WILSON UNGER FILHO

Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado

São Paulo
2019

WILSON UNGER FILHO

Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Rosângela dos Santos Motta

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Unger Filho, Wilson

Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado / W. Unger Filho -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
169 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação 2.Pavimentação asfáltica 3.Reciclagem a frio 4.Material asfáltico fresado 5.Sustentabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, Walter Unger, in memoriam.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Rosangela Motta, pela orientação e apoio incondicional durante os quase quatro anos dessa pesquisa, que não me deixou desistir, nem mesmo depois da terceira troca de tema, e fez o possível e o impossível para a conclusão dessa pesquisa.

À Diretora da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Prof^a. Dr^a. Liedi Légi Bariani Bernucci, que me acolheu, por duas vezes, em momentos de indefinição, e conseguiu corrigir o curso e viabilizar essa dissertação.

Aos membros da minha banca, Prof^a. Dr^a. Laura Maria Goretti da Motta e Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti.

À CCR *Engelog*, em nome do Superintendente de Investimentos Eng. Wilson Geraldo França e do Diretor Eng. Décio de Rezende Souza, que me deram a oportunidade e todo o apoio para cursar o mestrado e para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecimento este que se estende aos colaboradores das áreas de Desenvolvimento Tecnológico, Monitoração, Projetos, Orçamentos, Qualidade, Meio Ambiente e Contratações, que colaboraram direta ou indiretamente pelo sucesso do trecho experimental.

Em especial, ao Dr. Luis Miguel Gutierrez e à Coord. Eng^a. Valéria Faria e aos técnicos de laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR Nova Dutra pela realização dos ensaios e pelas dicas sempre pertinentes.

À CCR *ViaOeste*, em nome do Superintendente de Investimentos Eng. José Roberto Viana e do Eng. Flavio Ciccone, por terem comprado a ideia e topado fazer no seu quintal essa pesquisa, pessoas na qual agradeço a todos os colaboradores do Braço Avançado e da área de Qualidade.

Ao meu coordenador, Eng. Paulo Ricardo Vicente, principalmente, mas não apenas, pela precisão cirúrgica no convencimento da Diretoria para a utilização da técnica.

À Dr^a. Sandra Margarido Bertollo, que humildemente dividiu comigo o projeto de implantação das faixas adicionais da Castello Branco para que pudéssemos viabilizar a utilização da reciclagem a frio na concepção da estrutura e deu todo o suporte necessário para a sua implementação (inclusive as ligações para as pessoas certas).

À Prof^a. Dr^a. Kamilla Vasconcellos pelas dicas, conselhos, artigos e pelo convite para a reunião do RILEM, pessoa na qual agradeço todos os professores e funcionários do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da POLI-USP.

Ao 'quase' Eng. João Barbi pela ajuda no processamento e consolidação dos dados de laboratório e controle tecnológico.

Ao 'Carlão', pelo apoio nas coletas de RAP e pelo empréstimo, escondido, da caminhonete para que eu conseguisse levar o material para realização dos ensaios.

À ARTESP, em nome do Dr. Santi Ferri, por ter viabilizado junto ao órgão a construção da pista experimental.

Ao Eng. Osvaldo Tuchumantel e ao Dr. Rômulo Constantino, da Betunel, pela insistência, sempre benéfica, para a utilização de seus produtos e pela ajuda, dicas e conselhos.

Aos Eng. Maximiliano Lucas, Eng. Edgardo Lucas e Eng. Adilson Vinha, da Brown Brown, pelas conversas, consultorias e pela viabilização da usinagem da mistura.

Aos meus amigos da CCR, que não vou listar nominalmente aqui para não cometer gafe de esquecer alguém. Mas se você é meu amigo e me ajudou nessa pesquisa (ou tomou comigo uma cerveja nos intervalos), muito obrigado!

Aos meus colegas de mestrado da Universidade de São Paulo.

Aos meus pais, Wilson e Helena, pelo carinho, dedicação e, sobretudo, pela abdicação de boa parte de suas vidas para poder me proporcionar chegar até aqui.

Às famílias Unger, Iglesias, Leite e Biscuola por todo o apoio durante esses quase 4 anos.

E, em especial, à minha namorada, noiva e esposa, Carolina, companheira de 10 anos que tem aguentado, desde janeiro de 2015, eu falar "quando acabar o mestrado nós vamos...". Que precisou sair da casa dos pais e embarcar na loucura de casar comigo para conseguir me ver, que deu todo apoio que eu precisava e nem sempre merecia. Obrigado.

RESUMO

UNGER FILHO, W. **Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2018.

A restauração de pavimentos flexíveis ocasiona, em todo o mundo, problemas ambientais em função do descarte dos materiais provenientes da demolição do pavimento existente, um dos motivos pelo qual a reciclagem de pavimentos tem se mostrado, cada vez mais, uma técnica sustentável e necessária, tanto na manutenção quanto na construção de novas estruturas. Na atualidade, existem as mais diversas técnicas de reciclagem. Neste trabalho, avaliou-se a reciclagem do revestimento asfáltico fresado (RAP) com a adição de agente de reciclagem emulsionado (ARE), estudando a viabilidade de seu emprego em bases asfálticas de pavimentos novos. Por meio de um programa laboratorial de ensaios, foi realizada a análise da estocagem, cura e compactação de uma mistura produzida em uma usina de reciclagem a frio. Para tanto, utilizou-se os parâmetros de módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e dano por umidade induzida (DUI). A compactação da mistura no laboratório foi realizada com o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e com o Compactador Marshall, sendo avaliada a influência do tempo de estocagem, que é o tempo transcorrido entre a mistura e a compactação (na condição solta), e o tempo de cura após a compactação dos corpos de prova. Os resultados indicam que os parâmetros de MR, RTCD e DUI aumentaram quando a mistura solta permaneceu estocados, pela provável interação entre o agente de reciclagem emulsionado e o ligante asfáltico oxidado do RAP. Foi observado ainda um ganho substancial nos valores de MR e RTCD durante o período de cura, o qual foi pouco influenciado pela estocagem prévia do material. Quanto ao efeito do tipo de compactação, foi possível observar que os corpos de prova produzidos no CGS apresentaram maiores valores de RTCD, MR e DUI em relação aos corpos de prova do compactador Marshall, chegando, inclusive, a dobrar o valor de RTCD após 56 dias de cura. Também foi realizada a construção de dois trechos experimentais com a mistura reciclada estudada, visando o acompanhamento da execução, assim como, o

monitoramento do desempenho da mistura, em campo, ao longo do tempo. Constatou-se que foi possível atingir a densidade obtida na compactação Marshall desde que sejam utilizados rolos compactadores adequados e que a espessura da camada seja limitada em até 8 cm. Já os levantamentos defletoométricos realizados durante o monitoramento confirmaram o comportamento mecânico observado em laboratório, indicando o ganho de rigidez da base reciclada ao longo do tempo. Conclui-se, portanto, que o emprego da mistura a frio de RAP com agente de reciclagem emulsionado é uma alternativa viável para a construção de bases de pavimentos rodoviários novos.

Palavras-chave: Pavimentação. Pavimentação asfáltica. Reciclagem a frio. Material asfáltico fresado. Sustentabilidade.

ABSTRACT

UNGER FILHO, W. **Study of a cold recycled asphalt mix produced with 100% of reclaimed asphalt pavement and emulsified asphalt recycling agent.** Master Dissertation. Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 2018.

Asphalt pavements maintenance produces worldwide residues from milling of deteriorated pavements. Therefore, pavement recycling is a sustainable and necessary technique for new pavement construction and rehabilitation. Nowadays, there many technologies to apply recycling to pavement maintenance. This study evaluated the reuse of the reclaimed asphalt pavement (RAP) mixed with emulsified asphalt recycling agent and its viability to be used as an asphalt base course in new pavements. A laboratory program was used to assess the storage, the cure and compaction of a mix of RAP - emulsified asphalt recycling agent produced in a cold central plant recycling plant (CCPR). The resilient modulus (MR), the indirect tensile strength (ITS) and the moisture induced damage (MID), were used. The compaction at the laboratory was performed using de Superpave Gyratory Compactor (SGC) and the Marshall compactor. The storage period is referred as the time elapsed between the mix and the compaction, in the loose condition. On the other hand, the curing period is associated to the period elapsed after compaction of the specimens. Results showed that the storage period has little effect on the MR, ITS and MID parameters. However, this period was important to likely allow the emulsified asphalt recycling agent to interact with the aged asphalt binder from the RAP. It was observed a substantial increase of MR and ITS parameters during the curing and, again, the storage period had little effect on this. Regarding the compaction method, the SGS specimens had higher values at ITS, MR and MID values, when compared to the Marshall specimens. At the curing time of 56 days, the ITS was doubled at the SGS specimens. Additionally, this study performed the construction of two trial sections with the studied mix. The goal was to register the execution and assess its performance in field during a period. It was verified that in field is possible to reach Marshall densities, since adequate roller compactors are used with specific thickness. The performance of the trial sections was done from FWD testing. These results confirmed the laboratory mechanical behavior

of the recycled cold mix, showing that the curing increase of the stiffness. Therefore, it is concluded that the cold mix using emulsified asphalt recycling agent is a viable alternative for the base course construction of new road pavements.

Keywords: Pavement. Asphalt paving. Cold recycling. Reclaimed asphalt pavement. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipo indicado de reciclagem para diferentes índices de condição do pavimento	31
Figura 2 – Aparência do RAP – <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>	32
Figura 3 – Relação de rigidez e flexibilidade entre misturas asfálticas, estabilizadas e cimentadas...	38
Figura 4 – Comparação da continuidade da ligação entre agentes de reciclagem emulsionados e de asfalto espumado	40
Figura 5 – Trincas de reflexão em dois segmentos de fresagem e recomposição após 13 anos: (a) recomposição com concreto asfáltico (b) recomposição com mistura reciclada a frio	44
Figura 6 – Trem de reciclagem a frio <i>in situ</i> com fresadora, recicladora e vibroacabadora	46
Figura 7 – Trem de reciclagem a frio <i>in situ</i> com fresadora, recicladora, <i>windrow elevator</i> e vibroacabadora	46
Figura 8 – Usina estacionária de reciclagem KMA 220 Wirtgen.....	48
Figura 9 – Variação do módulo de resiliência com o teor de asfalto residual em David (2006)	52
Figura 10 – Módulos retroanalizados por Andrade (2017)	54
Figura 11 – Volume de vazios em diferentes métodos de compactação em Mollenhauer (2016)	56
Figura 12 – RTCD em diferentes método de compactação por Mollenhauer (2016)	57
Figura 13 – Fluxograma da pesquisa no trecho experimental 1 - restauração de por meio de fresagem e recomposição	58
Figura 14 – Fluxograma da pesquisa no trecho experimental 2 - implantação de duas faixas adicionais	59
Figura 15 – Granulometria do RAP antes da extração de asfalto (<i>black curve</i>) – estoque 1	62
Figura 16 – Granulometria do RAP após a extração de asfalto (<i>white curve</i>) – estoque 1	63
Figura 17 – Granulometria do RAP antes da extração de asfalto (<i>black curve</i>) - estoque 2	64
Figura 18 – Granulometria do RAP após a extração de asfalto (<i>white curve</i>) – estoque 2.....	64
Figura 19 – Extrator Soxhlet para determinação do teor de ligante	65
Figura 20 – Teor de asfalto residual no RAP	65
Figura 21 – Destilador Abson para recuperação do ligante asfáltico extraído	67
Figura 22 – Ensaio de penetração nas amostras coletadas antes e depois da incorporação do agente de reciclagem no RAP	68
Figura 23 – Ensaio de ponto de amolecimento nas amostras coletadas antes e depois da incorporação do agente de reciclagem	68

Figura 24 – Resumo dos parâmetros Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1	71
Figura 25 – Resumo das parâmetros Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2	72
Figura 26 – Segmento da Rodovia Castello Branco antes da obra de restauração (2016)	74
Figura 27 – Seção transversal da estrutura do pavimento no km 33+000 da SP-280	75
Figura 28 – Seção transversal da solução de restauração do pavimento no km 32 da SP-280	76
Figura 29 – Estrutura da recomposição da estrutura do pavimento do teste do km 32	77
Figura 30 – Retográfico da implantação das faixas adicionais da SP-280	78
Figura 31 – Estrutura original para implantação das faixas adicionais	84
Figura 32 – Estrutura final de implantação das faixas adicionais internas	87
Figura 33 – Seção tipo da estrutura de implantação das faixas adicionais: declividade voltada ao canteiro central	87
Figura 34 – Seção tipo da estrutura implantação das faixas adicionais: declividade voltada à pista existente (superelevação)	88
Figura 35 – Recicladora a frio RT-500 da ROADTEC	89
Figura 36 – Desenho esquemático do funcionamento recicladora usada nesta pesquisa	89
Figura 37 – Configuração da RT-500 como uma usina estacionária	90
Figura 38 – Alimentação da usina utilizada da nesta pesquisa com pá carregadeira	91
Figura 39 – Aspecto da mistura reciclada a frio com agente de reciclagem utilizando RAP do estoque 1	92
Figura 40 – Vista área da usina de reciclagem a frio mobilizada para a obra do trecho 2	92
Figura 41 – Detalhe da usina de reciclagem a frio mobilizada para a obra do trecho 2	93
Figura 42 – Massa específica aparente seca e volume de vazios em função da metodologia e da energia de compactação para a mistura reciclada usada no trecho 2 desta pesquisa	96
Figura 43 – Prensa UTM utilizada para ensaios de MR e RT da mistura reciclada desta pesquisa	99
Figura 44 – Evolução do módulo de resiliência com a cura e o tempo de estocagem - CPs Marshall 75 golpes	99
Figura 45 – Evolução do módulo de resiliência com a cura e o tempo de estocagem - CPs SUPERPAVE 50 giros	100
Figura 46 – Evolução da resistência à tração com a cura e o tempo de estocagem– CPs Marshall 75 golpes	100
Figura 47 – Evolução da resistência à tração com a cura e o tempo de estocagem – CPs SUPERPAVE 50 giros	101

Figura 48 – Evolução do MR com 120 dias de estocagem e o tempo de cura variável com o RAP do estoque 1	102
Figura 49 – Evolução da RTCD com 120 dias de estocagem e o tempo de cura variável com o RAP do estoque 1	102
Figura 50 – DUI aos 7 dias de cura em corpos prova SUPERPAVE	104
Figura 51 – DUI aos 7 dias de cura em corpos prova Marshall	104
Figura 52 – Aspecto da caixa de fresagem na espessura de 24 cm do trecho 1 desta pesquisa	106
Figura 53 – Regularização da superfície da mistura reciclada com rolo duplo tandem – trecho 1	107
Figura 54 – Compactação com rolo de pneus da mistura reciclada – trecho 1	107
Figura 55 – Conclusão da fresagem e recomposição do trecho 1 desta pesquisa	108
Figura 56 – Variação dos materiais de reforço do subleito e de sub-base na implantação da faixa adicional do km 44 – trecho 2 desta pesquisa	109
Figura 57 – Homogeneização e estabilização do subleito do trecho 2.....	110
Figura 58 – Execução do dreno de pavimento na implantação do trecho 2.....	110
Figura 59 – Vista da usina beneficiadora de RCD utilizada no trecho 2 desta pesquisa	111
Figura 60 – RCD graúdo na usina beneficiadora, usado no trecho 2.....	112
Figura 61 – RCD de granulometria fina na usina beneficiadora, usado no trecho 2	112
Figura 62 – Faixa de projeto e curva granulométrica do RCD de concreto para execução do reforço do subleito do trecho 2	113
Figura 63 – Compactação da camada de reforço do subleito com RCD no trecho 2	114
Figura 64 – Pátio de escória de aciaria da Gerdau dividido em baias por tempo de estocagem usando no trecho 2	115
Figura 65 – Diferença das duas granulometrias da escória de aciaria usadas no trecho 2	115
Figura 66 – Curva granulométrica da escória de aciaria	116
Figura 67 – Detalhe da camada de resíduo de construção usado no trecho 2	117
Figura 68 – Detalhe da camada de escória de aciaria com enchimento em bica corrida	117
Figura 69 – Detalhe da camada acabada de BGS do trecho 2	118
Figura 70 – Curva granulométrica da mistura de escória de aciaria com fino de RCD usada no trecho 2	119
Figura 71 – Execução da primeira camada de mistura reciclada a frio no trecho 2.....	120
Figura 72 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo pé-de-carneiro no trecho 2	121
Figura 73 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo duplo tandem no trecho 2.....	121

