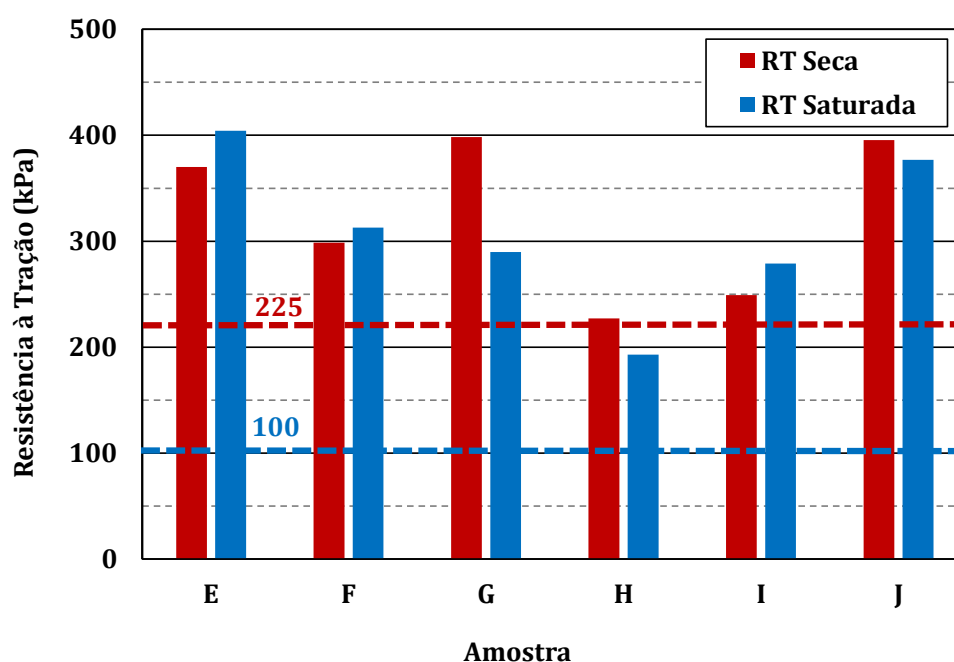


Figura 5.9: Resultados de resistência à tração seca e saturada para os teores de espuma adotados

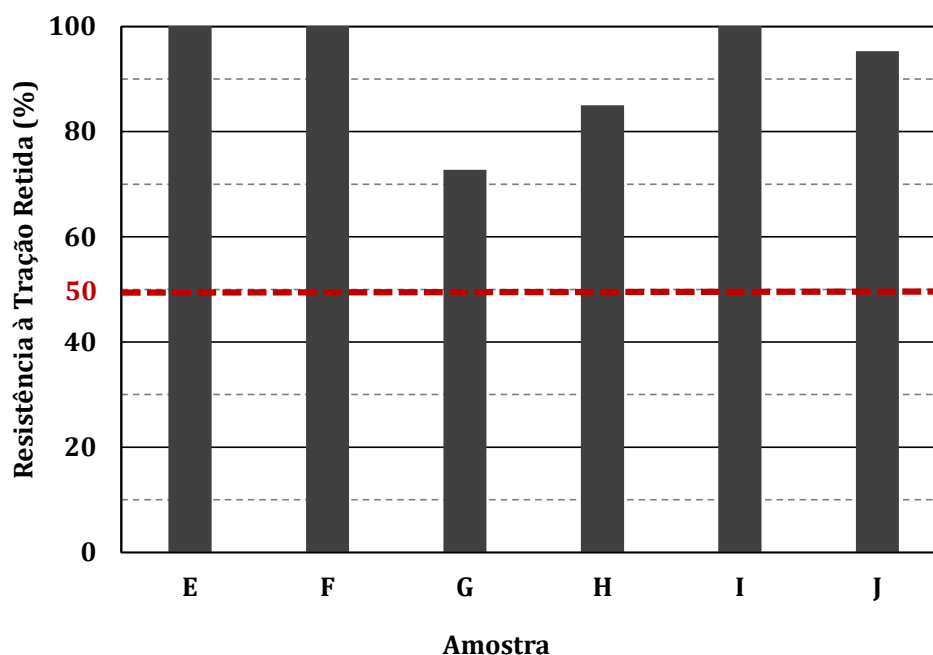


Figura 5.10: Resistência à tração retida após imersão dos corpos de prova

5.2.3.2. Cimento Portland como filer

O material fresado do Estado do Rio de Janeiro também foi estudado com a estabilização de espuma de asfalto e cimento Portland como material de filer. Os resultados dessas dosagens são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Resistência à tração seca e saturada do material fresado do Estado do Rio de Janeiro com distintos teores de espuma de asfalto e cimento Portland

Amostra	Material	Teor de Espuma de Asfalto (%)	Resistência à Tração Seca (MPa)	Resistência à Tração Úmida (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
E	km 197 PN RJ	1,8	378	353	93
		2,0	393	402	102
		2,2	453	480	106
		2,4	455	475	104
		2,6	460	474	103
F	km 238 PN RJ	1,8	398	371	93
		2,0	391	390	100
		2,2	419	429	102
		2,4	452	415	92
		2,6	456	426	93
G	km 266 PN RJ	1,8	402	409	102
		2,0	453	398	88
		2,2	517	453	88
		2,4	522	459	88
		2,6	516	466	90
H	km 292 PS RJ	1,6	362	370	102
		1,8	395	361	91
		2,0	412	429	104
		2,2	426	453	106
		2,4	433	439	101
I	km 313 PS RJ	1,8	385	412	107
		2,0	419	435	104
		2,2	476	489	103
		2,4	516	534	103
		2,6	511	481	94
J	km 322 PS RJ	1,8	435	412	95
		2,0	452	421	93
		2,2	502	482	96
		2,4	529	472	89
		2,6	518	486	94

Na Tabela 5.16 e na Figura 5.11 são apresentados os valores de resistência à tração seca e saturada com o teor de espuma adotado, enquanto que na Figura 5.12 apresentam-se graficamente os resultados de resistência retida após imersão dos corpos de prova. Vale salientar que os valores

adotados foram os mesmos adotados quando foi empregada a cal hidratada, para simplificar os efeitos comparativos entre esses materiais.

Tabela 5.16: Teores de espuma de asfalto adotados para os materiais fresados do Estado do Rio de Janeiro com cimento Portland

Estado	Local da Coleta	ID Amostra	Teor de Espuma Adotado (%)	RT Seca (MPa)	RT Saturada (MPa)	Resistência à Tração Retida (%)
Rio de Janeiro	km 197 PN RJ	E	2,0	393	402	102
Rio de Janeiro	km 238 PN RJ	F	2,0	391	390	100
Rio de Janeiro	km 266 PN RJ	G	2,0	453	398	88
Rio de Janeiro	km 292 PS RJ	H	2,0	412	429	104
Rio de Janeiro	km 313 PS RJ	I	2,0	419	435	104
Rio de Janeiro	km 322 PS RJ	J	2,0	452	421	93