Figura 74 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo de pneus no trecho 2.....	122
Figura 75 – Controle de compactação da mistura reciclada a frio com ensaio de frasco de areia no trecho 2.....	122
Figura 76 – Controle de compactação da camada reciclada a frio com <i>GeoGauge</i> no trecho 2.....	123
Figura 77 – Número de passadas de rolo de pneus, tandem e pé-de-carneiro para atingimento da massa específica dos CPs compactados segundo metodologia Marshall	124
Figura 78 – Relação entre a espessura da camada de mistura reciclada a frio e o grau de compactação, em relação à compactação Marshall – trecho 2.....	125
Figura 79 – Faixa adicional do km 50 concluída e aberta ao tráfego	126
Figura 80 – Deslocamento vertical – subleito – faixa adicional do km 50	127
Figura 81 – Deslocamento vertical –subleito – faixa do km 44.....	128
Figura 82 – Deslocamento vertical – reforço do subleito – faixa do km 50	128
Figura 83 – Deslocamento vertical – reforço subleito – faixa do km 44	128
Figura 84 – Deslocamento vertical – sub-base – faixa do km 50	129
Figura 85 – Deslocamento vertical – sub-base – faixa do km 44	129
Figura 86 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (1ª camada) – faixa do km 50	129
Figura 87 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (1ª camada) – faixa do km 44	130
Figura 88 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (2ª camada) – faixa do km 50	130
Figura 89 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (2ª camada) – faixa do km 44	130
Figura 90 – Deslocamento vertical – revestimento – faixa do km 50	131
Figura 91 – Deslocamento vertical – revestimento – faixa do km 44	131
Figura 92 – Correlação entre o módulo elástico linear equivalente de uma camada semi-infinita e o deslocamento recuperável calculado	133
Figura 93 – Correlação entre o módulo elástico linear da camada de reforço do subleito deslocamento recuperável calculado com viga <i>Benkelman</i>	135
Figura 94 – Correlação entre o módulo elástico linear da sub-base e deslocamento recuperável....	136
Figura 95 – Fissuras transversais geradas na mistura reciclada a frio em função da alta velocidade do rolo compactador de pneus	138
Figura 96 – Escorregamento transversal da mistura reciclada a frio em segmentos de elevada declividade transversal no trecho 2	139
Figura 97 – Estado do pavimento do trecho experimental 1 - 3 meses após a obra	141
Figura 98 – Terreno adjacente ao trecho experimental 1	142

Figura 99 – Trincamento por fadiga em função do acúmulo de água na estrutura do pavimento em um pequeno ponto do trecho 1	143
Figura 100 – Afloramento de água e bombeamento de finos na interface do reparo com o pavimento existente no trecho 1	143
Figura 101 – Deslocamento recuperável D_0 com FWD – km 50 ao 53 do trecho 2	146
Figura 102 – Deslocamento recuperável D_0 com FWD – km 44 ao 46 do trecho 2	146
Figura 103 – Deslocamento recuperável D_{120} com FWD - km 50 ao 53 do trecho 2	147
Figura 104 – Deslocamento recuperável D_{120} com FWD - km 44 ao 46 do trecho 2	148
Figura 105 – Índice da Curvatura da Superfície (SCI) - km 50 ao 53 do trecho 2.....	150
Figura 106 – Índice da Curvatura da Superfície (SCI) - km 44 ao 46 do trecho 2.....	150
Figura 107 – Índice de Danos à Base (BDI) - km 50 ao 53 do trecho 2	151
Figura 108 – Índice de Danos à Base (BDI) - km 44 ao 46 do trecho 2	152
Figura 109 –Índice da Curvatura da Base (BCI) - km 50 ao 53 do trecho 2.....	153
Figura 110 –Índice da Curvatura da Base (BCI) - km 44 ao 46 do trecho 2.....	153
Figura 111 – Módulo de elasticidade da mistura reciclada a frio obtido a partir da retroanálise das bacias de deflexão - km 50 ao 53 do trecho 2	156
Figura 112 – Módulo de elasticidade da mistura reciclada a frio obtido a partir da retroanálise das bacias de deflexão - km 44 ao 46 do trecho 2	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado do pavimento da malha pavimentada brasileira	22
Tabela 2 – Geração e uso de material fresado na Europa	24
Tabela 3 – Possibilidade de correção de defeitos com reciclagem a frio com agente de reciclagem ..	36
Tabela 4 – Classificação em mistura asfáltica ou em mistura estabilizada de reciclagem afrio	37
Tabela 5 – Massa específica de misturas recicladas em diferentes formas de compactação por Martínez (2007).....	55
Tabela 6 – Caracterização Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1	70
Tabela 7 – Caracterização Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2	71
Tabela 8 – Faixa granulométrica das misturas asfálticas - trecho 1	77
Tabela 9 – VDMA comercial em 2016 no trecho experimental 2.....	79
Tabela 10 – Distribuição de veículos comerciais por faixa no km 51+900 no ano de 2016	80
Tabela 11 – Fatores de equivalência de carga	81
Tabela 12 – Fatores de veículo.....	82
Tabela 13 – Número N de projeto	82
Tabela 14 – Cálculo do SN do pavimento original (do projeto)	86
Tabela 15 – Dimensionamento da estrutura alternativa pelo método da AASHTO (1993)	86
Tabela 16 – Massa específica máxima da mistura e do agregado (Rice Test)	95
Tabela 17 – Matriz experimental: avaliação do tempo de estocagem e cura.....	98
Tabela 18 – Resumo do controle deflectométrico com deflexão média por camada do trecho 2	131
Tabela 19 – Módulo de elasticidade do subleito do trecho 2	134
Tabela 20 – Módulo de elasticidade do reforço do subleito do trecho 2	135
Tabela 21 – Módulo de elasticidade da sub-base do trecho 2	136
Tabela 22 – Cronograma de realização dos ensaios com FWD no trecho 2 desta pesquisa	145
Tabela 23 – Valor de “n” em função da espessura do revestimento	145
Tabela 24 – Parâmetros da bacia de deflexão admissíveis para cada faixa de tráfego	149
Tabela 25 – Faixa de valores de módulo de elasticidade da camada reciclada a frio para a faixa adicional do km 50 do trecho 2	157
Tabela 26 – Faixa de valores de módulo de elasticidade da camada reciclada a frio para a faixa adicional do km 44 do trecho 2	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ARE: agente de reciclagem emulsionado

ARRA: *Asphalt Recycling & Reclaiming Association*

ARTESP: Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BCI: *Base Curvature Index*

BCI: *Base Damage Index*

BGS: brita graduada simples

BGTC: brita graduada tratada com cimento

CA: concreto asfáltico

CAP: cimento asfáltico de petróleo

CAUQ: concreto asfáltico usinado a quente

CBR: *California Bearing Ratio*

CCPR: *cold central plant recycling*

CFT: camada final de terraplenagem

CIR: *cold in-place recycling*

CNEC: Comissão Nacional de Energia Nuclear

CNT: Confederação Nacional dos Transportes

CP: *cold planning*

CP: corpo de prova

CPR: Centro de Pesquisas Rodoviárias do Grupo CCR

CV: coeficiente de variação

DER/SP: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP: desvio padrão

DUI: dano por umidade induzida

EAPA: *European Asphalt Pavement Association*

ESRD: eixo simples de rodagem dupla

ESRS: eixo simples de rodagem simples

ETD: eixo tandem duplo

ETT: eixo tandem triplo

FDR: *full depth reclamation*

FEC: fator de equivalência de carga

FHWA: *Federal Highway Administration*

FV: fator de veículo

FWD: *falling weight deflectometer*

HIR: *hot in-place recycling*

HR: *hot recycling*

MARF: mistura asfáltica reciclada a frio

MR: módulo de resiliência

MS: macadame seco

MSCR: *multiple stress creep recovery*

NAPA: *National Asphalt Pavement Association*

PG: *performance grading*

PM: *Proctor* modificada

PSI: *present serviceability index*

RAP: *reclaimed asphalt pavement*

RBV: relação betume vazios

RC: ruptura controlada

RCD: resíduo de construção e demolição

RILEM: *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

RL: ruptura lenta

RM: ruptura média

RR: ruptura rápida

RT: resistência à tração

RTCD: resistência à tração na compressão diametral

RTFOT: *rolling thin film oven test*

SBS: estireno-butadieno-estireno

SCI: *Surface Curvature Index*

SN: *structural number*

USACE: *United States Army Corps of Engineers*

VAM: vazios do agregado mineral

VAM: volume do agregado mineral

VB: viga *Benkelman*

VCB: vazios cheios de betume

VCB: volume cheio de betume

VDM_A: volume diário médio anual

VV: volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVO	27
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	30
2.1.1 RAP – Reclaimed Asphalt Pavement	31
2.1.2 Reciclagem Profunda.....	32
2.1.3 Reciclagem a Quente	33
2.2 RECICLAGEM A FRIO	35
2.2.1 Reciclagem a Frio com Agente de Reciclagem Asfáltico	35
2.2.1.1 <i>Reciclagem a Frio in situ</i>	44
2.2.1.2 <i>Reciclagem a Frio em Usina</i>	46
2.2.2 Agente de Reciclagem Emulsionado.....	48
2.2.3 Propriedades Mecânicas	51
3 ESTUDO DE LABORATÓRIO E DE CAMPO	58
3.1 RAP	59
3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO RAP	61
3.3 TEOR DE ASFALTO RESIDUAL DO RAP	65
3.4 CONSISTÊNCIA DO LIGANTE RESIDUAL DO RAP ANTES E APÓS A ADIÇÃO DO AGENTE DE RECICLAGEM.....	66
3.5 DOSAGEM MARSHALL	69
3.5.1 Dosagem da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1	70
3.5.2 Dosagem da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2	71
3.6 TRECHOS EXPERIMENTAIS	72
3.6.1 Trecho experimental 1 - Fresagem e recomposição	73
3.6.2 Trecho experimental 2 - Implantação de faixas adicionais.....	77
3.6.2.1 <i>Determinação do tráfego de projeto</i>	79
3.6.2.2 <i>Capacidade de suporte do subleito</i>	82

3.6.2.3	<i>Dimensionamento da estrutura do pavimento.....</i>	83
3.7	USINAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA.....	88
3.7.1	Usinagem da mistura reciclada a frio - trecho experimental 1	91
3.7.2	Usinagem da mistura reciclada a frio - trecho experimental 2	92
3.7.3	Massa específica e grau de compactação	94
3.7.4	Influência dos tempos de estocagem e cura em ensaios de comportamento mecânico ..	96
3.7.5	Dano por umidade induzida	103
3.8	IMPLANTAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS.....	105
3.8.1	Trecho experimental 1 - Construção	105
3.8.2	Trecho experimental 2 - Construção	108
3.8.2.1	<i>Melhoria e preparo do subleito.....</i>	109
3.8.2.2	<i>Reforço de subleito.....</i>	111
3.8.2.3	<i>Sub-base</i>	118
3.8.2.4	<i>Mistura asfáltica reciclada a frio</i>	119
3.8.2.5	<i>Revestimento e Microrrevestimento Asfáltico a Frio.....</i>	126
3.8.3	Controle Deflectométrico e Módulo de Elasticidade das Camadas	127
3.8.4	Dificuldades executivas observadas.....	137
3.9	MONITORAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS	140
3.9.1	Trecho experimental 1	140
3.9.2	Trecho experimental 2	144
3.9.2.1	<i>Levantamento Deflectométrico.....</i>	144
3.9.2.2	<i>Índice da Curvatura da Superfície (SCI)</i>	149
3.9.2.3	<i>Índice de Danos à Base (BDI).....</i>	151
3.9.2.4	<i>Índice da Curvatura da Base (BCI)</i>	152
3.9.2.5	<i>Retroanálise do Módulo de Elasticidade da Mistura Reciclada a Frio.....</i>	154
4	CONCLUSÕES.....	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui sua matriz de transportes voltada para o sistema rodoviário, tornando-se essencial que os pavimentos sejam cada vez mais duráveis e econômicos e que sua construção ou reabilitação causem o menor dano ambiental possível. A falta de investimentos do setor público na conservação e manutenção dos pavimentos tem levado, muitas vezes, a infraestrutura a uma condição de deterioração acentuada e a demora na tomada de decisão para a recuperação de um pavimento leva a uma única alternativa: sua reconstrução.

Segundo pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (2018), o Brasil possui 213 mil km de rodovias pavimentadas (12% do total). Destas, 105 mil km foram avaliadas no ano de 2017, constatando que metade possui problemas no pavimento, como pode ser observado na Tabela 1. Extrapolando-se os percentuais levantados com a extensão amostrada para toda a malha pavimentada, poderia se estimar que pelo menos 6 mil km de rodovias da malha brasileira (3% no levantamento) se encontram em estado péssimo, necessitando de uma intervenção para reconstrução.

Tabela 1 – Estado do pavimento da malha pavimentada brasileira

Estado	Extensão total (malha avaliada)	
	Km	%
Ótimo	42.666	40
Bom	10.237	10
Regular	35.962	34
Ruim	14.004	13
Péssimo	2.945	3
TOTAL	105.814	100

Fonte: Adaptado de CNT, 2018.

A restauração dos trechos em condição avaliado como péssimo pode gerar problemas ambientais ocasionados pelo descarte dos materiais provenientes da demolição do pavimento existente e, muitas vezes, pela dificuldade de exploração de novas jazidas para a construção de novas estruturas, motivo pelo qual a reciclagem de pavimentos tem se mostrado, cada vez mais, uma técnica viável. Dentro deste contexto, esta

solução vem ganhando força entre as alternativas adotadas para a restauração/reconstrução do pavimento de uma rodovia.

A operação de fresagem do revestimento asfáltico deteriorado gera um resíduo denominado RAP (*reclaimed asphalt pavement*, em inglês). Esse resíduo, que muitas vezes é descartado e considerado um passivo ambiental, tem sido reciclado e reaproveitado em todo o mundo.

Nos Estados Unidos, 100 milhões de toneladas de RAP são gerados todos os anos (ARRA, 2015) sendo que 100% do RAP produzido é reaproveitado em novas misturas asfálticas (EAPA, 2015). Além disso, cerca de 95% de toda mistura asfáltica fabricada contém alguma porcentagem de RAP (ARRA, 2015).

Para se ter uma ideia do volume gerado e reutilizado de material fresado nos Estados Unidos, a cada ano seria possível, por exemplo, a execução de 33 mil km de uma hipotética base de pavimento com 20 cm de espessura e 100% de material fresado reciclado, considerando uma pista com 7,2 m de largura.

Em 2002, a *Federal Highway Administration* (FHWA) publicou uma resolução orientando os gestores estaduais de rodovia para que considerassem fortemente o uso de materiais reciclados em implantações e restaurações de rodovias, destacando seus ganhos ambientais e econômicos. Mas cabe mencionar que a maioria dos estados americanos já possuíam especificações próprias para o dimensionamento de restauração de pavimentos com reciclagem, inclusive sendo a primeira alternativa considerada na reabilitação dos revestimentos asfálticos (FHWA, 1997).

Já a Europa gera, aproximadamente, 50 milhões de toneladas/ano de material fresado, sendo que 94% é reciclado ou reutilizado (EAPA, 2015; AGGREGATES BUSINESS EUROPE, 2011), o suficiente para a construção de 16 mil km de base asfáltica reciclada, por exemplo. O uso de material fresado na Europa é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Geração e uso de material fresado na Europa

País	Geração material fresado (t/ano)	% de uso de material fresado					TOTAL
		Mistura asfáltica (quente/morna)	Reciclagem a frio	Não estabilizado	Corpo de aterro	Outros usos	
Alemanha	11.000.000	90	-	10	-	-	100
Itália	9.000.000	20	30	20	30	-	100
França	7.000.000	68	-	-	-	-	68
Holanda	4.500.000	70	10	-	20	-	100
Inglaterra	3.500.000	85	15	-	-	-	100
Rep. Tcheca	2.000.000	16	30	20	24	10	100
Suécia	1.600.000	90	5	5	-	-	100
Bélgica	1.553.994	64	-	-	-	-	64
Turquia	1.520.000	2	-	98	-	-	100
Áustria	1.350.000	45	-	-	-	-	45
Dinamarca	1.300.000	52	-	10	35	-	97
Finlândia	1.160.000	100	-	-	-	-	100
Noruega	932.049	38	-	61	-	-	99
Espanha	410.000	97	-	1	-	2	100
Luxemburgo	200.000	90	10	-	-	-	100
Hungria	180.000	90	-	10	-	-	100
Eslováquia	75.000	98	1	1	-	-	100
Eslovênia	37.000	27	73	-	-	-	100
Islândia	15.000	100	-	-	-	-	100
TOTAL	47.333.043	61	9	12	10	1	94

Fonte: Adaptado de EAPA (2015).

No Japão, a realidade não é diferente: quase a totalidade do material fresado gerado é reutilizada, seja em misturas asfálticas convencionais para revestimentos de pavimentos, seja na execução de bases (NAPA, 2015). Neste país, das cerca de 55 milhões de toneladas de mistura asfáltica usinadas em 2013, de 76% foi produzida com a incorporação de fresado nas misturas asfálticas, sendo que tal prática já é adotada desde 1984 (NAPA, 2015).

O Brasil, infelizmente, não dispõe de dados confiáveis quanto à geração, tampouco quanto ao percentual de misturas asfálticas que contêm material fresado na sua concepção e aplicação prática. Todavia, para se ter uma ideia do potencial de geração

e reaproveitamento de material fresado, tem-se como exemplo o Grupo CCR¹, em que há a previsão de que entre 2017 e 2021 sejam gerados mais de 1 milhão de toneladas de RAP, cuja quantidade seria suficiente, em termos de pavimentação, para construir 331 km de uma base reciclada com 20 cm de espessura e plataforma com 7,2 m, o equivalente a 11% da malha administrada.

Mantendo-se a proporção do Grupo para fazer uma simulação, o Brasil (que possui 213 mil km de rodovias pavimentadas, conforme mencionado anteriormente) teria um potencial de geração de RAP superior a 70 milhões de toneladas nos próximos 5 anos. Esse valor seria suficiente para construir/reconstruir 23 mil km de base asfáltica reciclada, sendo este superior aos 6 mil km de rodovias que precisariam de reconstrução pelo levantamento da CNT de 2018. Neste caso, não haveria a necessidade de exploração de novas jazidas para a execução de bases contendo agregado pétreo virgem.

A reciclagem de pavimentos não é uma técnica recente. Há registros de reciclagens de pavimento em Singapura e na Índia no ano de 1930; todavia, foi nos anos de 1970, com o aumento dos custos do petróleo, e com o desenvolvimento de fresadoras e recicladoras, que a técnica se consolidou (MOREIRA, 2005).

No Brasil, a partir da década de 1990, a técnica de reciclagem de pavimentos tornou-se uma solução usual (MEDINA e MOTTA, 2015), porém, a baixa adesão da reciclagem apenas do revestimento asfáltico, pode estar associada à crença de que esses possuem desempenho inferior às misturas asfálticas convencionais (FREIRE *et al.*, 2014). Mudar esse paradigma, a favor do meio ambiente, minimizando gastos desnecessários e promovendo soluções adequadas e longevas, é fundamental para o desenvolvimento de um sistema de gestão e conservação de pavimentos mais eficiente.

Dentre as diversas técnicas para reciclagem de pavimentos existentes, destaca-se a reciclagem a frio com agente de reciclagem emulsionado, com reaproveitamento de material fresado de revestimentos asfálticos antigos como insumo, para a execução de novas camadas. Neste processo, a mistura reciclada é usinada com adição de emulsões asfálticas desenvolvidas para reciclagens a frio, readequando o teor e a

¹ Grupo que opera mais de 3 mil km de rodovias concedidas em 4 estados do Brasil

consistência do asfalto da mistura original. Neste tipo de técnica, o material fresado pode representar até 100% dos agregados (WIRTGEN, 2012), enquanto nas reciclagens a quente a porcentagem de fresado na mistura é geralmente limitada em um valor máximo da ordem de 30% (FHWA, 2011). A Utilização de percentuais superiores a esse, nas reciclagens a quente, requer adaptações onerosas nas usinas de asfalto e o uso de agentes rejuvenescedores que consigam recuperar e reativar as propriedades do ligante existente (WORLD HIGHWAYS, 2017).

As vantagens econômicas das soluções de reciclagem a frio, quando realizadas no tempo correto, ou seja, antes da degradação total da estrutura pavimento, podem reduzir os custos de restauração de 30% a 50% em relações às soluções convencionais. Além disso, a intervenção com reciclagem a frio *in situ* é a que menos prejudica a fluidez do trânsito, causando um menor impacto na geração de congestionamentos, otimizando a sustentabilidade operacional da obra (FHWA, 2018).

Outra grande vantagem das misturas recicladas a frio, quando produzidas em usina estacionária, é que elas podem ser estocadas por um período que varia entre 1 e 3 meses (WIRTGEN, 2012). Como resultado, a mistura não precisa ter origem no mesmo local onde se executa a camada reciclada, permitindo uma melhor logística e operação da obra.

Porém, uma das dificuldades do processo de reciclagem, sobretudo em reciclagens *in situ*, é a falta de dados de construção e a heterogeneidade dos materiais, em termos de granulometria das misturas, tipo e envelhecimento dos cimentos asfálticos utilizados, e variação das espessuras das camadas do pavimento.

Uma das soluções mais usuais de restauração de pavimento, no Brasil, consiste na execução de camadas sucessivas de concreto asfáltico (CA) sobre o pavimento existente. Esse tipo de solução resulta na sobreposição de camadas com espessuras variáveis, o que pode trazer dificuldades para definição do traço da mistura reciclada. O RAP gerado, por exemplo, em uma fresagem de espessura contínua, pode apresentar ora uma quantidade maior da camada superior, com um ligante mais novo e uma determinada faixa granulométrica, ora uma maior porcentagem da camada inferior, mais antiga. Ademais, ao longo da vida em serviço de um pavimento, é comum a realização de intervenções pontuais, “tapa buracos”, criando regiões com

características bem diferentes do restante do pavimento, nem sempre sendo possível levar esta consideração no processo de dosagem da mistura reciclada.

Apesar das dificuldades técnicas que a reciclagem de pavimentos pode apresentar, faz-se necessário o estudo deste tipo de solução, tendo em vista não somente os aspectos ambientais levantados, mas também por ser uma aplicação que pode ser de baixo custo, alta produtividade e fácil trabalhabilidade (FHWA, 2018). Dentro deste contexto, a aplicação de misturas asfálticas recicladas a frio com agente de reciclagem emulsionado pode ser uma alternativa interessante para uso em bases de pavimentos, sendo este o foco do presente estudo.

1.1 OBJETIVO

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a viabilidade de uso de uma mistura reciclada a frio produzida com 100% de material asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado como camada de base de pavimento.

Para tanto, essa pesquisa contempla o projeto, a execução, o controle tecnológico e o monitoramento por 6 meses de dois trechos experimentais na Rodovia Presidente Castello Branco, SP-280, no estado de São Paulo. Contempla ainda as análises laboratoriais dos materiais reciclados empregados, especialmente quanto aos efeitos de tempo de estocagem (material solto) e de cura (mistura compactada) no comportamento mecânico da mistura.

Adicionalmente, é objeto de estudo o uso de outros materiais reciclados nas camadas de sub-base e de reforço do subleito, como o resíduo de construção e demolição e a escória de aciaria.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação de mestrado está dividida em quatro capítulos, a saber:

Capítulo 1 — INTRODUÇÃO

Apresentação das condições das rodovias brasileiras e da reciclagem de pavimentos no Brasil e no mundo, assim como o objetivo deste trabalho.

Capítulo 2 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Descrição dos métodos de reciclagem disponíveis e da técnica reciclagem a frio no Brasil e no mundo, com ênfase na reciclagem com emulsão asfáltica.

Capítulo 3 — ESTUDO DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Descrição e análises de resultados de todo o estudo laboratorial, além do dimensionamento, construção, controle tecnológico e monitoração dos trechos executados.

Capítulo 4 — CONCLUSÕES

Apresentação das conclusões obtidas no presente trabalho, bem como de recomendações para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um projeto de pavimentação deve ser desenvolvido tendo em vista o atendimento a parâmetros de desempenho pré-estabelecidos, quanto a conforto, segurança e durabilidade. Com o tempo, o efeito da carga dos veículos que trafegam e a ação de intempéries causam a degradação das camadas que constituem a sua estrutura e, quando um ou mais parâmetros de desempenho atingem o limite estabelecido, o pavimento precisa ser restaurado.

A escolha da melhor alternativa para a reabilitação de um pavimento asfáltico está associada a fatores como: natureza dos defeitos apresentados, disponibilidade de materiais para realizar a restauração e quanto se pretende investir nesta. Portanto, uma solução técnica, que corrija os defeitos, dentro da realidade financeira do gestor rodoviário, aliada a um planejamento de manutenção em médio e longo prazo, definirá a solução de melhor relação benefício-custo.

A recuperação pode ser de natureza funcional ou estrutural. De natureza funcional entende-se como a intervenção necessária para se recuperar o conforto e a segurança do usuário que trafega pela via, tendo em vista a correção de defeitos como irregularidade longitudinal, atrito pneu-pavimento, ruído ou deformações do concreto asfáltico que podem ocasionar acúmulo de águas superficiais (WIRTGEN, 2012). Esta é realizada na camada superior do pavimento e consiste basicamente de substituição de parte da camada de rolamento, por meio de fresagem e recomposição do concreto asfáltico, ou pela execução novas camadas de revestimento. Nesse caso, dependendo do material empregado e de sua espessura, este também funcionaria como um reforço estrutural.

Já as recuperações estruturais visam recuperar, ou aumentar, a capacidade estrutural do pavimento e consistem em intervenções de longo prazo (WIRTGEN, 2012). A solução amplamente mais utilizada para a recuperação estrutural de um pavimento no Brasil é a aplicação de uma camada de reforço em concreto asfáltico sobre a superfície do pavimento deteriorado. Todavia, esse processo não permite a correção de problemas associados às camadas inferiores do pavimento (KEARNEY *et al.*, 1999). Uma alternativa de recuperação estrutural consiste na substituição de uma ou mais camadas degradadas do pavimento, podendo-se acrescer ou não, a execução de novas camadas sobrepostas. Os materiais utilizados

nessas novas camadas podem ser virgens, obtidos através da exploração de novas jazidas, ou reciclados. Nos casos dos materiais reciclados estes podem ser do próprio pavimento que está sofrendo intervenção, originários de outros pavimentos, ou até mesmo provenientes de outras estruturas, como os advindos da construção civil.

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem das camadas asfálticas do pavimento é entendida como sendo a reutilização de misturas asfálticas envelhecidas para a produção de novas camadas de pavimento, aproveitando-se os agregados e ligantes remanescentes (BERNUCCI *et al.*, 2010). A reciclagem do revestimento asfáltico pode ser a frio ou a quente, dependendo do processo que será descrito adiante.

Por outro lado, quando a reciclagem engloba outras camadas do pavimento, além da asfáltica (revestimento), para constituir uma futura camada de base ou sub-base, a reciclagem é classificada como reciclagem profunda. As técnicas para a reciclagem do pavimento podem ser agrupadas e classificadas de diversas maneiras. Uma das classificações mais usuais é a proposta pela *Asphalt Recycling & Reclaiming Association* (ARRA), que as divide em cinco grupos:

- **Cold planing** ou **milling (CP)**: fresagem e recomposição do revestimento
- **Hot recycling (HR)**: reciclagem a quente, em usina
- **Hot in-place recycling (HIR)**: reciclagem a quente, *in situ*
- **Full depth reclamation (FDR)**: reciclagem profunda
- **Cold recycling**
 - *cold central plant recycling* (CCPR): reciclagem a frio, em usina
 - *cold in-place recycling* (CIR): reciclagem a frio, *in situ*

A escolha de qual tipo de reciclagem é a mais adequada para a restauração de uma rodovia está associada a vários fatores. Em uma primeira análise, é importante conhecer o grau de deterioração das camadas do pavimento, e qual dessas camadas precisam ser substituídas. A Figura 1 apresenta, de maneira ilustrativa, uma sugestão da FHWA (2018) de qual opção de reciclagem é a mais indicada em cada fase de

deterioração, em função do índice de serventia do pavimento (*present serviceability index, PCI*, em inglês).

Figura 1 – Tipo indicado de reciclagem para diferentes índices de condição do pavimento

Fonte: Adaptado FHWA, 2018.

2.1.1 RAP – Reclaimed Asphalt Pavement

O produto resultante da fresagem do revestimento asfáltico – RAP – deve ser considerado como um novo material de pavimentação, podendo ser melhorado por meio de correção de sua granulometria, adição de materiais asfálticos e/ou de adição de agentes estabilizadores (KEARNEY *et al.*, 1999). Em função de fatores como velocidade de fresagem, tipo de tambor da fresadora, grau de trincamento do revestimento e profundidade de corte, a granulometria do RAP originado pode ser variável (WIRTGEN, 2012).

Cada unidade de RAP é constituído por grumos de agregados e fíler, cobertos ou parcialmente recobertos por asfalto envelhecido (SILVA, 2011). A Figura 2 ilustra a aparência do material.

Figura 2 – Aparência do RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

Fonte: Autor, 2017.

As três principais características do RAP são: granulometria, consistência e teor de ligante asfáltico (WIRTGEN, 2012), sendo que este último pode ser classificado como ativo ou inativo. A classificação como ativo sugere que CAP (cimento asfáltico de petróleo) remanescente proporciona ao RAP uma coesão inerente à presença do asfalto, e como inativo quando, em função da oxidação e envelhecimento do CAP, o RAP possui comportamento similar à uma brita, podendo ser considerado uma *black stone*, (em inglês) ou “agregado negro” (WIRTGEN, 2012).

2.1.2 Reciclagem Profunda

A reciclagem profunda deve ser executada quando os defeitos existentes estiverem associados a problemas estruturais na base e/ou sub-base do pavimento. É realizada em espessuras que variam entre 20 cm e 30 cm, normalmente sendo adicionados agentes estabilizadores (WIRTGEN, 2012). O objetivo é criar uma camada espessa, homogênea, estabilizada (com aglomerante hidráulico ou asfáltico) e compactada, para servir de base de uma nova estrutura de pavimento.

Nessa técnica pode-se ou não incorporar o revestimento existente. Outras camadas são executadas sobre a camada reciclada, podendo ser concebidas com materiais virgens ou reciclados, terminando com uma camada final em concreto asfáltico usinado a quente. A reciclagem profunda é realizada *in situ*, podendo ser precedida de uma fresagem prévia, total ou parcial, do revestimento asfáltico existente. O

equipamento utilizado para a reciclagem profunda é chamado *reclaimer*, em inglês, ou recicladora de pavimento.

2.1.3 Reciclagem a Quente

A reciclagem a quente é uma modalidade que foi introduzida no Brasil no ano de 1985, com obras de reciclagem em usina na Rodovia Anhanguera, SP-330, e *in situ* na Rodovia Presidente Dutra, BR-116/SP (BALBO, 2004), sendo utilizada em maior escala a partir da década de 1990 (MEDINA e MOTTA, 2015).

Ao contrário da reciclagem profunda, onde a composição pode ser feita a partir de diversos tipos de materiais de revestimento e de base, a reciclagem a quente é realizada, necessariamente, com o material proveniente da fresagem do revestimento asfáltico de um pavimento deteriorado.

Na reciclagem a quente, tanto em usina, quanto *in situ*, o elemento aglutinante da mistura é o cimento asfáltico de petróleo (CAP). Nas reciclagens em usina, o sistema de produção é equivalente aos de misturas a quente convencionais, tanto que as usinas utilizadas são as mesmas, gravimétricas e volumétricas (SILVA, 2011).

Como mencionado, na maioria dos países desenvolvidos, entre eles países europeus, Estados Unidos e Japão, o RAP é insumo presente na composição de quase a totalidade de suas misturas asfálticas usinadas a quente, em teores usualmente entre 10% e 30% (MARTÍNEZ, 2010; ARRA, 2015). Ou seja, as misturas ditas “convencionais” nesses países contemplam sempre uma porcentagem de RAP em sua composição. Essa utilização é obrigatória, seja em função de regulamentação, como, por exemplo, na Alemanha, seja em função de valores proibitivos para descarte de RAP, como, por exemplo, no Canadá e na Austrália (SILVA, 2011).

O desempenho de misturas asfálticas convencionais com até 30% de RAP pode ser equivalente ao de misturas sem a adição. Misturas recicladas a quente com altos teores de RAP têm apresentado um bom desempenho desde que fazendo-se uso de agentes rejuvenescedores (RUIZ, 2002).

Uma das dificuldades para a reciclagem a quente em usina está no fato da necessidade de se aquecer o RAP sem que isso piore o estado de oxidação do asfalto residual. A usinagem de uma mistura asfáltica é o momento em que o CAP sofre o

maior processo de oxidação e, portanto, como espera-se que o asfalto remanescente do RAP já esteja parcialmente oxidado, a usinagem pode agravar essa condição (GENNESSEAUX, 2015).