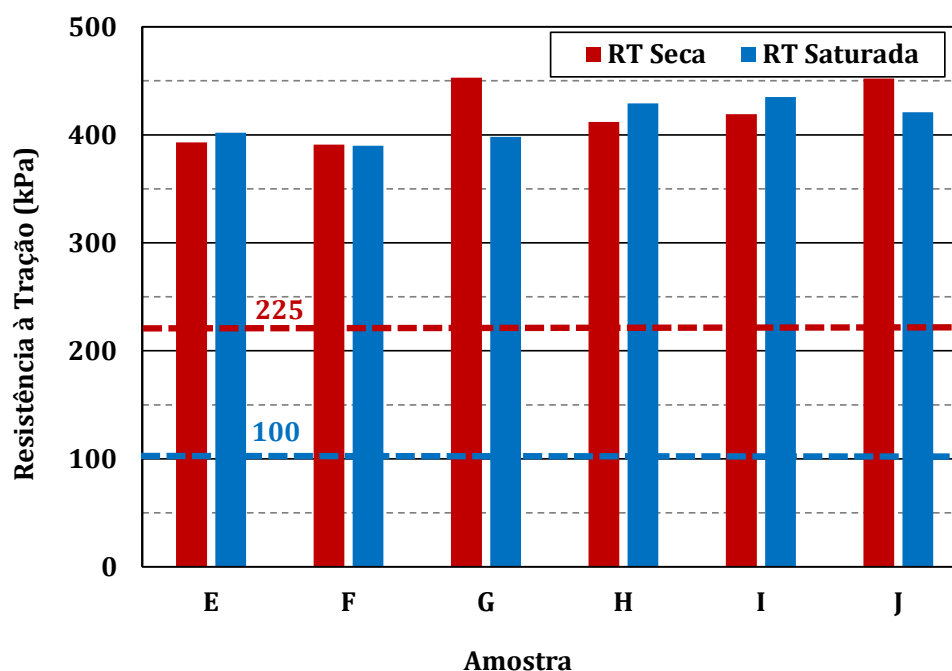


Figura 5.11: Resultados de resistência à tração seca e saturada para os teores de espuma adotados

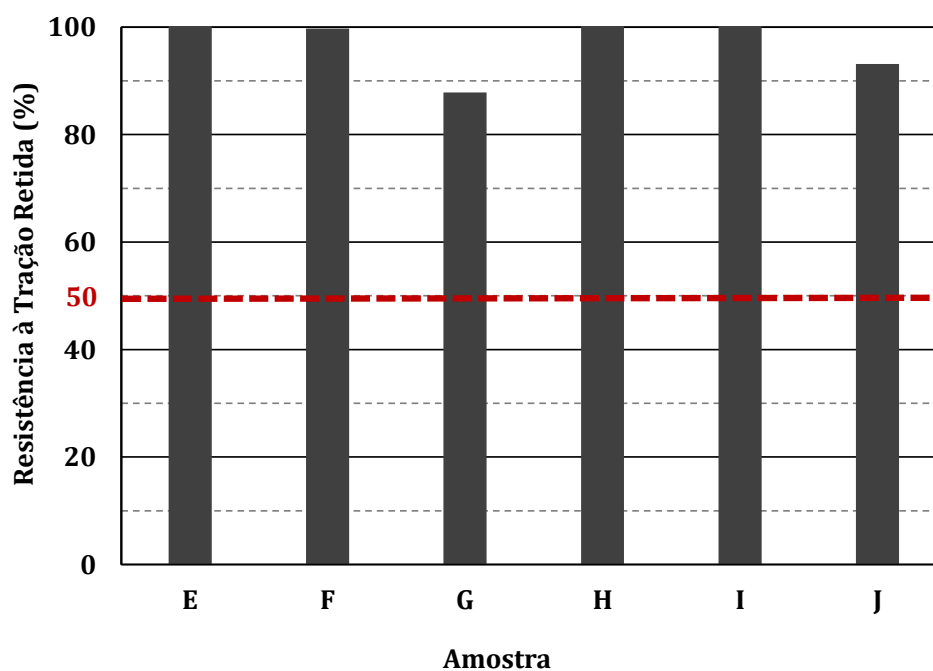


Figura 5.12: Resistência à tração retida após imersão dos corpos de prova

6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA D)

O ensaio de módulo de resiliência diametral, na condição seca e na condição saturada, foi executado nas amostras de fresado estabilizado com espuma de asfalto tanto com cal hidratada como com cimento Portland, para os materiais coletados no Estado de São Paulo como para o Estado do Rio de Janeiro. De forma complementar, após execução do ensaio de módulo de resiliência, os corpos de prova foram testados também no ensaio de compressão diametral para obtenção do parâmetro de resistência à tração.

Salienta-se que esses ensaios não formam parte da metodologia recomendada pela Wirtgen (2012), e esses valores não devem ser utilizados com a finalidade de dimensionamento de pavimentos pela metodologia empírico-mecanicista.

Posteriormente foram realizados os ensaios de compressão triaxial para determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, necessários para o dimensionamento de pavimentos com camadas de material do tipo BSM pelo método sulafricano. Os resultados destes ensaios estão apresentados a seguir.

6.1. RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL

6.1.1. MATERIAIS COLETADOS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Nos anexos deste relatório são apresentados todos os resultados da execução dos ensaios de módulo de resiliência diametral e resistência à tração por compressão diametral nas amostras do Estado de São Paulo. A seguir são apresentados esses resultados no formato resumido, para melhor visualizar as tendências obtidas.

6.1.1.1. Módulo de Resiliência Diametral

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 são apresentados os resumos desses resultados para o parâmetro módulo de resiliência diametral, com o emprego de cal hidratada e cimento Portland, respectivamente.

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

Local da Coleta	Amostra	MR Seco (MPa)	MR Saturado (MPa)	Perda de Rigidez (%)
km 5 SP/PS	A	1.870	2.271	-21
km 106 SP/PN	B	2.087	1.675	20
km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	3.349	3.245	3
km 156 SP/PN + 15%	C-15	2.790	2.849	-2
km 156 SP/PN + 25%	C-25	3.073	1.871	39
km 207 SP/PN	D	3.658	3.054	17
Média (MPa)		2.805	2.494	

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Local da Coleta	Amostra	MR Seco (MPa)	MR Saturado (MPa)	Perda de Rigidez (%)
km 5 SP/PS	A	4.088	3.804	7
km 106 SP/PN	B	3.908	3.545	9
km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	3.523	4.180	-19
km 156 SP/PN + 15%	C-15	4.429	5.219	-18
km 156 SP/PN + 25%	C-25	4.572	4.758	-4
km 207 SP/PN	D	5.023	4.059	19
Média (MPa)		4.257	4.261	

Os resultados das Tabelas 6.1 e 6.2 também são apresentados nas Figuras 6.1 e 6.2 e, pode-se observar que, de maneira geral a rigidez das misturas com cimento Portland é maior quando comparada com a rigidez das misturas com cal hidratada.