Algumas alternativas podem ser adotadas, individualmente ou em conjunto, para se minimizar o efeito da oxidação do asfalto do RAP: adaptações nas usinas para que o RAP não entre em contato diretamente com a chama do queimador; a utilização de misturas mornas, em que a usinagem é feita em temperaturas inferiores às das misturas a quente convencionais ou a utilização de agentes rejuvenescedores que recomponham a fração de asfaltenos do asfalto residual, recuperando as suas propriedades viscoelásticas (GENNESSEAUX, 2015).

A vantagem da reciclagem a quente em usina é o maior controle da homogeneidade do material, o emprego de equipamentos convencionais de usinagem, transporte, lançamento e compactação, sendo possível produzir misturas com propriedades mecânicas análogas às misturas asfálticas com materiais virgens, possibilitando a sua utilização como camada de rolamento (RUIZ, 2012).

Já na modalidade *in situ*, tem-se uma reciclagem direta do revestimento asfáltico, de fato. Quando corretamente especificada, pode reduzir de 30% a 50% os custos de manutenção, em comparação com soluções convencionais de fresagem e recomposição (ARRA, 2015).

A reciclagem a quente *in situ* pode ser dividida em três etapas: a primeira consiste no aquecimento do revestimento asfáltico existente por meio de placas térmicas, que amolecem a parte superior deste. Na sequência, é realizada uma fresagem ou uma escarificação a quente do revestimento existente (um melhor desempenho é esperado quando essa espessura retirada é de, no máximo, 5 cm, segundo a ARRA, 2015). Por fim, na terceira etapa, caso o revestimento seja escarificado, o RAP gerado é deixado no mesmo local para ser novamente reaproveitado; se fresado, o RAP é direcionado por uma esteira transportadora para uma unidade misturadora móvel, onde pode ter sua granulometria corrigida, adição de novos ligantes e agentes rejuvenescedores, sendo novamente lançado na pista com o auxílio de uma vibroacabadora convencional e compactado em seguida.

2.2 RECICLAGEM A FRIO

A reciclagem a frio, diferentemente dos processos a quente, possui maior variedade técnica, em relação tanto aos materiais reciclados, quanto aos aglutinantes a serem utilizados (WIRTGEN, 2012). Dentro deste contexto, seja em usina estacionária ou em usina móvel (*in situ*), a reciclagem a frio pode ser classificada conforme descrito a seguir (WIRTGEN, 2012; ARRA, 2015):

- Sem estabilização
- Estabilizada granulometricamente
- Estabilizada com aglomerantes hidráulicos
 - Cal hidratada, cimento *Portland*, cinzas volantes
- Estabilizada com agentes de reciclagem asfálticos
 - agente de reciclagem emulsionado
 - espuma de asfalto
- Combinação de duas ou mais técnicas

Sempre que a sua adoção for possível, a solução de reciclagem *in situ* deve ser o método de reciclagem preferencial, devido às vantagens econômicas oferecidas (WIRTGEN, 2012). Além disso, é possível a utilização total do revestimento existente, minimizando a aquisição de materiais virgens, tempo de execução, interferência para o usuário e a necessidade de áreas de descarte de material do pavimento original.

Para reciclagens a frio com cimento, por se tratar de um material de ruptura frágil, é recomendado que seja executado revestimento em espessura suficiente para dissipar as cargas de tráfego, limitando assim a tensão de tração na fibra inferior da camada reciclada.

2.2.1 Reciclagem a Frio com Agente de Reciclagem Asfáltico

As misturas recicladas a frio com agentes de reciclagem asfálticos (emulsionados ou espumados) são produzidas a partir da mistura destes produtos com RAP, podendo ter sua granulometria corrigida e a incorporação de cal ou cimento *Portland*, visando melhorar as características de resistência inicial e acelerar o processo de cura. A Tabela 3 resume os principais tipos de defeito que podem ser corrigidos com esse tipo de mistura.

Tabela 3 –Possibilidade de correção de defeitos com reciclagem a frio com agente de reciclagem

Tipo de defeito			Reciclagem a frio	Comentário
Defeitos Superficiais	Exsudação		Sim	
	Panelas		Sim	
	Desagregação		Sim	
	Falta de aderência		Sim	
Deformações	Ondulação		Sim	
	Desgaste		Sim	
	Afundamento de trilha de roda	Instabilidade da mistura	Possível	Deve ser corrigida com incorporação de agregado e novo projeto de mistura
		Deficiência estrutural	Possível	Apenas reciclagem em usina, com tratamento das camadas subjacentes
	Falta de acostamento		Não	
	Escorregamento		Possível	Deve ser corrigida com incorporação de agregado e novo projeto de mistura
Trincamento associado ao tráfego	Trincamento por fadiga	De baixo para cima	Possível	Reciclagem a frio associado a execução de novo revestimento
		De cima para baixo	Possível	Reciclagem a frio associado a execução de novo revestimento
	Escorregamento		Possível	A espessura total de reciclagem deve ser superior ao plano de escorregamento
	Trincamento não associado ao tráfego	Trinca em blocos		Sim
Trinca longitudinal		Sim		
Trinca transversal		Sim		
Reflexão de trincas		Sim		
Trincamento combinado	Reflexão de juntas de placas de concreto em <i>blacktopping</i>		Possível	Não corrige, mas pode mitigar
	Descontinuidade		Sim	
Deficiências de base e sub-base	Afundamentos, depressões		Possível	Apenas reciclagem em usina, com tratamento das camadas subjacentes
Irregularidade	Conforto ao rolamento		Sim	
Outros critérios	Todos níveis de tráfego		Sim	Desde que o projeto estrutural seja corretamente dimensionado
	Rodovia rural		Sim	
	Pavimento urbano		Possível	Podem existir dificuldades geométricas
	Problemas de drenagem		Não	A drenagem precisa ser corrigida antes da execução da reciclagem a frio

Fonte: Adaptado FHWA, 2018.

A mistura reciclada com agente de reciclagem asfáltico poderá ser classificada como do tipo estabilizada (BSM, *bitumen stabilized materials*, em inglês) ou como mistura asfáltica. No caso de mistura estabilizada, o teor de asfalto residual no RAP tem pouca influência no comportamento mecânico da mistura, além desse ser considerado como inativo (WIRTGEN, 2012). Nesse contexto, a mistura terá um comportamento intermediário entre uma mistura puramente granular, uma mistura cimentada e uma mistura asfáltica (TEBALDI, 2013).

Por outro lado, caso o asfalto residual seja tido como ativo, a mistura entre RAP e agente de reciclagem deve ser classificada com mistura asfáltica, necessitando ser dosada nos métodos convencionais, como a dosagem Marshall ou SUPERPAVE². O uso de agente rejuvenescedor incorporado ao agente de reciclagem parte do pressuposto que o asfalto residual esteja ativo, ou seja, projeto da mistura deverá seguir um método de dosagem de misturas asfálticas (ARRA, 2001).

A Tabela 4 apresenta um indicativo de como a mistura poderá ser classificada, em função do teor de asfalto remanescente no fresado, seu envelhecimento, teor de emulsão utilizado e uso de agente rejuvenescedor.

Tabela 4 – Classificação em mistura asfáltica ou em mistura estabilizada de reciclagem afrio

Parâmetro de Análise	Comportamento do Material	
	Mistura estabilizada	Mistura asfáltica
1. RAP: Penetração do CAP Recuperado (10^{-1} mm)	<10	>10
2. RAP: teor de asfalto recuperado	<5%	>5%
3. Amostra: RTCD em CPs saturados (MPa)	<0,10	>0,10
4. Emulsão: teor asfalto residual (%)	<2%	>2%
5. Incorporação de agente rejuvenescedor	Não	Sim
Método de projeto da mistura	Apêndice 1*	Marshall

* Apêndice 1 do Manual de Tecnologia a Frio Wirtgen, 2012

Fonte: WIRTGEN, 2012.

² SUPERPAVE: *SUPERior PERforming Asphalt PAVements*, desenvolvido nos Estados Unidos.

A relação entre os comportamentos, quanto à rigidez e aos critérios de ruptura, para as misturas estabilizadas e asfálticas, é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Relação de rigidez e flexibilidade entre misturas asfálticas, estabilizadas e cimentadas

Fonte: Adaptado de TEBALDI, 2013.

BGTC: brita graduada tratada com cimento; BGS: brita graduada simples; BSM: em inglês, *bitumen stabilized materials*; CBUQ: concreto betuminoso usinado a quente

As misturas recicladas, quando estabilizadas, não se comportam como misturas asfálticas e as trincas por fadiga não são consideradas como um mecanismo de ruptura dominante (EBELS *et al.*, 2007). Nesse processo, recomenda-se não usar a resistência a tração como um parâmetro de projeto de mistura para BSMs, sendo a redução da rigidez e a deformação permanente os mecanismos de falha das BSM (EBELS *et al.*, 2007).

Nesse contexto, o critério de ruptura da camada reciclada com agente de reciclagem, especialmente com espuma de asfalto, está associado à deformação permanente que

essa pode sofrer, não por um excesso de ligante, mas sim pelo elevado volume de vazios que essas misturas podem apresentar. Um critério para se determinar o fim da vida útil de uma mistura reciclada a frio com espuma de asfalto é a limitação da formação de afundamento de trilha de rodas por deformação permanente (JENKINS *et al.*, 2007) .

Cabe mencionar que nas rodovias sob concessão no Brasil, existe um limite contratual quanto ao afundamento máximo de trilha de roda. As rodovias estaduais paulistas, sob regulação da Agência Reguladora de Transporte Terrestre do Estado de São Paulo (ARTESP) limita esse valor em 7 mm. A obtenção de modelos de previsão de desempenho que levem em consideração o afundamento de trilha de rodas *versus* o tráfego é de vital importância para o correto dimensionamento da estrutura do pavimento e a difusão da reciclagem a frio como solução de pavimentação, podendo ter como parâmetro limite último, por exemplo, o estipulado pelos contratos de concessão.

Como as reciclagens a frio com espuma de asfalto contemplam espessuras que podem chegar a 20 cm e com volume de vazios, muitas vezes, elevado em função da dificuldade de compactação, uma alternativa para se contornar a deformação permanente, causada pela densificação desta camada pelo tráfego, é a execução de pequenas espessuras de revestimento sobre a camada reciclada, forçando a consolidação. Após cessado esse processo, uma fresagem superficial seria realizada para eliminação da deformação de trilha de rodas, e na sequência executado o revestimento asfáltico definitivo, na espessura prevista em projeto.

Além disso, outra diferença também está associada a forma na qual o agente de reciclagem envolve o RAP. Na espuma de asfalto, em função do método de produção desta, ocorre a formação de pequenas gotículas de asfalto na superfície do RAP, após cessado o processo de expansão da espuma. Esse processo cria diversos pontos de ligação, o que permite à mistura ter o comportamento intermediário entre misturas granulares e asfálticas (TEBALDI, 2013).

Já nas misturas com agentes de reciclagem emulsionados, após cessado o processo de ruptura da emulsão, ocorre a decantação dos glóbulos de CAP que estavam suspensos em água, que se depositam na superfície do RAP, formando uma fina película contínua na superfície deste, aproximando o comportamento da mistura ao

de uma mistura asfáltica, porém com ligações mais frágeis, em função da fina película (TEBALDI, 2013), como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Comparação da continuidade da ligação entre agentes de reciclagem emulsionados e de asfalto espumado

Fonte: Adaptado TEBALDI, 2013.

Já para misturas recicladas com comportamento de mistura asfáltica, diversos estados americanos adotam o método Marshall para dosagem destas (ARRA, 2015). A maioria dos métodos de dosagem usam equações empíricas baseadas na quantidade e na consistência do asfalto recuperado, como no método da Wirtgen (2012). Todavia, outros estados levam em consideração características da mistura, como por exemplo, módulo de resiliência, resistência à tração, estabilidade e suscetibilidade à umidade (ARRA, 2001).

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), em seu método de dimensionamento de pavimentos mais recente aboliu os ensaios de caracterização tradicionais do ligante (penetração e viscosidade), passando a analisar então as propriedades reológicas viscoelásticas do asfalto, e a caracterizar as misturas recicladas a frio, pelo seu módulo dinâmico e número de fluxo ou *flow number* (ARRA, 2015).

O volume de vazios desse tipo de mistura, quando considerada como estabilizada com asfalto, tipicamente varia entre 15 e 30%, sendo a massa específica aquela determinada pela compactação *Proctor* Modificado e normalmente adotada na África do Sul, Europa e Austrália. Quando considerada como mistura asfáltica, valores típicos de volume de vazios estão entre 10% a 15%, e a massa específica é obtida pelo ensaio de compactação Marshall, ou mais recentemente pela especificação SUPERPAVE, sendo adotado em países como Estados Unidos e Canadá.

Para a dosagem da mistura asfáltica reciclada é necessário a obtenção da granulometria e do teor de asfalto residual no RAP da camada que será reciclada, sendo essencial para a seleção da emulsão e do teor a ser empregado.

Para obtenção dessa amostra é preciso fazer coletas sistemáticas em toda a profundidade da faixa a ser reciclada. O RAP obtido por sondagem rotativa de 150 mm e posterior britagem tem se mostrado mais eficaz que por fresagem com pequenas fresadoras, aquelas normalmente instaladas em equipamentos do tipo *bobcat* (ARRA, 2015). Seja qual for a técnica escolhida para coleta dos materiais da amostra, essa deve ser comparada com uma amostra obtida com a fresadora que, de fato, irá realizar a fresagem do revestimento, de modo a proporcionar a adequação das amostras a esta.

O uso de aglomerantes hidráulicos, como a cal ou o cimento *Portland*, como mencionado, podem ser utilizados para obtenção de uma cura mais rápida ou um ganho de rigidez precoce, todavia teores inadequados podem resultar em uma camada frágil, rígida e com fissuras excessivas (ARRA, 2017). O uso de cimento *Portland* em baixos teores, inferiores a 1,5% em peso, auxiliam na diminuição da umidade da mistura, atuando assim no processo de cura, nesse caso podendo ser benéfico.

Quanto à umidade, os teores devem ser controlados visando garantir o recobrimento total do RAP pelo agente de reciclagem e assegurar a compactação ótima da mistura reciclada. Para tanto, o teor ideal de fluido total (água + agente de reciclagem emulsionado) deve variar entre 4,0% e 4,5% em peso (ARRA, 2017). Em função do uso de teores maiores ou menores de agente de reciclagem, a mistura precisa ter sua umidade total ajustada, de modo a se obter a quantidade de fluido ideal, para usinagem e compactação. Após a compactação, a ARRA (2017) recomenda que o teor de umidade deva ser inferior a 3% antes da execução das camadas superiores.

A extração de corpos de prova imediatamente após compactação de uma mistura reciclada a frio não é recomendada, nem possível. A cura completa do material leva de semanas a meses até propiciar as propriedades finais da mistura reciclada (ARRA, 2017). O processo completo pode durar até um ano (ASPHALT ACADEMY, 2009). A influência do tempo de compactação e de cura é uma variável sensível nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio e será abordada nesta pesquisa.

Quanto ao controle de compactação e obtenção da densidade da mistura em campo, a ARRA (2017) sugere que seja adotado o seguinte procedimento: primeiramente é feito um segmento teste, onde seja possível obter a máxima densidade possível, medida com densímetro nuclear, variando-se os equipamentos de compactação, número de passadas e a pressão dos pneus. Na sequência, uma vez determinada a densificação máxima possível, o restante da obra precisa atingir esse valor, com uma tolerância de 95 a 105% da massa específica obtida no segmento teste. Apesar de tal metodologia de ter lógica, sua adoção seria difícil no Brasil. A falta de um valor de referência, já previsto em projeto, poderia dificultar o trabalho da fiscalização na aceitação do serviço, pois poderia sugerir que o executor não estaria buscando, com afinco, a densificação máxima no segmento teste, visando facilitar o trabalho de compactação futuro.

Além disso, o dimensionamento estrutural do pavimento foi concebido na expectativa que a mistura reciclada atinja determinados parâmetros mecânicos que, dificilmente, serão atingidos caso a compactação obtida em pista seja inferior às de laboratório.

Outra característica de misturas elaboradas com agentes de reciclagem emulsionados é a cura da mistura, que é o processo de perda de água até que o asfalto residual atinja suas propriedades. Diversos fatores podem estar associados ao tempo de cura

da mistura como, por exemplo, superfície específica dos agregados, uso de fíler ativo (cal ou cimento Portland), temperatura ambiente, umidade relativa, características do asfalto residual, compactação, presença de acostamentos, materiais com características drenantes sob a camada reciclada entre outros (SILVA, 2011; ARRA 2015).

A mistura reciclada a frio, ao contrário das misturas usinadas a quente, que são elaboradas a partir de combinação de agregados de diferentes granulometrias nas proporções necessárias para obter os resultados desejados, não permite um controle da granulometria, teor de ligante e propriedades mecânicas, sendo importante entender e trabalhar com a variabilidade desses parâmetros na concepção da mistura (ARRA, 2017).

Uma vantagem indireta da reciclagem a frio com agente de reciclagem asfáltico está associada à dissipação de trincas de reflexão, em função do maior volume de vazios desse tipo de mistura. Para verificar o desempenho em campo quanto a esta questão, SCHELLHAMMER (2018) monitorou dois segmentos de uma rodovia restaurada na cidade de Dana (Iowa/ Estados Unidos). Inicialmente, ambos trechos apresentavam níveis elevados de trincas transversais, sendo indicada a solução de fresagem e recomposição. O primeiro trecho foi recomposto integralmente com concreto asfáltico e o segundo com uma mistura reciclada a frio com agente de reciclagem emulsionado, sobreposta uma camada de rolamento em concreto asfáltico.

Em 13 anos de monitoração destes segmentos, as trincas por reflexão (indicadas por setas na Figura 5) ocorreram em maior número no segmento onde foi feita apenas a recomposição com concreto asfáltico, em comparação ao trecho com mistura reciclada. Adicionalmente, cabe mencionar que não foi constatado o aparecimento de afundamentos de trilha de roda em ambos os segmentos.

**Figura 5 – Trincas de reflexão em dois segmentos de fresagem e recomposição após 13 anos:
(a) recomposição com concreto asfáltico (b) recomposição com mistura reciclada a frio**

Fonte: SCHELLHAMMER, 2018.

2.2.1.1 Reciclagem a Frio *in situ*

Na reciclagem a frio *in situ*, o RAP é obtido pela fresagem a frio do revestimento asfáltico do pavimento a ser restaurado. Existem duas formas distintas para a realização da fresagem do revestimento, descritas a seguir.

A primeira é com a utilização de uma recicladora de pavimentos, a mesma de reciclagem profunda, mas com o tambor de corte trabalhando apenas no revestimento, podendo a espessura ser parcial ou total do concreto asfáltico existente.

Nesse caso, agentes estabilizadores podem ser incorporados de duas formas: se líquidos, isto é, emulsões asfálticas ou espuma de asfalto, são injetados dentro da câmara de reciclagem, durante o corte e homogeneização da mistura. Os materiais sólidos, como britas usadas para correção granulométrica e para aumentar a espessura do revestimento, ou materiais pulverulentos, como cal ou cimento *Portland*,

são distribuídos sobre a superfície do pavimento a ser reciclado, anteriormente a passagem da recicladora.

Após a passagem da recicladora, o RAP gerado, juntamente com os materiais incorporados na mistura, permanece no mesmo local, onde dá-se início ao processo de compactação. Posteriormente à execução da camada reciclada a frio, mesmo que seja realizada com espuma de asfalto ou emulsão asfáltica, deve ser feito o recobrimento da mesma com concreto asfáltico ou, no mínimo, com tratamento superficial ou microrrevestimento asfáltico, visando proteger a camada reciclada do tráfego e da chuva. Isto é necessário em função de seu volume de vazios, esta não pode ser utilizada como camada final de rolamento, sendo necessária a execução de, no mínimo, uma camada selante (SILVA, 2011). A escolha do melhor material de recobrimento está associada a fatores como capacidade estrutural do pavimento, tipo de agente utilizado, tráfego e período de projeto da solução de restauração.

No outro método de reciclagem a frio *in situ*, o RAP é gerado a partir da fresagem do pavimento com uma fresadora convencional e é lançado em uma unidade misturadora móvel de um trem de reciclagem (contendo ou não um sistema de britagem), onde o RAP é misturado com o agente de reciclagem. Cabe mencionar que em sendo necessária a incorporação de agregados à mistura, estes devem ser distribuídos na pista anteriormente à passagem da fresadora.

A mistura reciclada pode ser lançada diretamente em uma vibroacabadora por uma esteira instalada em uma lança na saída do misturador ou depositada novamente na pista. Nesse caso, é necessário que um equipamento (chamado *windrow elevator*) colete esse material na pista para lançá-lo na vibroacabadora. Dois esquemas dos trens de reciclagem descritos, com e sem o *windrow elevator*, são apresentados na Figura 6 e Figura 7, respectivamente.

Figura 6 – Trem de reciclagem a frio *in situ* com fresadora, recicladora e vibroacabadora

Fonte: Adaptado do catálogo de produtos da ROADTEC, 2018.

Figura 7 – Trem de reciclagem a frio *in situ* com fresadora, recicladora, *windrow elevator* e vibroacabadora

Fonte: Adaptado do catálogo de produtos da ROADTEC, 2018.

Independentemente da configuração do trem de reciclagem, com ou sem *windrow elevator*, completam o sistema: um caminhão tanque com água (para correção da umidade da mistura) e um caminhão tanque com emulsão asfáltica.

2.2.1.2 Reciclagem a Frio em Usina

No processo de reciclagem a frio em usina estacionária, o RAP é gerado anteriormente ao processo de reciclagem, a partir da fresagem a frio de um revestimento asfáltico. Este fresado, na sequência, é transportado para um estoque de bota-espera, onde permanece armazenado até o momento da reciclagem. A

grande vantagem nas reciclagens em usina estacionária está na oportunidade de se conhecer melhor as propriedades do material fresado que será reciclado.

Por não se tratar de um processo contínuo, ou seja, passando-se por uma etapa de estocagem anteriormente à usinagem e à execução, é possível realizar uma classificação das pilhas de RAP quanto ao teor e consistência do asfalto residual, assim como fazer a composição da mistura com diferentes faixas granulométricas.

Adicionalmente, como a mistura reciclada não é depositada na pista simultaneamente à operação de fresagem, é possível inspecionar o estado da base ou do revestimento remanescente no fundo da caixa e realizar ensaios defletoométricos, visando identificar problemas estruturais nas camadas remanescentes e ter a oportunidade de corrigi-los, seja com reciclagem profunda, seja com reconstrução.

Outra vantagem da reciclagem em usina é que, caso o agente de reciclagem adotado não seja um aglomerante hidráulico, como cal ou cimento *Portland*, é possível estocar a mistura para uso posterior. Assim, a mistura reciclada em usina pode ser utilizada não apenas para recompor a fresagem do pavimento que gerou o RAP, mas também para a execução de novas camadas de pavimento, em outros locais (WIRTGEN, 2012). Em ambas situações, seja para a utilização no mesmo pavimento que originou o RAP ou em um novo, a criação e a gestão de um estoque de mistura (pilha pulmão) é fundamental para suprir a logística da frente de obra, podendo fornecer a mistura reciclada por um determinado período, mesmo que a usina necessite de alguma manutenção.

A usina de reciclagem estacionária da Wirtgen possui como vantagem a portabilidade para transporte e a adequação a qualquer agente de reciclagem escolhido, asfálticos ou aglomerantes hidráulicos. Como desvantagem, ela não realiza o destorroamento dos grumos de fresado, apenas o descarte de grumos com diâmetros superiores a determinado valor selecionado. Deste modo, caso o volume de RAP gerado seja o mesmo do necessário para a realização da mistura, será inevitável a utilização de um britador móvel para o destorroamento do RAP. Esta usina é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Usina estacionária de reciclagem KMA 220 Wirtgen

Fonte: Catálogo de produtos Wirtgen, 2017.

Outros modelos de usina estacionária de reciclagem a frio estão disponíveis no mercado, inclusive a usina de reciclagem *in situ* da ROADTEC, descrita no 2.2.1.1, configurada como estacionária. Esta usina foi utilizada para a realização da mistura reciclada do trecho teste deste trabalho e é melhor descrita no item 3.7.

No processo de reciclagem a frio com agente de reciclagem emulsionado em usina, o RAP gerado em uma fresagem a frio convencional pode ser misturado com emulsão asfáltica ou agente de reciclagem emulsionado em uma usina estacionária, podendo o RAP ser previamente britado ou não.

2.2.2 Agente de Reciclagem Emulsionado

Emulsão pode ser definida com uma dispersão entre dois fluídos imiscíveis ou parcialmente miscíveis, onde uma das fases é dispersa em outra fase contínua, na presença de um agente surfactante ou emulsificante (CERATTI *et al.*, 2015). Os agentes surfactantes são substâncias que adsorvem na superfície dos glóbulos do fluido em suspensão, reduzindo a tensão interfacial e proporcionando maior estabilidade da emulsão (TORRES, 2013; CERATTI *et al.*, 2015).

No caso de emulsões asfálticas, o CAP encontra-se disperso em um fluido contínuo, a água, juntamente com o agente emulsificante. Para a produção, os três componentes básicos constituintes (CAP, água e emulsificante) são adicionados em um moinho coloidal que cisalha o asfalto em pequenos glóbulos, que permanecem suspensos e estáveis em água, em função da presença do agente emulsificante (ABEDA³, 2010).

Já os agentes de reciclagem emulsionados são emulsões elaboradas para uso exclusivo de reciclagem a frio, sendo muitas vezes denominados como agentes rejuvenescedores emulsionados. Este trabalho, porém, tem seguido a nomenclatura de *Emulsified Asphalt Recycling Agent*, adotada pela ARRA, e de Agente de Reciclagem Emulsionado (ARE), usada pela ABEDA,³ sendo o agente rejuvenescedor um aditivo a ser incorporado (ou não) na formulação da emulsão.

Os AREs são formulados para melhorar algumas propriedades da mistura reciclada, seja para melhorar as suas propriedades mecânicas, seja para facilitar a sua trabalhabilidade. Com esse fim, podem ser adicionados solventes, agentes rejuvenescedores, aceleradores ou retardadores de cura e polímeros (ARRA, 2015).

O ligante asfáltico do pavimento original, com o processo de envelhecimento e oxidação, perde parte de suas frações maltênicas (sobretudo aromáticos constituintes do asfalto), que o torna mais rígido e frágil. Assim, a adição de agente rejuvenescedor no agente de reciclagem visa repor parte desta fração, devolvendo as características de flexibilidade do ligante (BERNUCCI et al., 2008), podendo ser de tanto de origem mineral quanto vegetal (HUGENER, 2013).

Agentes de reciclagem emulsionados podem ter incorporados agentes rejuvenescedores à sua formulação visando reduzir a viscosidade do ligante envelhecido e diminuir a sua consistência, porém, essa reação é complicada e demanda tempo de cura e alta temperatura para a interação entre o agente rejuvenescedor e o ligante envelhecido. A taxa de “amolecimento” é função das propriedades do agente rejuvenescedor e do ligante envelhecido, assim como a forma de mistura, compactação, tráfego e condições climáticas (ARRA, 2015).

³ ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

Uma evolução dos AREs com agente rejuvenescedor são as *Engineered Emulsions*, que são emulsões projetadas e modificadas em função de cada projeto. Normalmente tratam-se de emulsões modificadas com polímero, catiônicas e de ruptura lenta. Seu uso visa melhorar a capacidade de mistura e recobrimento do RAP, a resistência à umidade, a diminuição do tempo de cura e de ruptura, propiciando o amolecimento do ligante residual. As técnicas de modificação incluem a elaboração de asfaltos com altos teores de óleos aromáticos, modificações por polímero, correções de pH e melhoradores de adesividade (ARRA, 2015).

Por outro lado, o uso de AREs com agentes rejuvenescedores, mesmo que estes não consigam recuperar na totalidade as propriedades do ligante original, podem suprir, em parte, uma deficiência de óleos aromáticos da composição do CAP residual do RAP, considerando que estes diminuem durante o processo de oxidação e envelhecimento do CAP (ARRA, 2015).

O amolecimento do CAP do fresado também pode ser conseguido, alternativamente ao uso de agentes rejuvenescedores, pelo uso de solventes (que podem ser obtidos pela destilação fracionada do petróleo, assim como o asfalto). Todavia, o uso de solventes para o amolecimento do CAP, apesar de possibilitar o atingimento dos parâmetros físicos desejados, como ponto de amolecimento e penetração, não melhoram as características do ligante envelhecido (ARRA, 2015).

A caracterização do ligante residual do RAP está associada principalmente ao estado em que se encontra em termos de teor e consistência/envelhecimento. Quando mais envelhecido o CAP, menos ativo ele se encontra e mais dificilmente ele recuperará as suas propriedades originais em um processo de rejuvenescimento. Neste contexto, a incorporação do agente de reciclagem emulsionado na mistura tem o propósito de facilitar o envolvimento e a trabalhabilidade da mistura asfáltica reciclada. Assim, espera-se que ocorra, pelo menos na parte superficial do ligante remanescente do RAP, uma interação entre o asfalto antigo e o asfalto adicionado na forma de emulsão.

Uma vez que ambos os materiais estão, no momento da mistura, em temperatura ambiente e em uma condição entre o estado semissólido e o estado visco-elástico, uma hipótese é que essa interação possa ocorrer por difusão mássica molecular (TIA *et al.*, 1983). Nesse processo ocorreria uma troca entre moléculas adjacentes, isto é, as moléculas do asfalto residual da emulsão iriam, superficialmente, sendo

substituídas pelas moléculas do asfalto presente no RAP, em uma sequência sistemática e lenta, podendo ser acelerado com o aumento da temperatura de mistura e da própria cura (TIA *et al.*, 1983)., pois as moléculas que antes estariam em um estado de equilíbrio, ficariam mais agitadas e facilitaria a troca (TANNOUS *et al.*, 2011).

2.2.3 Propriedades Mecânicas

A rigidez de uma mistura reciclada a frio com agente de reciclagem emulsionado é um parâmetro controverso. Por um lado, é esperado que, quando considerada como uma mistura estabilizada, esta tenderá a ter uma rigidez intermediária entre uma camada granular e uma mistura asfáltica, como detalhado na Figura 3. Todavia, mesmo com baixos teores de ARE, da ordem de 2% a 3% em peso, resultando em teores de asfalto residual entre 1,2% e 1,8%, esta pode apresentar comportamento de mistura asfáltica, dependendo das condições da mistura.

Adicionalmente, há tendência de os materiais reciclados a frio terem a sua rigidez aumentada na medida que for ocorrendo a cura da mistura. Frente a isso, faz-se necessário entender melhor o comportamento dos materiais quanto à sua rigidez, ao longo do tempo, seja em medições em laboratório, seja em campo.

Nesse ponto, novamente a categorização da mistura como estabilizada ou asfáltica é de fundamental importância na escolha dos ensaios mais adequados de avaliação do comportamento mecânico. Caso se considere que se trata de um material estabilizado, o ensaio poderá ser o normalmente empregado para materiais granulares, por exemplo módulo de resiliência em um ensaio triaxial com confinamento e cargas repetidas. Já se a consideração for a de uma mistura asfáltica, o módulo de resiliência seria obtido por compressão diametral, ou se realizaria o ensaio de módulo dinâmico, com diferentes tamanhos de corpos de prova.

Em estudo de misturas asfálticas recicladas com ARE em comparação com misturas com emulsão convencional, David (2006) obteve o módulo de resiliência (Figura 9) por compressão diametral, em corpos de prova curados por 24 h a 60°C em estufa e ensaiados a temperatura ambiente, não tendo sido verificado o ganho adicional de rigidez com o tempo, após transcorridas as 24 h de cura. Foram ensaiados corpos de

prova preparados com 7 teores de emulsão (0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% e 3,5% de asfalto residual) em 4 misturas diferentes:

- RAP + emulsão de ruptura lenta RL-1C
- RAP + emulsão de ruptura lenta RL-1C + pó de pedra
- RAP + agente de reciclagem ARE-75
- RAP + agente de reciclagem ARE-75 + pó de pedra

Figura 9 – Variação do módulo de resiliência com o teor de asfalto residual em David (2006)

Fonte: DAVID, 2006.

Na Figura 9 nota-se que o uso de agente de reciclagem ou emulsão convencional de ruptura lenta foi indiferente nas misturas sem pó de pedra. Já com o pó de pedra, a mistura com emulsão convencional apresentou valores de módulo de resiliência superiores aos da mistura com ARE, provavelmente pelo fato de o uso de agentes de reciclagem com agente rejuvenescedor ter agido no ligante residual do RAP, diminuindo sua consistência e aumentando sua flexibilidade.

Em uma outra pesquisa, Silva (2011) determinou o módulo de resiliência no ensaio triaxial em dois tempos de cura (7 e 28 dias) e em duas tensões de confinamento. A mistura foi preparada com 3 teores diferentes de ARE (2,5% 3,0% e 3,5%), além de

1% de cimento *Portland*. Concluiu-se que o comportamento de uma mistura reciclada a frio se mostrou diferente de um material granular, sendo pouco sensível ao confinamento e atingindo módulos de resiliência entre 1.000 MPa e 1.500 MPa.