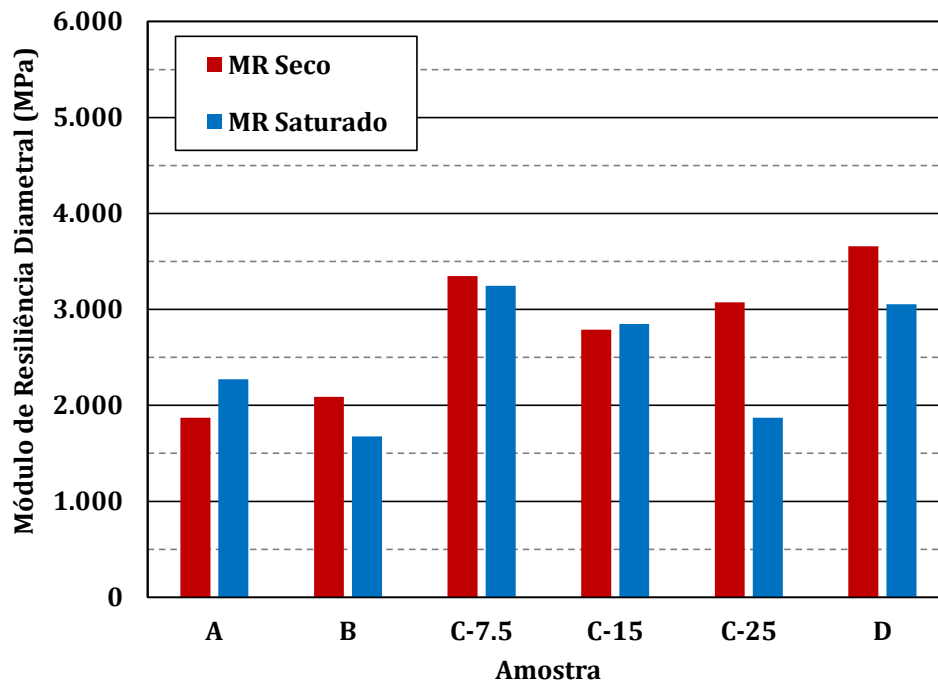


Figura 6.1: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

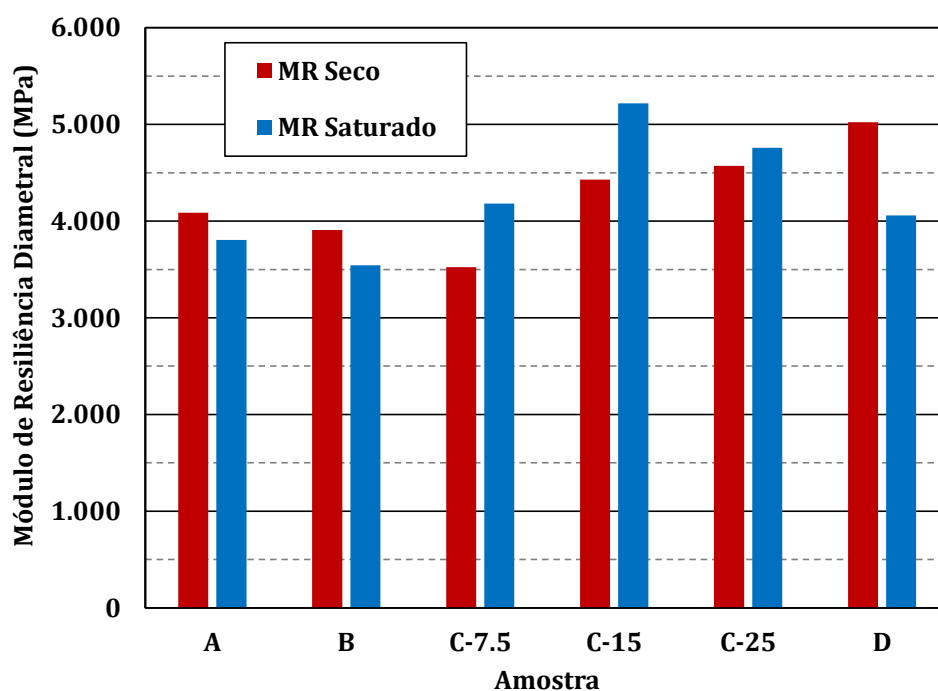


Figura 6.2: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Na Figura 6.3 é apresentado um comparativo que mostra a tendência de obter maiores valores de rigidez para as misturas com cimento Portland, do que com cal hidratada. Observa-se também que para a condição saturada, o cimento Portland produziu um ganho de rigidez, o que poderia ser atribuído à cura do cimento durante a imersão dos corpos de prova.

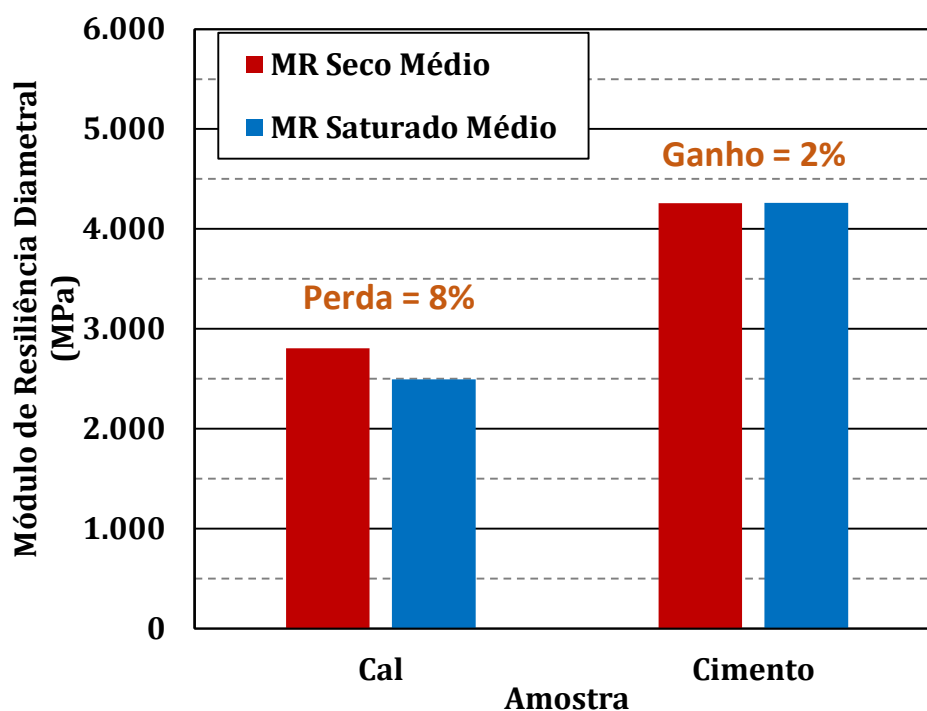


Figura 6.3: Resultados médios de módulo de resiliência seco e saturado, para as misturas de fresado estabilizado com espuma de asfalto, cal hidratada e cimento Portland

6.1.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

Nas Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam-se os resultados de resistência à tração por compressão diametral para as misturas de material fresado estabilizadas com espuma de asfalto e cal hidratada e cimento Portland, respectivamente.

Tabela 6.3: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado de São Paulo com cal hidratada

Local da Coleta	Amostra	RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	Perda de Resistência (%)
km 5 SP/PS	A	261	279	-7
km 106 SP/PN	B	208	190	9
km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	335	328	2
km 156 SP/PN + 15%	C-15	302	296	2
km 156 SP/PN + 25%	C-25	269	214	20
km 207 SP/PN	D	322	276	14
Média (MPa)		283	264	

Tabela 6.4: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado de São Paulo com cimento Portland

Local da Coleta	Amostra	RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	Perda de Resistência (%)
km 5 SP/PS	A	365	330	10
km 106 SP/PN	B	299	269	10
km 156 SP/PN + 7,5%	C-7.5	333	285	14
km 156 SP/PN + 15%	C-15	407	421	-3
km 156 SP/PN + 25%	C-25	358	332	7
km 207 SP/PN	D	350	310	11
Média (MPa)		352	324	

Os resultados das Tabelas 6.3 e 6.4 também são apresentados de forma gráfica nas Figuras 6.4 e 6.5, e pode-se notar, assim como no parâmetro de módulo de resiliência, a resistência à tração é levemente superior nas misturas de material fresado estabilizado com cimento Portland, quando comparado com as misturas estabilizadas com cal hidratada.