Adicionalmente, Silva (2011) monitorou um trecho experimental, obtendo o módulo de elasticidade da mistura reciclada a frio por retroanálise das bacias de deflexão, obtidas de ensaios com FWD (*falling weight deflectometer*) em 2 períodos: logo após a obra, em março de 2009 (chuvoso) e em junho/2009 (seco). De maneira geral, os módulos elásticos variaram aproximadamente entre 1.100 MPa no período chuvoso (logo após a obra) e 1.300 MPa no período seco (3 meses depois). A própria autora comenta que a diferença poderia estar associada às condições climáticas, uma vez que sob maior umidade, as camadas do pavimento e o subleito tenderiam a apresentar módulos de elasticidade menores, porém sem se descartar adicionalmente também uma evolução da rigidez, em função da cura do material.

Importante registrar que as misturas asfálticas ensaiadas por David (2006) foram compactadas no compactador Marshall e o MR determinado na compressão diametral, que ajudaram a elevar os valores de módulo de resiliência, ao contrário dos ensaios conduzidos por Silva (2011), com os CPs moldados na energia do *Proctor* Modificado e seu MR determinado no ensaio triaxial.

Em um terceiro estudo, Andrade (2017) estudou diversas misturas recicladas a frio, incluindo misturas recicladas com emulsão asfáltica convencional. Assim como Silva (2011), optou por determinar os módulos de resiliência no ensaio triaxial, compactando os corpos de prova na energia do *Proctor* Modificada, todavia fazendo cura em estufa a 60°C por 3 dias e à temperatura ambiente por mais 4 dias. Concluiu, assim como Silva (2011), que o material não sofreu influência do confinamento, não se tratando de um material com comportamento granular. Os módulos de resiliência ficaram aproximadamente entre 1.100 MPa e 1.200 MPa, mesma ordem de grandeza de Silva (2011). Também houve a execução de um trecho experimental, em cuja análise dos módulos elásticos retroanalizados, Andrade (2017) conseguiu observar um ganho expressivo de rigidez com o tempo (aproximadamente dobrou), independentemente de ser em período seco ou chuvoso (Figura 10).

Importante salientar que há consistência dos dados retroanalizados, uma vez que, em análise semelhante realizada em uma base de BGTC, nesta mesma pesquisa de Andrade (2017), o módulo de elasticidade permaneceu inalterado.

Figura 10 – Módulos retroanalizados por Andrade (2017)

Fonte: Andrade, 2017.

Além do método de ensaio (triaxial ou compressão diametral), uma diferença entre as pesquisas está na energia de compactação. Os corpos de prova submetidos ao ensaio triaxial foram compactados na energia *Proctor* modificada, enquanto os corpos de prova ensaiados por compressão diametral foram compactados no compactador Marshall com 75 golpes. Essa diferença será abordada na análise laboratorial desta pesquisa.

As especificações de dosagem da Wirtgen (2012), da ARRA (2015) e do DER/SP (2016) estabelecem valores mínimos de resistência à tração indireta (determinação da resistência à tração por compressão diametral) para as misturas recicladas a frio. No caso da Wirtgen (2012), os valores de resistência à tração devem ser superiores a 0,1 MPa, enquanto que na especificação da ARRA (2015), esse valor deve ser superior a 0,3 MPa, assim como a especificação de reciclagem *in situ* com emulsão asfáltica do DER/SP (ET-DE-P00/034, 2016), que também limita a resistência à tração mínima em 0,3 MPa.

Diversos estudos têm determinado a resistência à tração de misturas asfálticas recicladas a frio, cujos valores são variáveis em função de muitos fatores, como tempo de cura, tipo e energia de compactação do corpo de prova, agente de reciclagem utilizado, teor e consistência de asfalto residual do RAP.

Silva (2011), por exemplo, obteve valores de resistência à tração da ordem de 0,35 MPa, em corpos de prova compactados no compactador Marshall (75 golpes por face), em três teores de emulsão diferente: 2,5%, 3,0% e 3,5%, sendo estes resultados semelhantes aos obtidos por David (2006).

Uma informação não observada em Silva (2011) foi o tempo de espera entre a compactação e a realização dos ensaios. Foi mencionado apenas que os corpos de prova foram curados em estufa a 60°C por 24 h, sendo extraídos dos moldes após 2 horas em temperatura ambiente.

Buscando obter a melhor correlação entre a compactação em laboratório e em campo, Martínez et al. (2007), fez um estudo comparando a compactação Proctor, Marshall e SUPERPAVE com os valores obtidos em campo, medidos com densímetro nuclear e a partir da extração de corpos de prova da pista. Os CPs foram moldados com um teor de emulsão asfáltica de ruptura lenta de 3,5% (em peso) e com cura a 60°C por 3 dias. O comparativo entre as massas específicas obtidas é observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica de misturas recicladas em diferentes formas de compactação por Martínez (2007)

Método de compactação	Massa específica (g/cm³)
Marshall (laboratório)	2,18
Proctor (laboratório)	2,08
SUPERPAVE (laboratório)	2,16
Densímetro nuclear (campo)	2,17
CPs após 6 meses (campo)	2,27
CPS após 18 meses (campo)	2,21

Fonte: Adaptado de Martínez, 2007.

Em relação a resistência a tração, os resultados obtidos por Martínez (2007) obtidos nos CPs moldados no compactador giratório foi extremamente elevado, de 1,6 MPa, muito provavelmente em função do número de giros utilizados, de 300 giros, 10 vezes superior ao preconizado pela ARRA (2015), o que causou surpresa ao analisar os resultados.

Ainda em estudos comparativos entre diferentes métodos de compactação, Mollenhauer *et al.* (2016), comparou diferentes métodos de compactação, com destaque para as compactações Proctor e Marshall (50 e 100 golpes por face) que apresentaram resultados mais próximos às demais pesquisas (Figura 11).

Figura 11 – Volume de vazios em diferentes métodos de compactação em Mollenhauer (2016)

Fonte: Adaptado de MOLLENHAUER, 2016.

Mollenhauer *et al.* (2016), também avaliaram a variação da resistência à tração em função do tempo de cura (7 e 14 dias) e em 3 métodos de compactação diferente (Marshall, SUPERPAVE e compactação estática), como observado na Figura 12.

Figura 12 – RTCD em diferentes método de compactação por Mollenhauer (2016)

Fonte: Adaptado de MOLLENHAUER, 2016.

Nesse trabalho, os valores de resistência a tração observados foram levemente superiores trabalhos brasileiros, da ordem de 0,4 e 0,7 MPa para 7 e 14 dias de cura respectivamente. O diferencial foi o valor obtido no compactador giratório com uma maior energia de compactação (60 e 80 giros), chegando em valores de RTCD da ordem de 0,6 a 0,8 MPa, mostrando que a mistura reciclada a frio, com agente de reciclagem emulsionado, é sensível a diferentes formas de compactação, energia e tempo de cura.

3 ESTUDO DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

A presente pesquisa contempla o acompanhamento da execução e o monitoramento de dois trechos experimentais utilizando mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de RAP e ARE como camada de base um de pavimento, cujos materiais também foram estudados em laboratório. Com relação aos segmentos estudados, estes foram feitos na Rodovia Castello Branco (SP-280), pista leste, na região da Grande São Paulo, sendo: (i) trecho 1: restauração por meio de fresagem e recomposição, ao longo de 80 m no km 32; e (ii) implantação de duas faixas adicionais, totalizando de 4,5 km nos km 44 e 50. De maneira resumida, as atividades realizadas estão apresentadas na forma de fluxogramas (Figura 13 e Figura 14).

Figura 13 – Fluxograma da pesquisa no trecho experimental 1 - restauração de por meio de fresagem e recomposição

Figura 14 – Fluxograma da pesquisa no trecho experimental 2 - implantação de duas faixas adicionais

3.1 RAP

Para início dos estudos foram definidos os locais de coleta de RAP: foram identificados dois grandes estoques de RAP pertencentes ao Grupo CCR (que detém a concessão da SP-280), sendo um localizado no km 98 da Rodovia Anhanguera (SP-330), com RAP originado nas fresagens da própria SP-330 e da Rodovia dos Bandeirantes (SP-348) (estoque 1), e outro localizado no km 24 da Rodovia Castello Branco (SP-280),

este constituído com materiais de origem nas fresagens desta última e do Rodoanel Mário Covas (SP-021) (estoque 2).

O estoque 1 de RAP usado para esta pesquisa, contendo mais de 9 mil m³ de material fresado, foi gerado nas obras de restauração da SP-348 e da SP-330. Não foi possível identificar a procedência e as características das misturas originais nas pilhas, como tipo de ligante, granulometria do agregado, ou até mesmo a idade do revestimento fresado. Este material também foi armazenado sem procedimento de estocagem que evitasse o contato do RAP por solo ou outros materiais indesejáveis. Foi possível identificar materiais com presença de solo, resíduos de demolição de concreto, pedaços de madeira, entre outros.

Já o estoque 2 usado para esta pesquisa continha aproximadamente 5 mil m³ de RAP. Ao contrário do estoque descrito anteriormente, neste havia registro de origem do material e um cuidado maior para evitar a presença de outros materiais.

Na coleta de RAP no estoque 1, optou-se por considerar a avaliação do RAP em diferentes granulometrias. Para tanto, o RAP do estoque 1 foi coletado em três pontos diferentes das pilhas em que visualmente havia diversidade de granulometria (um material aparentemente mais graúdo, um mediano e outro mais fino). Por granulometria entende-se que esta se refere aos grumos de RAP, composto por brita, filer e betume residual, definida como *Black Curve* pelo RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*).

Os materiais coletados no estoque 1 foram assim denominados: (i) A1: classificado visualmente como mais grosseiro; (ii) A2: classificado visualmente como graduado; e (iii) A3: classificado visualmente como fino.

Importante ressaltar que, anteriormente à coleta, foi feita a homogeneização do material com escavadeira ao longo dos horizontes das pilhas, em uma profundidade aproximada de 2 m. O objetivo dessa homogeneização foi evitar que o material fosse coletado apenas na superfície da pilha, onde tende a ser mais grosseiro, em virtude do carreamento dos finos pela chuva para dentro da pilha.

Já no estoque 2, em que se tinha informação dos tipos/procedências dos materiais nas pilhas, optou-se por coletar diferentes RAP não em termos granulométricos (graúdo a miúdo) como no estoque 1. Nesta fase já se tinha o resultado laboratorial de avaliação de granulometria do estoque 1 (descrito mais adiante), em que as três

curvas se mostraram bastante semelhantes, ou seja, a diferenciação visual não foi efetiva.

O material coletado no estoque 2 foi identificado como de duas origens: a primeira, um concreto asfáltico (CA) com CAP convencional, gerado na fresagem da Rodovia Castello Branco (SP-280), onde foram realizadas duas coletas, em locais diferentes do estoque: C1 e C2. E uma segunda pilha, com RAP gerado pela fresagem de uma camada porosa de atrito (CPA) com CAP modificado por borracha do Rodoanel (SP-021), identificado como R.

O material coletado em ambos os estoques foi enviado para o Centro de Pesquisas Rodoviárias do Grupo CCR, na cidade de Santa Isabel/SP e para o laboratório da Betunel, distribuidora de asfalto e fornecedora do agente de reciclagem utilizado nesta pesquisa, localizado na cidade de Ribeirão Preto/SP. Na Betunel foi feita a caracterização do RAP quanto à granulometria (do RAP e do agregado), teor e consistência do ligante remanescente, e elaboração do projeto da mistura reciclada a frio com agente de reciclagem emulsionado.

3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO RAP

A análise granulométrica do RAP das seis amostras coletadas (três de cada estoque) foi realizada por peneiramento e seguiu a metodologia preconizada na norma DNER-ME 083/98. Além disso, foram obtidas curvas granulométricas do RAP tipo *black curve* e do agregado após a extração do ligante, denominado de *white curve* (ambas denominações utilizadas pelo RILEM).

As curvas granulométricas (*black curve*) foram obtidas em ensaios realizados na empresa fornecedora do ARE e estão apresentadas na Figura 15, juntamente com a faixa II da ARRA (2017), uma das três faixas “alvo” (uma de graduação fina, uma média e uma grosseira) prevista na especificação para melhor compactação da mistura reciclada.

Figura 15 – Granulometria do RAP antes da extração de asfalto (*black curve*) – estoque 1

Como pode ser observado na Figura 15, apesar de uma aparente diferença observada inicialmente nas pilhas quanto à granulometria, as três amostras se mostraram praticamente idênticas. Ou seja, esta percepção não se comprovou com os ensaios realizados. Apesar da classificação visual ter sido feita com o material que podia ser visualizado na superfície da pilha, após a homogeneização com a escavadeira essa diferença aparente não se confirmou.

Pelas especificações da ARRA para reciclagem a frio (CR-102, 2017; CR-201, 2017), a única limitação quanto à granulometria é não possuir agregado com diâmetro superior a 31 mm, desde que a mistura reciclada atenda os parâmetros de resistência a tração na compressão diametral. Adicionalmente, para reciclagem em usina, a especificação fornece três faixas “alvo”, caso se deseje fazer a composição da mistura com diferentes tipos de RAP. As curvas obtidas se aproximaram bem da Faixa II, exceto pelo diâmetro máximo.

Apesar de a granulometria não atender à especificação quanto ao diâmetro máximo do agregado, como a usina a ser utilizada para a usinagem da mistura possuía peneira classificatória e britador acoplado para o destorroamento de grumos de RAP com diâmetro superior a 31 mm, essa limitação pôde ser corrigida.

Na sequência, foi realizada a extração do ligante e determinada a curva granulométrica dos agregados (*white curve*) no laboratório da empresa fornecedora do ARE e no CPR, apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Granulometria do RAP após a extração de asfalto (*white curve*) – estoque 1

As curvas após a extração do ligante (Figura 16) se mostraram muito semelhantes, independentemente do laboratório que realizou o ensaio, demonstrando que provavelmente se tratam da mesma mistura asfáltica. Adicionalmente, observou-se que as curvas se apresentaram próximas ao limite superior da Faixa C do DNIT para concreto asfáltico (DNIT 031/2004 - ES), mostrando que, provavelmente, essa era a faixa granulométrica da mistura original.

De maneira análoga, foram obtidas as curvas granulométricas do RAP e dos agregado após a extração de ligante para as amostras coletadas no estoque 2. Os ensaios foram conduzidos pela empresa fornecedora do ARE e os resultados são apresentados na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 – Granulometria do RAP antes da extração de asfalto (*black curve*) - estoque 2

Figura 18 – Granulometria do RAP após a extração de asfalto (*white curve*) – estoque 2

Como é possível observar, as pilhas indicadas como sendo de CPA proveniente do Rodoanel, não se confirmou na análise granulométrica. Apesar da orientação no estoque para que houvesse separação do RAP em função da origem, é possível que tenha havido mistura de materiais diferentes (apesar da orientação bem sinalizada, é provável que os operadores que faziam a descarga não a tenham seguido).

3.3 TEOR DE ASFALTO RESIDUAL DO RAP

As seis amostras de RAP coletadas, três em cada estoque, tiveram os seus ligantes extraídos, a fim de se conhecer o teor de ligante remanescente do fresado. Foi utilizado um extrator por refluxo, do tipo Soxhlet (ABNT NBR 16208, 2013), ilustrado na Figura 19. Os teores de ligante remanescente no RAP por este método são apresentados na Figura 20.

Figura 19 – Extrator Soxhlet para determinação do teor de ligante

Fonte: Cedido por Rômulo Constantino, 2017.

Figura 20 – Teor de asfalto residual no RAP

Como pode ser observado, os teores médios de asfalto nos RAPs coletados nos estoques 1 e 2 foram, respectivamente 4,1% e 5,0%. Verifica-se ainda que o RAP do estoque 2 mostrou-se mais variável quanto ao teor de asfalto ($\pm 0,3\%$), em comparação com o material do estoque 1. Embora entenda-se que o RAP possa ser um material heterogêneo, se esta característica for acentuada, pode haver comprometimento da previsibilidade de desempenho da mistura reciclada.

Complementarmente, cabe mencionar que no decorrer da execução do trecho experimental que será detalhado mais adiante, foi controlado sistematicamente o teor de CAP, tanto do RAP, quanto da mistura reciclada. Neste caso, além do ensaio por refluxo, foi utilizado o método da ignição, com um forno padrão NCAT (ASTM D-6307, 2016), no laboratório do CPR, e para o controle da obra foram realizados ensaios com equipamento Rotarex (ABNT NBR 16208, 2013) no laboratório móvel da empresa responsável pela usinagem do material para execução dos trechos experimentais. O forno NCAT utilizado contou com sistema interno de pesagem, sendo possível o acompanhamento em tempo real da variação de massa da mistura, sendo o ensaio paralisado quando a massa permanecia constante.

3.4 CONSISTÊNCIA DO LIGANTE RESIDUAL DO RAP ANTES E APÓS A ADIÇÃO DO AGENTE DE RECICLAGEM

Visando a caracterização física do ligante residual do RAP, antes e após da adição do ARE, foram realizados ensaios de penetração (ABNT NBR 6576, 2016) e de ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560, 2016) no ligante asfáltico extraído e recuperado das 6 amostras de RAP. Para avaliar o desempenho do agente de reciclagem sobre o asfalto residual do fresado, foi incorporado 2,5% de agente de reciclagem (valor médio esperado para o teor final de ARE a ser determinado durante a dosagem), sendo posteriormente feita a extração e recuperação do ligante residual total (residual + ARE) para ensaios de caracterização de consistência no laboratório da fabricante do agente de reciclagem.

O ARE utilizado para a produção das misturas asfálticas recicladas desta pesquisa foi produzido pela empresa Betunel, na forma de uma emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), catiônica, de ruptura controlada e com adição de agente rejuvenescedor de origem mineral.

Importante ressaltar que o ligante extraído pelo método Soxhlet passou por processo de recuperação, visando retirar o solvente utilizado na extração, mas o contato do solvente com o CAP pode ter alterado as propriedades avaliadas. Todavia, o processo de extração e recuperação foi realizado tanto no RAP quanto na mistura de RAP com 2,5% de ARE, ou seja, uma possível influência do solvente nas propriedades do ligante asfáltico ocorreria nas duas amostras. Como o intuito era comparar o antes e depois da adição do agente e essa possível alteração ocorreria nos dois casos, esse efeito não foi considerado.

A recuperação do asfalto foi feita pelo Método de Abson (ASTM D1856, 2009), de destilação fracionada, sendo o equipamento utilizado ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Destilador Abson para recuperação do ligante asfáltico extraído

Fonte: Cedido por Rômulo Constantino, 2017.

Com relação às amostras do estoque 1, intituladas como “A1”, “A2” e “A3”, como não foram identificadas diferenças significativas quanto à granulometria, teor de asfalto e origem dos materiais, passou-se a trabalhar com um material único, após misturá-las e homogeneizá-las, passando a denominá-la de amostra “A”, visando caracterizá-la quanto à consistência.

Já no caso do RAP do estoque 2, os ensaios foram feitos individualmente em cada amostra (“V1”, “V2” e “R”), devido à maior variabilidade encontrada, não em termos de granulometria, mas de teor de ligante. Os resultados relativos aos ensaios de

consistência – penetração (ABNT NBR 6576, 2016) e ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560, 2016) são apresentados respectivamente na Figura 22 e na Figura 23.

Figura 22 – Ensaio de penetração nas amostras coletadas antes e depois da incorporação do agente de reciclagem no RAP

Figura 23 – Ensaio de ponto de amolecimento nas amostras coletadas antes e depois da incorporação do agente de reciclagem

Como pode ser observado, os asfaltos extraídos e recuperados analisados apresentavam penetração de 8 a 11 x 10⁻¹ mm em ambos estoques. Quanto ao ponto de amolecimento, a amostra do estoque 1 apresentou valor da ordem de 80°C,

enquanto do estoque 2 variou entre 92 e 95°C. Tais valores indicavam que o CAP estava oxidado, uma vez que a consistência, de maneira geral, se mostrou diferente da indicada nas especificações dos asfaltos vendidos “de prateleira” no Brasil (CAP 50-70 em larga escala e CAP 30-45 em menor escala).

Para se ter uma ideia, pela resolução da ANP Nº 19 de 2005 (retificada em 2006), após o ensaio de RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*, em inglês) (ABNT NBR 15235, 2009), que simula a oxidação do asfalto durante a usinagem, o CAP 30-45 deveria apresentar um aumento do ponto de amolecimento de (no máximo) 8°C, atingido, assim, 60°C, e uma penetração entre 15 e 22 x 10⁻¹ mm. Dentro deste contexto, verifica-se que a incorporação do agente de reciclagem permitiu o aumento da penetração a valores próximos ao esperado para um ligante convencional (CAP 30-45) após a usinagem, embora a redução do ponto de amolecimento tenha ocorrido, mas ainda acima do esperado para tal ligante asfáltico após a usinagem.

3.5 DOSAGEM MARSHALL

A metodologia Marshall foi concebida, inicialmente, para misturas usinadas a quente, mas também é utilizada para dosagens de misturas asfálticas usinadas a frio, sendo o método de dosagem proposto por ARRA (2015) e WIRTGEN (2012) para estas misturas.

Com a curva granulométrica da mistura já estabelecida, a dosagem Marshall foi feita com o objetivo de determinar o teor de agente de reciclagem a ser incorporado na mistura e a massa específica aparente do material compactado, além de outros parâmetros usuais como volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume-vazios. Adicionalmente, seguindo a especificação da ARRA (2017), o diâmetro máximo do grumo de RAP foi limitado em 31 mm.

O teor “ótimo” de agente de reciclagem (teor de projeto) a ser incorporado seria aquele que levasse a mistura reciclada a atingir os maiores valores de estabilidade, além de atender aos parâmetros mínimos de fluência, resistência à tração na compressão diametral e dano por umidade induzida, também determinados na especificação da ARRA (2017). Para tanto, foram moldados corpos de prova com o RAP proveniente dos dois estoques, combinados a três teores de agente de reciclagem emulsionado: 2,0%, 2,5% e 3,0%. Uma vez que o teor ótimo de fluídos (ARE + água) na mistura

para compactação é de 5% a 6% (ARRA, 2015), em todos os casos incorporou-se 3% de água de molhagem, visando auxiliar na dispersão do agente de reciclagem na superfície do RAP.

3.5.1 Dosagem da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1

Foi determinada a densidade efetiva dos agregados da amostra de RAP do estoque 1, denominada de “A”, por meio do ensaio Rice (ASTM D-2041, 2011), que resultou igual a 2,593 g/cm³, com o teor de CAP remanescente de 4,1%.

Foram moldados 3 corpos de prova Marshall para cada teor de ARE - 2,0%, 2,5% e 3,0%. Após a produção de cada mistura, a mesma foi mantida em repouso por 1 h para perder parte da umidade antes da compactação. Na sequência, foi realizada a compactação Marshall, 75 golpes por face, sendo, em seguida, os corpos de prova armazenados em estufa a 60°C durante 24 h. Depois de desmoldados, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente por mais 24 h, antes da determinação da massa específica aparente e dos parâmetros volumétricos da mistura. Para a pesagem imersa dos corpos de prova, estes foram envoltos em plástico filme, em substituição à parafina, em função do elevado volume de vazios da mistura. Cabe mencionar que para os ensaios de estabilidade e fluência, os corpos de prova foram levados novamente à estufa durante 2 h à temperatura de 40°C.

Os resultados da dosagem Marshall estão consolidados na Tabela 6 e na Figura 24. A dosagem indicou que o teor de projeto de agente de reciclagem seria de 2,5%, acarretando em um teor de resíduo asfáltico de 1,6%.

Tabela 6 – Caracterização Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1

% Ligante			Massa específica (g/cm ³)		V _v (%)	V _b (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
RAP	Resíduo	Total	Aparente	Real (Rice)						
4,1	1,2	5,3	2,186	2,573	15,04	11,59	26,63	43,51	1.074	5,2
4,1	1,5	5,6	2,226	2,560	13,05	12,47	25,51	48,86	1.258	5,4
4,1	1,8	5,9	2,236	2,544	12,11	13,19	25,30	52,15	1.167	6,1

Vv: volume de vazios; Vb: volume de betume; VAM: volume do agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade; F: fluência.

Figura 24 – Resumo dos parâmetros Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 1

3.5.2 Dosagem da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2

Na dosagem da mistura reciclada com RAP do estoque 2 o procedimento adotado foi exatamente o mesmo, com exceção de uma dosagem independente para cada amostra coletada.

Os resultados de dosagem Marshall são apresentados na Tabela 7 e na Figura 25.

Tabela 7 – Caracterização Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2

Amostra	% Ligante			Massa específica (g/cm³)		V _v (%)	V _b (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
	RAP	Resíduo	Total	Aparente	Real (Rice)						
V1	5,3	1,2	6,5	2,050	2,426	15,50	13,26	28,76	46,11	672	6,62
	5,3	1,5	6,8	2,064	2,416	14,57	13,97	28,54	48,96	701	6,68
	5,3	1,8	7,1	2,072	2,405	13,85	14,65	28,50	51,41	675	6,79
V2	4,7	1,2	5,9	2,070	2,437	15,06	12,15	27,21	44,66	878	5,34
	4,7	1,5	6,2	2,083	2,426	14,14	12,85	26,99	47,62	920	6,11
	4,7	1,8	6,5	2,085	2,416	13,70	13,49	27,19	49,61	886	6,24
R	4,9	1,2	6,1	2,010	2,404	16,39	12,34	28,73	42,96	510	7,13
	4,9	1,5	6,4	2,025	2,394	15,41	13,04	28,45	45,83	569	7,44
	4,9	1,8	6,7	2,032	2,384	14,77	13,70	28,46	48,12	552	7,59

Onde: V_v: volume de vazios; V_b: volume de betume; VAM: volume do agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade; F: fluência

Figura 25 – Resumo das parâmetros Marshall da mistura reciclada contendo RAP do estoque 2

Como observado, os valores obtidos com o material coletado na pilha que teria sido originário do Rodoanel foram inferiores quanto à estabilidade e superiores quanto à fluência, o que levou ao descarte desta pilha para a construção do trecho experimental.

Com base nos resultados obtidos também se definiu como sendo 2,5% o teor de projeto para produção da mistura reciclada com o material de RAP do estoque 2.

3.6 TRECHOS EXPERIMENTAIS

A verificação do desempenho da mistura reciclada em campo foi realizada mediante a construção de dois trechos experimentais.

Inicialmente, o RAP do estoque 1 foi separado e analisado visando a implantação de uma faixa adicional na Rodovia do Bandeirantes (SP-348), na região de Jundiá-SP. Entretanto, por motivos alheios a essa pesquisa, o trecho acabou não sendo feito com esse material. Sendo assim, planejou-se, então, a utilização da mistura reciclada a frio

para construção de uma base de pavimento na implantação de duas faixas adicionais na Rodovia Castello Branco (SP-280). Neste caso, porém, foi planejada a realização de um segmento-teste de fresagem e recomposição, de 80 m, com o material do estoque 1, que já havia sido ensaiado e dosado. O objetivo da concessionária foi identificar dificuldades logísticas e executivas quanto à usinagem, transporte, lançamento, compactação e cura, e não propriamente o comportamento da mistura reciclada. Isto permitiria o planejamento mais seguro de um trecho futuro, que seria a implantação das duas faixas adicionais na Rodovia Castello Branco, entre os km 44 e 46 e entre os km 50 e 53, cuja camada de base seria feita com uma mistura asfáltica reciclada a frio, com agente de reciclagem emulsionado. A implantação de ambos os trechos experimentais será detalhada a seguir.

3.6.1 Trecho experimental 1 - Fresagem e recomposição

No ano de 2016, teve início uma obra de restauração do pavimento da Rodovia Castello Branco SP-280, entre os km 13 e km 33. Em função do bom estado geral de conservação da rodovia, o projeto previa, em sua grande parte, somente correções superficiais do revestimento asfáltico. Entre os km 31+940 e 32+020 da Pista Leste, local em que a rodovia dispõe de 3 faixas de rolamento em cada pista e tráfego pesado, o projeto de restauração previa a substituição total do revestimento asfáltico existente, com fresagem e posterior recomposição com 24 cm de mistura asfáltica. O trecho antes da obra pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Segmento da Rodovia Castello Branco antes da obra de restauração (2016)

Fonte: Projeto de restauração da SP-280, 2016.

Nesse segmento o pavimento era constituído de uma camada espessa de revestimento asfáltico, da ordem de 24 cm, consequência das diversas intervenções de recapeamento asfáltico, desde que a rodovia foi inaugurada nos anos de 1960. A estrutura do pavimento era do tipo semirrígido, com uma base cimentada de brita graduada tratada com cimento (BGTC), apoiado em uma sub-base granular. A seção transversal do projeto original de implantação da rodovia (DER/SP CEA, 1971) e estrutura atual do pavimento, verificada por meio de poço de inspeção no km 33, são apresentadas na Figura 27.

Figura 27 – Seção transversal da estrutura do pavimento no km 33+000 da SP-280

Fonte (1): DER/SP CEA, 1971.

Fonte (2): Adaptado de projeto de restauração da SP-280, 2016.

O levantamento deflectométrico do trecho, realizado para a elaboração do projeto de restauração, permitiu avaliar que a estrutura original de BGTC estava trabalhando com um módulo de elasticidade (simulado com *software Elsym 5*) considerado muito baixo, da ordem de 300 MPa, aproximadamente, o que demonstra que a mesma se encontrava deteriorada, com valor equivalente ao de uma camada granular.

Em função destas características apresentadas, o projeto original de restauração previa a execução de uma nova camada asfáltica de 24 cm sobre a camada de BGTC deteriorada. Além disso, em função do tipo de defeito observado no pavimento, trincamento tipo FC-2 e FC-3 com bombeamento de finos (indicando a presença de água no interior da estrutura do pavimento), foi prevista a execução de um dreno longitudinal de pavimento ao longo de todos o segmento. A seção transversal da solução proposta pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Seção transversal da solução de restauração do pavimento no km 32 da SP-280

Fonte: Projeto de Restauração de Pavimentos da SP-280, 2016.

Esse segmento de 80 m de extensão foi o escolhido como o primeiro trecho experimental contemplando a camada de mistura reciclada a frio (objeto desta pesquisa), substituindo parte da estrutura original proposta. Para a construção desse segmento foi utilizado o RAP do estoque 1, uma vez que este já estava com a dosagem realizada e possuía menor distância de transporte entre o local que seria feita a usinagem da mistura (Paulínia-SP) e a estocagem (Campinas-SP).

A usinagem foi conduzida na cidade de Paulínia/SP, na sede da empresa Brown Brown. Importante salientar novamente que o objetivo desse segmento foi identificar as dificuldades logísticas, construtivas e de usinagem da mistura reciclada, enquanto seu desempenho, nesse primeiro momento, não seria objeto de análise.

A estrutura então projetada foi alterada para contemplar duas camadas de mistura asfáltica reciclada a frio, de 7 cm cada, conforme apresentado na Figura 29. As demais premissas de projeto foram mantidas, como por exemplo a colocação de dreno longitudinal ao longo de toda a solução.

Figura 29 – Estrutura da recomposição da estrutura do pavimento do teste do km 32

Estrutura convencional do projeto de restauração		Estrutura proposta com a mistura reciclada a frio	
<i>Gap Graded</i> (ver Tabela 8)	5 cm	<i>Gap Graded</i> (ver Tabela 8)	10 cm
Binder (ver Tabela 8)	19 cm	Mistura reciclada a frio	14 cm
BGTC remanescente		BGTC remanescente	

A mistura asfáltica adotada para o revestimento (*Gap Graded*) é uma mistura do tipo semidescontínua, que tem a finalidade de reduzir os ruídos, evitar o spray d'água e melhorar o conforto ao rolamento da pista. Já a mistura asfáltica utilizada como binder é uma mistura com agregado de diâmetro máximo nominal de 25 mm, com elevada resistência à deformação permanente. As faixas granulométricas das misturas asfálticas utilizadas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Faixa granulométrica das misturas asfálticas - trecho 1

Peneira		<i>Gap Graded</i>		<i>Binder</i>	
Nº	mm				
1 1/2"	38,10			100	100
1"	25,40			70	90
3/4"	19,10			50	80
1/2"	12,50	100	100	40	70
3/8"	9,50	80	100	35	60
4	4,75	25	40	25	50
8	2,40	19	32		
10	2,00			15	40
30	0,60	10	18		
40	0,42			7	20
50	0,30	8	13		
80	0,18			5	15
100	0,15	6	10		
200	0,075	4	7	2	10

Fonte: Projeto de Restauração de Pavimentos da SP-280, 2016.

3.6.2 Trecho experimental 2 - Implantação de faixas adicionais

Foi prevista para o ano de 2018 a implantação de duas faixas adicionais na Pista Leste da Rodovia Castello Branco, precisamente entre os km 44+060 e 45+960 e entre os km 50+070 e 52+780, totalizando, com as transições de entrada e saída, 4.580 m de

faixa a ser implantada, como detalhado na Figura 30. Nesse segmento, a rodovia era de pista dupla e com três faixas em cada sentido. As implantações se deram pela necessidade de se aumentar a fluidez do tráfego nesses segmentos e melhorar o seu nível de serviço.