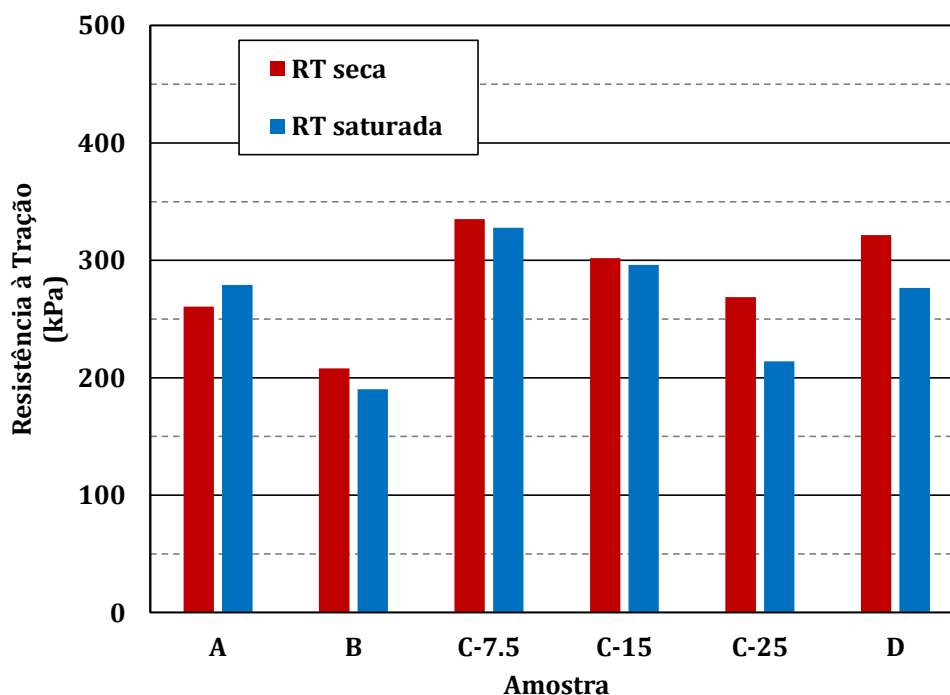


Figura 6.4: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

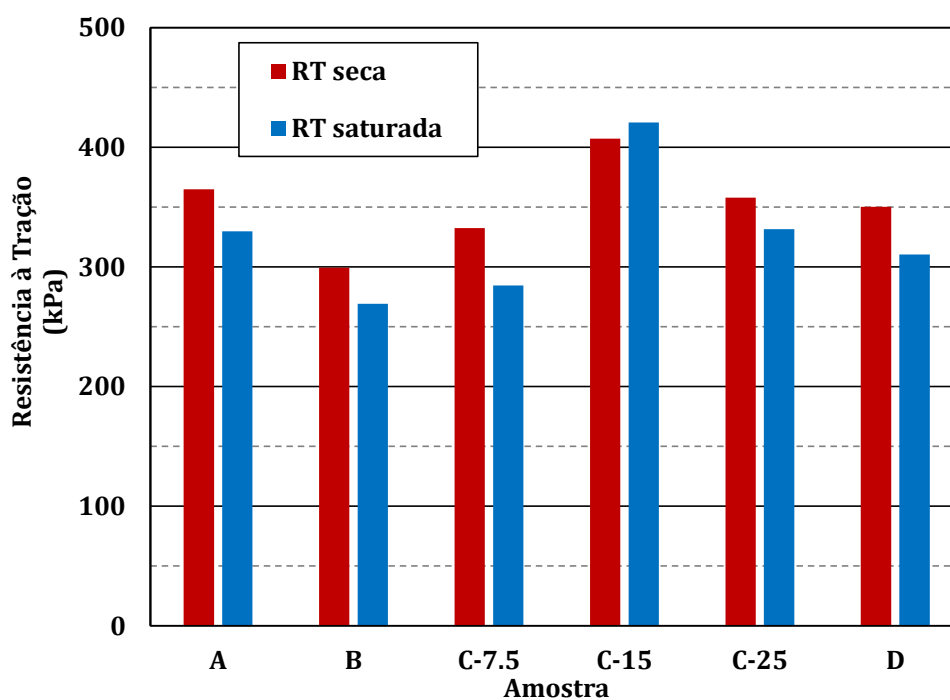


Figura 6.5: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado de São Paulo estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Na Figura 6.6 apresenta-se um resumo de valores médios de resistência à tração nas misturas com cal hidratada e cimento Portland. Observa-se a mesma tendência do cimento Portland produzir misturas estabilizadas com maior resistência à tração do que a cal hidratada.

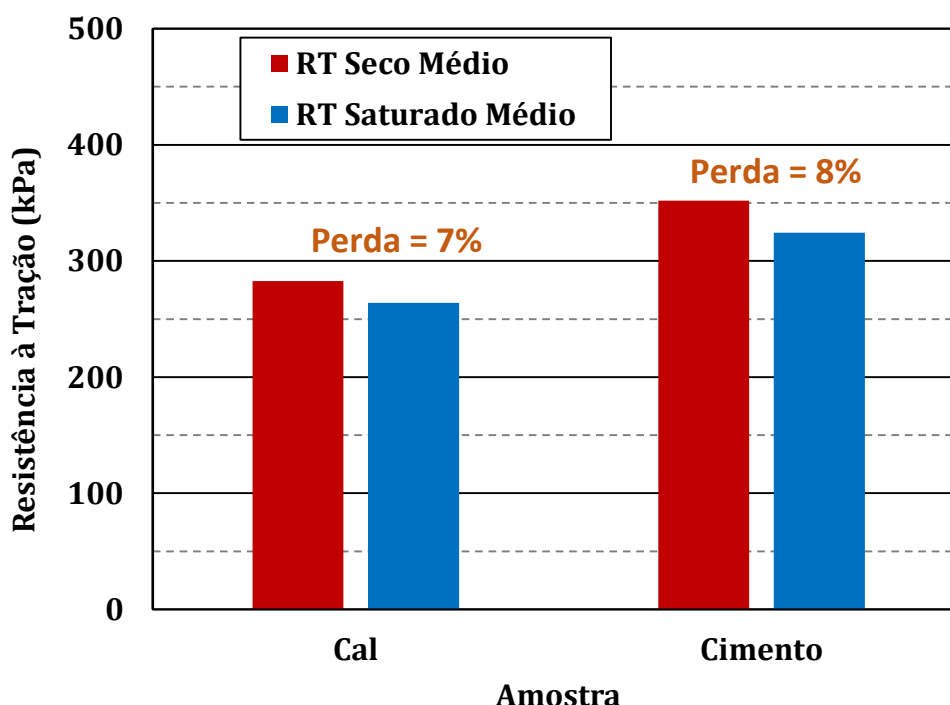


Figura 6.6: Resultados médios de resistência à tração seca e saturada, para as misturas de fresado estabilizado com espuma de asfalto, cal hidratada e cimento Portland

6.1.2. RESULTADOS PARA OS MATERIAIS COLETADOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Nos anexos deste relatório são apresentados todos os resultados da execução dos ensaios de módulo de resiliência diametral e resistência à tração por compressão diametral nas amostras do Estado do Rio de Janeiro. A seguir são apresentados esses resultados no formato resumido, para melhor visualizar as tendências obtidas.

6.1.2.1. Módulo de Resiliência Diametral

Nas Tabelas 6.5 e 6.6 são apresentados os resumos desses resultados para o parâmetro módulo de resiliência diametral, com o emprego de cal hidratada e cimento Portland, respectivamente.

Tabela 6.5: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

Local da Coleta	Amostra	MR Seco (MPa)	MR Saturado (MPa)	Perda de Rigidez (%)
km 197 PN RJ	E	2.783	3.680	-32
km 238 PN RJ	F	2.989	2.709	9
km 266 PN RJ	G	3.403	1.738	49
km 292 PS RJ	H	2.259	1.848	18
km 313 PS RJ	I	1.741	2.013	-16
km 322 PS RJ	J	2.600	2.509	3
Média (MPa)		2.629	2.416	

Tabela 6.6: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado de Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Local da Coleta	Amostra	MR Seco (MPa)	MR Saturado (MPa)	Perda de Rigidez (%)
km 197 PN RJ	E	4.065	3.460	15
km 238 PN RJ	F	3.914	3.643	7
km 266 PN RJ	G	4.637	4.160	10
km 292 PS RJ	H	3.313	3.207	3
km 313 PS RJ	I	3.565	3.559	0
km 322 PS RJ	J	3.178	3.162	0
Média (MPa)		3.779	3.532	

Os resultados das Tabelas 6.8 e 6.9 também são apresentados nas Figuras 6.1 e 6.2 e, pode-se observar que, de maneira geral, a rigidez das misturas com materiais do Estado do Rio de Janeiro e com cimento Portland é maior quando comparada com a rigidez das misturas com cal hidratada, assim como também foi observado nos materiais fresados coletados no Estado de São Paulo.

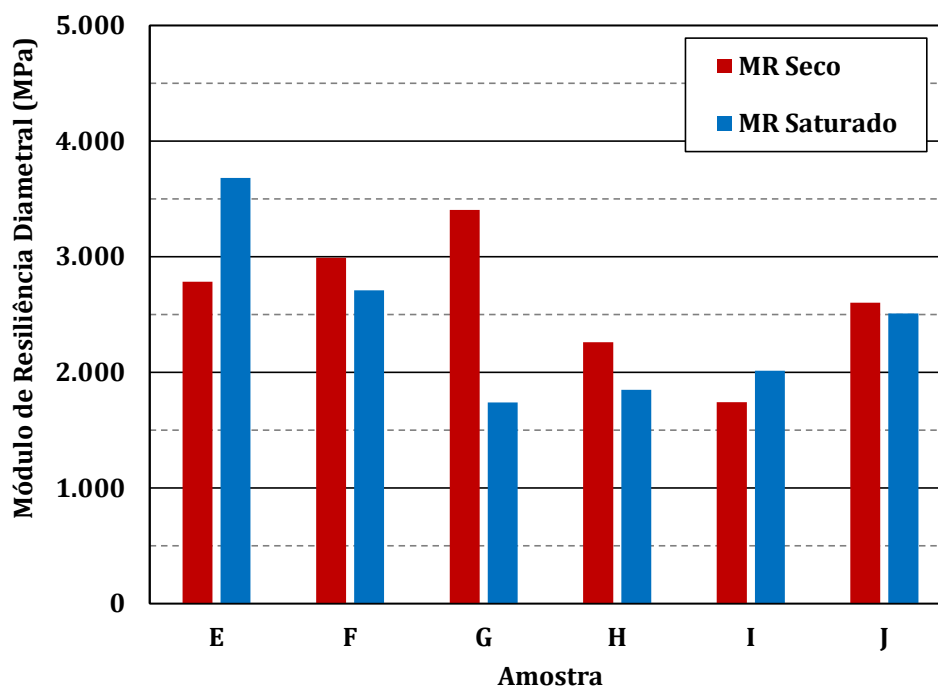


Figura 6.7: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

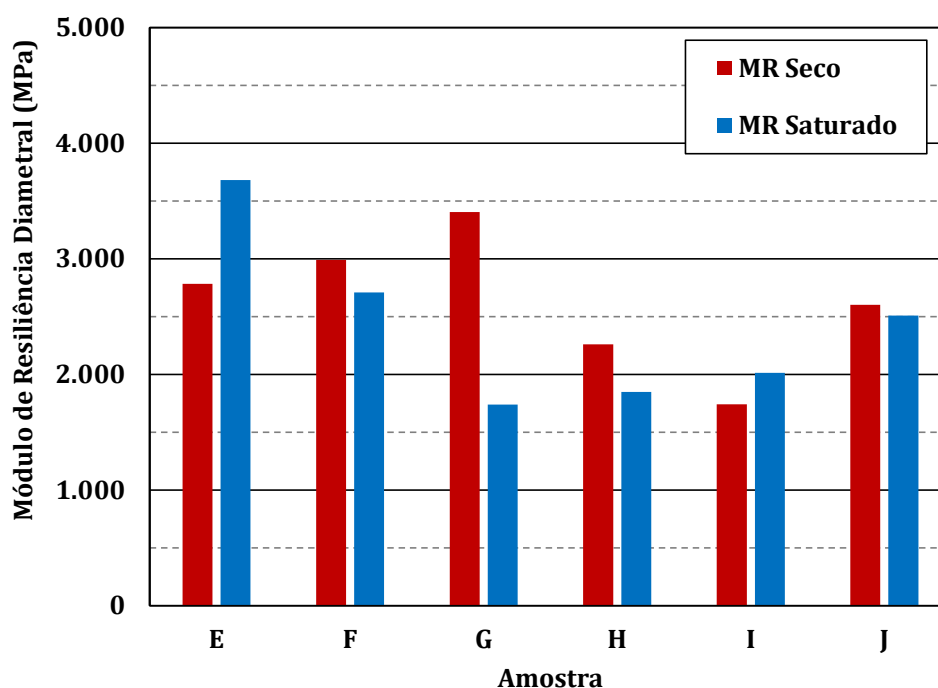


Figura 6.8: Resultados do ensaio de módulo de resiliência diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Na Figura 6.9 é apresentado um comparativo dos valores médios de módulo de resiliência obtidos nas misturas com cimento Portland e com cal hidratada. Constata-se que o cimento produz misturas com maior rigidez também nas misturas com materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

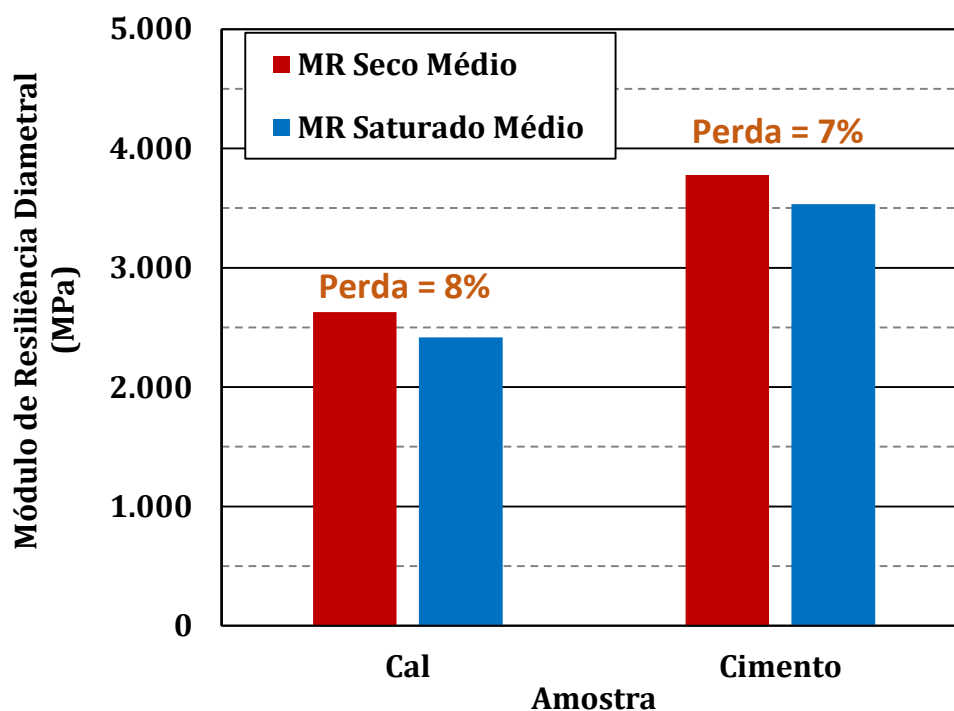


Figura 6.9: Resultados médios de módulo de resiliência seco e saturado, para as misturas de fresado estabilizado com espuma de asfalto, cal hidratada e cimento Portland

6.1.2.1. Resistência à tração por compressão diametral

Nas Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam-se os resultados de resistência à tração por compressão diametral para as misturas de material fresado estabilizadas com espuma de asfalto e cal hidratada e cimento Portland, respectivamente.

Tabela 6.7: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro com cal hidratada

Local da Coleta	Amostra	RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	Perda de Resistência (%)
km 197 PN RJ	E	370	504	-36
km 238 PN RJ	F	299	313	-5
km 266 PN RJ	G	367	306	17
km 292 PS RJ	H	227	193	15
km 313 PS RJ	I	249	279	-12
km 322 PS RJ	J	395	377	5
Média (MPa)		318	329	

Tabela 6.8: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro com cimento Portland

Local da Coleta	Amostra	RT seca (MPa)	RT saturada (MPa)	Perda de Resistência (%)
km 197 PN RJ	E	327	341	-4
km 238 PN RJ	F	386	312	19
km 266 PN RJ	G	394	312	21
km 292 PS RJ	H	311	270	13
km 313 PS RJ	I	339	343	-1
km 322 PS RJ	J	315	270	14
Média (MPa)		345	308	

Os resultados das Tabelas 6.7 e 6.8 também são apresentados de forma gráfica nas Figuras 6.10 e 6.11, e pode-se notar que a resistência à tração por compressão diametral é similar nas misturas de material fresado estabilizado com cimento Portland e com cal hidratada.

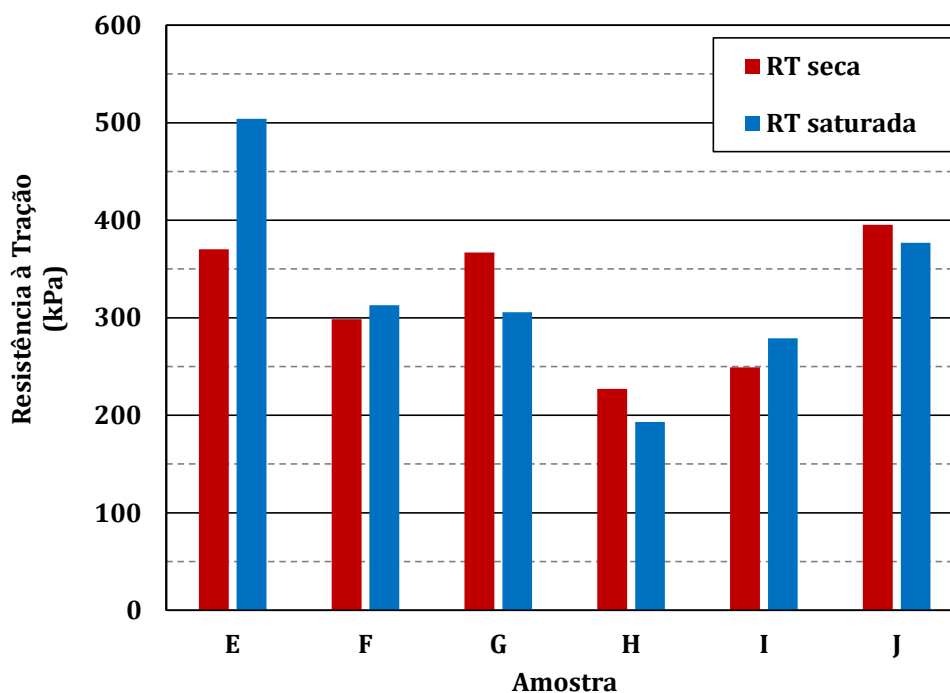


Figura 6.10: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cal hidratada

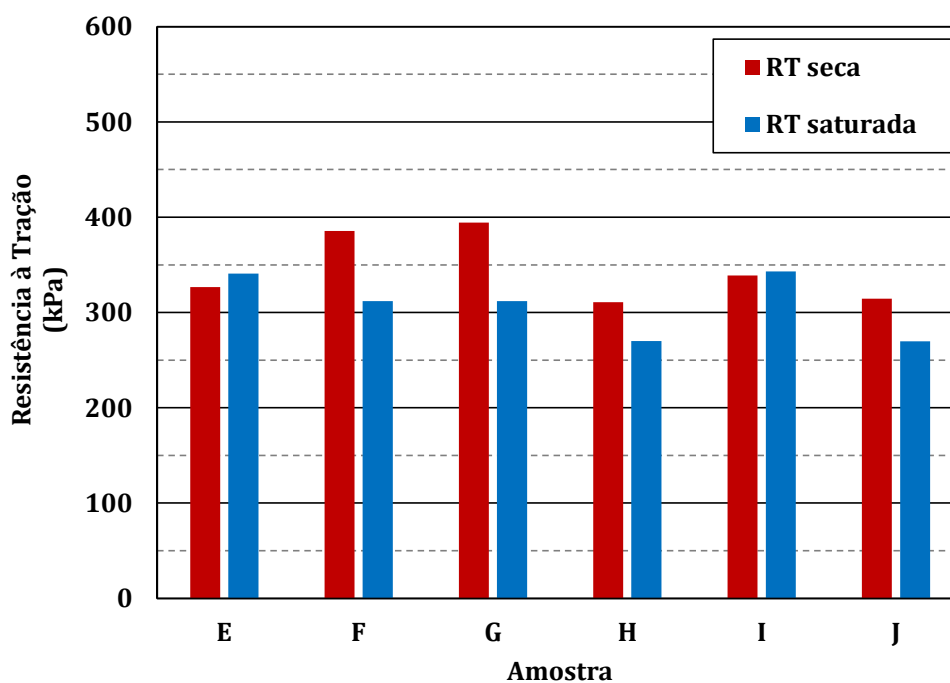


Figura 6.11: Resultados de resistência à tração por compressão diametral do material fresado do Estado do Rio de Janeiro estabilizado com espuma de asfalto e cimento Portland

Na Figura 6.12 apresenta-se um resumo de valores médios de resistência à tração nas misturas com cal hidratada e cimento Portland. Observa-se a mesma tendência citada anteriormente, o cimento Portland tende a produzir misturas estabilizadas de resistência à tração similar à obtida nas misturas que empregaram cal hidratada, para os materiais coletados no Estado do Rio de Janeiro.

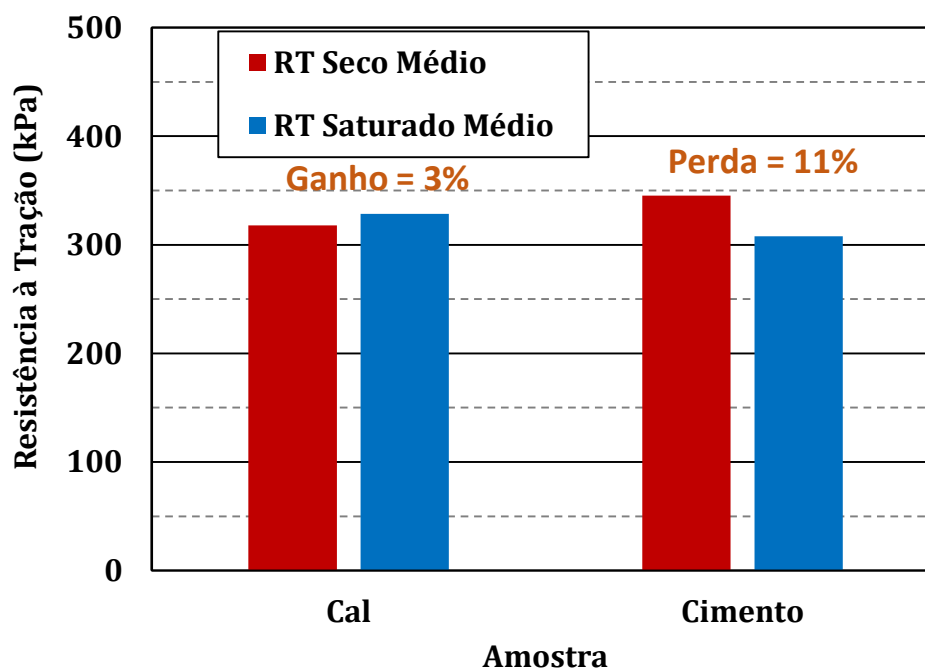


Figura 6.12: Resultados médios de resistência à tração seca e saturada, para as misturas de fresado estabilizado com espuma de asfalto, cal hidratada e cimento Portland

6.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os ensaios de compressão triaxial foram executados de acordo com as recomendações da Asphalt Academy (2009). Os ensaios nos materiais deste estudo foram realizados pela COPAVEL Consultoria Engenharia de Rodovias e Estradas, com os dados compactação e dosagem obtidos no decorrer da pesquisa. Nas Tabelas 6.9 a 6.11 são apresentados os resultados desses ensaios.

Tabela 6.9: Resultados dos ensaios triaxiais da amostra km 05 PS SP

Tensão de Confinamento (σ_3) (kPa)	0	50	100	200	100 Saturado
Umidade Após Ruptura (%)	2.9	1	1.8	2.2	6.7
Temperatura após ruptura (°C)	26	26.5	26.5	27	26
Deslocamento (mm)	3.5	6	14	16.9	15.1
Carga Máxima Aplicada (kN)	4	13.3	17	22.4	13.7
Tensão Máxima Aplicada (kPa)	227	767	971	1277	784
Tensão Máxima de Ruptura (kPa)	229	770	974	1280	786
Coesão (C) (kPa)	87				
Coesão Retida (%)	79				
Ângulo de Atrito (ϕ)	41.4				

Tabela 6.10: Resultados dos ensaios triaxiais da amostra km 106 PN SP

Tensão de Confinamento (σ_3) (kPa)	0	50	100	200	100 Saturado
Umidade Após Ruptura (%)	2	2.5	2.1	1.9	5.9
Temperatura após ruptura (°C)	26	26	26	26	24
Deslocamento (mm)	4.4	8.3	17.4	18	17.9
Carga Máxima Aplicada (kN)	4.4	8.5	13.7	18.7	15.3
Tensão Máxima Aplicada (kPa)	256	487	791	1084	889
Tensão Máxima de Ruptura (kPa)	259	489	794	1087	891
Coesão (C) (kPa)	72				
Coesão Retida (%)	114				
Ângulo de Atrito (ϕ)	37.8				

Tabela 6.11: Resultados dos ensaios triaxiais da amostra km 207 PN SP

Tensão de Confinamento (σ_3) (kPa)	0	50	100	200	100 Saturado
Umidade Após Ruptura (%)	2.8	2.9	2.7	3.1	6
Temperatura após ruptura (°C)	28	27	27	26	24.5
Deslocamento (mm)	3.6	10.5	16.2	17.8	15.6
Carga Máxima Aplicada (kN)	2.6	8.7	13.3	19.7	14.3
Tensão Máxima Aplicada (kPa)	148	494	750	1115	808
Tensão Máxima de Ruptura (kPa)	150	497	753	1118	811
Coesão (C) (kPa)	50				
Coesão Retida (%)	109				
Ângulo de Atrito (ϕ)	40.6				

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são apresentados os dois principais parâmetros necessários, coesão e ângulo de atrito, respectivamente, para desenvolver dimensionamento de pavimentos com camadas de BSM (*Bitumen Stabilized Material*). Os resultados de coesão variaram de 50 até 87kPa, valores considerados um pouco baixos, caracterizando o material como um BSM3, de acordo com a Asphalt Academy (2009). Já os resultados de ângulo de atrito foram em torno de 40°C, caracterizando os materiais, de acordo a esse parâmetro, como BSM1.

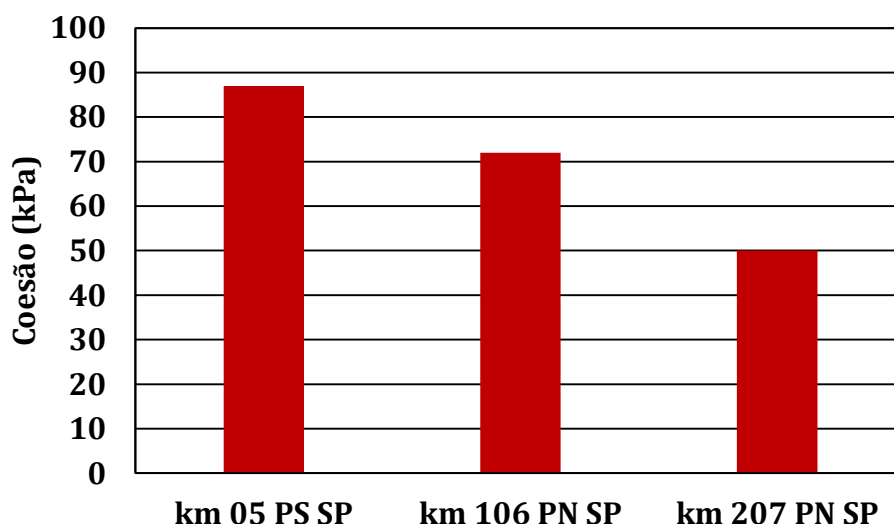


Figura 6.13: Resultados de coesão nas amostras estudadas

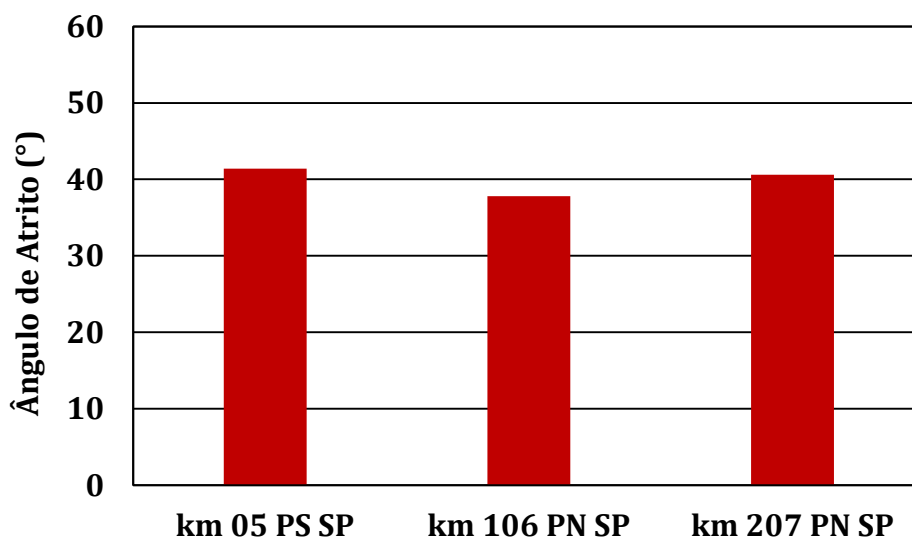


Figura 6.14: Resultados de ângulo de atrito nas amostras estudadas

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades de manutenção de pavimentos asfálticos por meio da fresagem dos revestimentos geram o passivo ambiental denominado “fresado asfáltico”. Esse material apresenta excelentes características mecânicas para poder ser reaproveitado na conformação de novas camadas de pavimentos com boa contribuição estrutural. O objetivo deste estudo foi avaliar a possibilidade de reutilizar o fresado asfáltico estabilizado com espuma de asfáltico, para obter um material com as características de um BSM (*Bitumen Stabilized Material*).

O desenvolvimento deste estudo consistiu inicialmente em um levantamento bibliográfico com o propósito de obter as informações necessárias para executar o planejamento laboratorial. Após essa investigação, determinou-se a necessidade de realizar em laboratório:

- A caracterização dos materiais fresados e correção granulométrica;
- Dosagem para determinação do teor de umidade e de espuma asfáltica;
- Execução de ensaios mecânicos para caracterizar o BSM.

Os materiais empregados no estudo foram coletados ao longo da Rodovia Presidente Dutra, tanto no trecho do Estado de São Paulo como no Estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de conhecer as características do material fresado oriundo de diversas fontes. A caracterização laboratorial desses materiais indicou similitude, sendo necessária a correção granulométrica na maioria dos casos para atender as faixas recomendadas pela Wirtgen (2012) e adotadas para este estudo. Para realizar essa correção granulométrica adicionou-se pó de pedra, nas proporções de 7,5% até 25%, de acordo à fonte do fresado asfáltico, e 1,0% de cal hidratada ou 1,0% de cimento Portland.

Para a dosagem desses materiais, foi realizada a moldagem de corpos de prova cilíndricos com o soquete Proctor grande e obtiveram-se teores ótimos de umidade de 4,9 a 6,2% de acordo à fonte de origem do fresado asfáltico.

Na determinação do teor de espuma asfáltica ideal, os corpos de prova foram moldados com distintos teores com o auxílio de um compactador vibratório. Os teores de espuma asfáltica de projeto foram de 1,8% a 2,0% para os distintos fresados asfálticos coletados neste estudo, para atender aos critérios de resistência à tração seca e resistência à tração saturada recomendadas pela Asphalt Academy (2009).

Após a conclusão das dosagens dos materiais foram realizados ensaios de caracterização mecânica, por meio do ensaio de compressão cíclica diametral de corpos de prova cilíndricos, compressão diametral estática e por meio do ensaio de compressão triaxial estática.

Nos ensaios de compressão cíclica diametral e compressão estática diametral, os corpos de prova foram moldados no compactador vibratório com cal hidratada e com cimento Portland, com o objetivo de avaliar a possibilidade de empregar esses fíleres na estabilização do fresado asfáltico. Os resultados indicaram que o emprego de cimento Portland incrementa a rigidez e a resistência à tração do material fresado estabilizado com espuma asfáltica. Também foi observado que, o emprego desse fíler, reduz a perda de resistência e rigidez após saturação, o que indica uma boa resistência à ação deletéria da água. No entanto, os resultados com cal hidratada também foram satisfatórios e atenderam aos parâmetros mecânicos recomendados na bibliografia estudada.

Os ensaios triaxiais executados no material fresado estabilizado com espuma asfáltica e cal hidratada mostraram que as amostras poderiam ser caracterizadas como BSM3, de acordo com a classificação da Asphalt Academy (2009).

Os resultados dos ensaios descritos anteriormente mostraram, de forma geral, que o material fresado coletado ao longo da Rodovia Presidente Dutra apresenta excelentes características para poder ser aproveitado na constituição de novas camadas estruturais de pavimentos. A reutilização desse material para novas obras e para atividades de manutenção, se traduziria em diversas vantagens para o meio ambiente, já que estar-se-ia reduzindo a necessidade de explorar novos recursos naturais e também dispor-se-ia o fresado asfáltico de forma correta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M 85. *Standard Specification for Portland Cement*. American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ARRA. (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*. Asphalt Recycling and Reclaiming Association.
- Asphalt Academy (2009). Método 8. *The determination of the maximum dry density and optimum moisture content of materials using the vibratory hammer compaction*. Pretória, República da África do Sul.
- AsphaltAcademy. (2009). *Technical guideline: Bitumen stabilized materials*. TG2, Second Edition. Pretória, República da África do Sul.
- BONFIM. (2007). *Fresagem de Pavimentos Asfálticos*. 3ª Edição. Exceção Editorial. ISBN: 978-85-60735-00-6. São Paulo, SP.
- CNT. (2016). Confederação Nacional do Transporte. <http://www.cnt.org.br/>. Acessado em 10/10/2016.
- COSTA, M. O. (2016). *Considerações sobre os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- DAL BEN, M. (2014). *Resilient Response and Performance of Bitumen Stabilized Materials with Foam incorporating Reclaimed Asphalt*. Tese de Doutorado. Stellenbosch University. República da África do Sul.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER. (1997). *Concreto betuminoso reciclado à quente no Local*. Rio de Janeiro, RJ.
- EBELS, L. J. (2008). *Characterization of Material Properties and Behavior of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements*. Tese de Doutorado. Stellenbosch University. República da África do Sul.
- FHWA. (1997). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction – Stabilized Base – Application Description*. Federal Highway Administration. Publication Number FHWA-RD-97-148. Estados Unidos.

- GUATIMOSIM, F. V. (2015). *Mechanical behavior and structural performance of recycled foamed bitumen stabilized materials*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- JENKINS, K. J. (2000). *Mix Design Considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen*. Tese de Doutorado. Stellenbosch University. República da África do Sul.
- JENKINS, K. J.; VAN DER VEN, M. F. C.; MOLENAAR, A. A. A.; GROOT, J. L. A. (2002). *Performance prediction of cold foamed mixes*. Em: Proceedings 9th International Conference on Asphalt Pavements. Copenhagen, Denmark.
- JENKINS, K. J. (2012). *Cracking Behaviour of Bitumen Stabilised Materials (BSMs): Is there such a thing?* Em: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Volume 4, RILEM Book Series, pp 1007-2015.
- JONES, D.; FU, P.; HARVEY. (2009). *Full-Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt in California: Guidelines for Project Selection, Design, and Construction*. Caltrans UCPRC-GL-2008-01. FHWA No. CA 101069D. Califórnia, Estados Unidos.
- JOOSTE, F. E LONG, F. (2007). *A Knowledge Based Structural Design Method for Pavements Incorporating Bituminous Stabilized Materials*. Technical Memorandum preparado para o Gauteng Department of Public Transport, Roads and Works. Johannesburg, República da África do Sul.
- KENDALL, M.; BAKER, B.; EVANS, P.; RAMANUJAN, J. (1999). *Foamed Bitumen Stabilisation*. Em: Southern Region Symposium. Austrália.
- KOWALSKI, T. E. E STARRY, JR. W. S. (2007). *Cold recycling using foamed bitumen*. Em: Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Saskatoon, Saskatchewan. Canadá.
- MULUSA, W. K. (2009). *Development of a Simple Triaxial Test for Characterising bitumen stabilized materials*. Dissertação de Mestrado. Stellenbosch University. República da África do Sul.
- PINTO, S. (1989). *Tópicos Especiais em Mecânica dos Pavimentos*. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- TUCHUMANTE, JR. O. (1999). *Reciclagem de Pavimentos – Conceitos, Interpretações e Controle*. Betunel Indústria e Comércio LTDA.

- TWAGIRA, E. M. (2010). *Influence of Durability Properties on Performance of Bitumen Stabilized Materials*. Tese de Doutorado. Stellenbosch University. República da África do Sul.
- VAN NIEKERK, W. (2016). *Foamed Bitumen Stabilisation Design*. BSM Workshop Kassel, Alemanha.
- WIRTGEN. (2016). Disponível em: <http://www.wirtgen.de/> Acessado em: 10/10/2016.
- WORKSHOP DE KASSEL (2016). Evento promovido pela Wirtgen para atualização de normas do processo de dosagem e avaliação do BSM.