Figura 30 – Retográfico da implantação das faixas adicionais da SP-280

A concepção inicial da estrutura foi realizada com materiais convencionais de um pavimento flexível, com camada de rolamento em concreto asfáltico (CA), base em brita graduada simples (BGS), sub-base em macadame seco (MS) e reforço do subleito em rachão não classificado sobre a camada de subleito. Essa concepção

inicial, então, foi redimensionada, dentro do escopo desta pesquisa, e apresentada uma solução alternativa, com utilização de materiais reciclados em duas camadas: a mistura reciclada a frio com agente de reciclagem substituindo parte do revestimento e do macadame seco, e duas camadas de resíduo de construção e demolição (RCD), substituindo a camada de rachão.

3.6.2.1 Determinação do tráfego de projeto

Os parâmetros para a determinação do tráfego de projeto para balizar o dimensionamento da estrutura são apresentados a seguir. O Volume Diário Médio Anual Comercial (VDMA_{com}), assim como a distribuição por tipo de veículo, nesse segmento da rodovia, no ano de 2016, está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – VDMA comercial em 2016 no trecho experimental 2

Veículo comercial		Frequência (%)
2 eixos	2C	24
3 eixos	3C	30
4 eixos	2S2	6
5 eixos	2S3	13
6 eixos	3S3	23
7 eixos	3T4	3
9 eixos	3M6	1
VDMA_{com} (2016)		8.311 veículos

Fonte: Praça de pedágio km 74 Pista Leste, 2016.

Para o cálculo do Número N foram utilizados os fatores de equivalência de carga da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e do USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*), cujos cálculos são apresentados de forma simplificada no Manual Básico de Pavimentação do DNIT (2006). Os parâmetros adotados para o cálculo do Número N são descritos a seguir.

As duas faixas adicionais, do km 44 e do km 50, foram implantadas no lado interno da pista, ao lado do canteiro central, região de tráfego predominantemente de veículos leves. Analisando-se os dados de tráfego pesado de 2016, coletados do Sistema

Analisador de Tráfego (SAT) do km 51+900, é possível identificar a distribuição de tráfego de veículos pesados apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Distribuição de veículos comerciais por faixa no km 51+900 no ano de 2016

Mês	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Total Mensal
janeiro	6.717	83.338	163.410	253.464
fevereiro	8.103	85.772	155.290	249.164
março	10.743	111.103	188.748	310.594
abril	10.296	103.061	80.686	194.044
maio	10.405	104.413	114.885	229.703
junho	9.489	98.462	165.743	273.694
julho	9.969	104.623	176.351	290.943
agosto	9.872	106.449	181.329	297.650
setembro	10.218	106.304	172.996	289.518
outubro	10.119	108.532	181.460	300.111
novembro	9.887	100.901	168.033	278.821
dezembro	9.940	95.845	164.272	270.057
Média	9.646	100.734	159.434	269.814
Distribuição	3,6%	37,3%	59,1%	100%

Fonte: Sistema analisador de tráfego km 51 Pista Leste da SP-280, 2016.

Assim, com a configuração naquele momento, a porcentagem de veículos pesados na faixa 1 era de 3,6% do tráfego total de caminhões e ônibus da rodovia. Com a implantação de uma nova faixa adicional, a tendência seria de que o VDM na nova Faixa 1, recém implantada, fosse bem inferior aquele número. Neste caso, a favor da segurança, adotou-se o valor de 3% para o fator de faixa.

Quanto à taxa de crescimento do tráfego, apesar do cenário de recessão apresentado nos anos recentes à implantação do projeto, com decréscimo constante nos volumes de tráfego, foi adotada a taxa de 2,5% ao ano.

Com relação ao carregamento, foi adotada a hipótese de 50% dos veículos comerciais carregados com carga máxima legal e 50% vazios. Esta hipótese justificava-se, pois para que os veículos comerciais conseguissem trafegar na faixa 1 a ser implantada, deveriam trafegar com velocidade próxima à velocidade dos veículos leves e, portanto, estes provavelmente, não estariam carregados.

Com base nas informações citadas, foi possível calcular o Número N de projeto para o pavimento original destas faixas adicionais, considerando os dados a seguir:

- Período de projeto: 10 anos;
- Ano de obtenção de dados de tráfego: 2016;
- Ano de abertura ao tráfego: 2018;
- Fator de faixa: 3%;
- Taxa de crescimento: 2,5% ao ano;
- Distribuição de carga: 50% carregados e 50% vazio (apenas tara).

Os resultados relativos aos fatores de equivalência de carga – FEC_{USACE} e FEC_{AASHTO} , dos fatores de veículo – FV_{USACE} e FV_{AASHTO} , e dos Números N – N_{USACE} e N_{AASHTO} são apresentados na Tabela 11, na Tabela 12 e na

Tabela 13.

Tabela 11 – Fatores de equivalência de carga

Tipo de eixo	Peso (t)		FEC_{USACE}		FEC_{AASHTO}	
	Vazio	Cheio	Vazio	Cheio	Vazio	Cheio
ESRS	3,0	6,0	0,02	0,28	0,02	0,33
ESRD	5,0	10,0	0,13	3,29	0,12	2,39
ETD	6,0	17,0	0,08	8,55	0,02	1,64
ETT	9,0	25,5	0,13	9,30	0,02	1,56

ESRS: eixo simples de rodagem simples; ESRD: eixo simples de rodagem dupla;

ETD: Eixo tandem duplo; ETT: eixo tandem triplo.

Tabela 12 – Fatores de veículo

Veículos comerciais ⁴		Número de eixos por veículo				FV _{USACE}	FV _{AASHTO}
Tipo	Distribuição (%)	ESRS	ESRD	ETD	ETT		
2C	24	1	1			1,9	1,4
3C	30	1		1		4,5	1,0
2S2	6	1	1	1		6,2	2,3
2S3	13	1	1		1	6,6	2,2
3S3	23	1		1	1	9,2	1,8
3T4	3	1		3	0	13,1	2,7
3M6	1	1		1	2	13,9	2,6
TOTAL	100			FV FROTA		5,65	1,59

Tabela 13 – Número N de projeto

Ano	Ano de Projeto	VDMA	Número N _{USACE}		Número N _{AASHTO}	
			Anual	Acumulado	Anual	Acumulado
2016		8.311	5,1 E+05		1,4 E+05	
2017		8.519	5,3 E+05		1,5 E+05	
2018	1	8.732	5,4 E+05	5,4 E+05	1,5 E+05	1,5 E+05
2019	2	8.950	5,5 E+05	1,1 E+06	1,6 E+05	3,1 E+05
2020	3	9.174	5,7 E+05	1,7 E+06	1,6 E+05	4,7 E+05
2021	4	9.403	5,8 E+05	2,2 E+06	1,6 E+05	6,3 E+05
2022	5	9.638	6,0 E+05	2,8 E+06	1,7 E+05	8,0 E+05
2023	6	9.879	6,1 E+05	3,5 E+06	1,7 E+05	9,7 E+05
2024	7	10.126	6,3 E+05	4,1 E+06	1,8 E+05	1,1 E+06
2025	8	10.379	6,4 E+05	4,7 E+06	1,8 E+05	1,3 E+06
2026	9	10.639	6,6 E+05	5,4 E+06	1,8 E+05	1,5 E+06
2027	10	10.905	6,7 E+05	6,1 E+06	1,9 E+05	1,7 E+06

Com base nesses valores, o projeto foi dimensionado a partir de $N_{USACE} = 6,1 \cdot 10^6$ e $N_{AASHTO} = 1,7 \cdot 10^6$.

3.6.2.2 Capacidade de suporte do subleito

Os ensaios geotécnicos realizados nos locais de implantação das faixas adicionais indicaram a presença, predominantemente, de solos não lateríticos, siltosos e

⁴ DNIT. Manual de estudos de tráfego. 2006

argilosos, com baixa capacidade de suporte e classificados na metodologia MCT como sendo NG' e NS'. Além disso, os ensaios também indicaram a forte presença de umidade na região. A umidade natural média (determinada em estufa em amostras coletadas em campo e enviadas lacradas para o laboratório), ficou em torno de 6% acima da umidade ótima de compactação (para ensaio de CBR na energia normal). Em um dos pontos ensaiados, a umidade natural chegou a 38%.

Foram realizados ensaios de CBR (*California Bearing Ratio*) e de módulo de resiliência (MR), cujos resultados característicos foram, respectivamente, da ordem de 5% e de 54 MPa na umidade ótima em ensaios realizado durante a elaboração do projeto original.

Neste caso, observou-se que para levar a umidade do subleito à umidade ótima, ainda com a obra sendo realizada em período chuvoso, se trataria de uma atividade altamente trabalhosa. Desta forma, optou-se em substituir a camada final de terraplenagem (CFT) de 60 cm por uma camada granular (rachão não classificado), de modo a se aumentar a capacidade de suporte do solo local. Como o material inferior à camada granular estaria fora das condições ótimas de umidade e compactação, adotou-se que a camada de subleito teria uma capacidade de suporte equivalente da ordem de 25 MPa, apresentando uma deflexão (deslocamento vertical da superfície de uma camada do pavimento em função da aplicação de uma carga) medida com Viga *Benkelman* (DNER-ME 024, 1994) da ordem de $320 \cdot 10^{-2}$ mm. Esse valor deveria ser validado em campo e, caso o subleito apresentasse deflexão superior ao limite, o material deveria ser escavado, escarificado e recompactado, até atingir o valor admissível.

3.6.2.3 Dimensionamento da estrutura do pavimento

Uma vez determinados os parâmetros de tráfego (Número N) e de suporte do subleito, foi feito o dimensionamento da estrutura original (inicialmente sem a camada de mistura asfáltica reciclada) pelo critério mecanicista, verificando a deformação atuante na fibra inferior do CA, a deformação vertical de compressão no subleito, além do deslocamento vertical no topo do revestimento. Deste modo, foi determinada a estrutura de pavimento apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Estrutura original para implantação das faixas adicionais

concreto asfáltico faixa III DER/SP	7,5 cm
Brita graduada simples	15 cm
Macadame seco	40 cm
Rachão não classificado	40 cm
Melhoria e preparo do subleito	20 cm

Fonte: Projeto de Implantação, Canhedo Beppu, 2017.

A partir da estrutura inicialmente proposta pela projetista (Figura 31), foi estudada uma estrutura alternativa de pavimento, visando incluir a camada de mistura asfáltica reciclada a frio desta pesquisa.

Buscou-se uma concepção em que se pudesse usar o RAP estocado em uma camada de mistura asfáltica reciclada, bem como optou-se por substituir totalmente a camada de rachão não classificado por uma camada de resíduo de construção e demolição, de origem 100% de concreto e com granulometria equivalente ao de um macadame seco (MS), a ser adquirido comercialmente na região.

Na ausência de modelos de fadiga específicos e consagrados para as misturas asfálticas recicladas a frio, optou-se por compatibilizar a estrutura original com a alternativa através da equivalência estrutural entre as soluções, segundo o método empírico da AASHTO de 1993. A utilização de tal método é sugerida como a mais indicada, até o momento, pela 2ª edição do manual de reciclagem da ARRA (2015).

Assim, para a realização do dimensionamento da estrutura do pavimento, buscou-se atender, simultaneamente, a dois critérios: (i) o método propriamente dito, em função do suporte do subleito e do Número N de projeto; e (ii) a manutenção, no mínimo, do mesmo número estrutural da solução original, de modo que ambas soluções fossem equivalentes, em relação ao número estrutural SN (em inglês, *structural number*).

Para o dimensionamento do pavimento das faixas adicionais, adotou-se os seguintes parâmetros:

- PSI_0 (índice de serventia inicial): 4,5
- PSI_t (índice de serventia terminal): 2,5
- M_R (módulo de resiliência efetivo do subleito): 55 MPa (7.823 psi)
- Z_R : (grau de confiança): -0,67 (referente a confiabilidade de 75%, adotada por se tratar faixa de tráfego predominantemente de veículos leves)
- S_0 (desvio padrão): 0,40 (valor típico recomendado para pavimentos flexíveis)

Desta maneira, buscou-se os materiais de pavimento e respectivas espessuras que permitissem obter um SN que levasse a um W_{18}^5 que fosse maior ou igual ao Número N de projeto. Assim, para determinar o SN do pavimento, os coeficientes adotados para essa equivalência foram:

- Concreto asfáltico: coeficiente estrutural padrão para misturas asfálticas = 0,44
- Mistura asfáltica reciclada a frio com agente de reciclagem: segundo o manual de pavimentação vigente (DNIT, 2006), o coeficiente estrutural de um concreto asfáltico é definido como 2, enquanto o de um pré-misturado a frio é de 1,4, resultando em uma equivalência de 70% em relação ao concreto asfáltico. Mantendo-se a proporção nos coeficientes estruturais da AASHTO (1993), foi considerado o valor de 0,31 para a mistura reciclada. Importante ressaltar que o valor de coeficiente estrutural adotado para a mistura asfáltica reciclada de 0,31 está dentro da faixa recomendada pela ARRA (2015), que é de 0,30 a 0,35.
- BGS: coeficiente estrutural de 0,14, valor preconizado pela AASHTO (1993) para bases granulares.
- MS: coeficiente estrutural de 0,11, valor usual para sub-bases granulares

Deste modo, primeiramente, determinou-se o SN da estrutura de pavimento original, a ser comparado com o SN do pavimento com a camada reciclada. Como a camada

⁵ W_{18} : número de repetições de carga de um eixo padrão de 8,2 t que um pavimento suporta - Método da AASHTO (1993)

de RCD substituiu a de CFT, de modo a se obter um módulo de resiliência equivalente de 55 MPa na infraestrutura do pavimento, essa camada de RCD não foi considerada parte do cálculo do SN, cujos resultados constam na Tabela 14.

Tabela 14 – Cálculo do SN do pavimento original (do projeto)

Camada	Espessura		a	MR		SN _{acumulado}
	cm	pol		kgf/cm ²	psi	
Concreto asfáltico	7,50	2,95	0,44	3.500	497.805	1,3
Brita graduada simples	15,00	5,91	0,14	250	35.558	2,1
Macadame seco	40,00	15,75	0,11	150	21.335	3,8
Subleito	-	-	-	55	7.823	-

a: coeficiente estrutural da camada

Portanto, a estrutura alternativa de pavimento precisou, além de atender ao método da AASHTO (1993) propriamente dito, possuir SN igual ou superior a 3,8. Com base nisso, uma estrutura que atende simultaneamente o número estrutural da solução convencional e o dimensionamento pelo método da AASHTO (1993) é apresentada na Tabela 15. Cabe mencionar que foi utilizado 2.000 MPa como MR da camada de mistura asfáltica reciclada a frio para o dimensionamento, valor que provavelmente conseguiria ser alcançado posteriormente em serviço, após completar o processo de cura.

Tabela 15 – Dimensionamento da estrutura alternativa pelo método da AASHTO (1993)

Camada	Espessura		a	MR		SN _{acumulado}	W ₁₈	W ₁₈ > N
	cm	pol		MPa	psi			
Concreto asfáltico	5,00	1,97	0,44	3.500	497.805	0,9	4,4 E+06	SIM
Mistura reciclada a frio	15,00	5,91	0,31	2.000	284.460	2,7	1,0 E+07	SIM
Brita graduada simples	20,00	7,87	0,14	200	28.446	3,8	4,8 E+06	SIM
Subleito	-	-	-	55	7.823	-	-	-

Uma vez atendendo simultaneamente o número estrutural e método de dimensionamento, a estrutura obtida foi detalhada e incorporada ao projeto de implantação. Além disso, com o objetivo de melhorar a aderência e apagar a

sinalização horizontal existente para a adequação da nova sinalização com a inclusão da nova faixa, foi adicionada uma camada de 1,2 cm de microrrevestimento asfáltico a frio em toda a plataforma. A estrutura final de pavimento pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 – Estrutura final de implantação das faixas adicionais internas

microrrevestimento asfáltico a frio	1,2 cm
concreto asfáltico faixa III DER/SP	5,0 cm
mistura asfáltica reciclada a frio (execução em duas camadas)	15 cm
brita graduada simples	20 cm
resíduo de construção e demolição de concreto (execução em duas camadas de 20 cm cada)	40 cm
melhoria e preparo do subleito	20 cm

Visando minimizar o acúmulo de água no interior da estrutura e um dano precoce do pavimento, foi prevista a execução de um dreno longitudinal ao longo de toda a faixa adicional. As seções tipo podem ser observadas na Figura 33 e na Figura 34.

Figura 33 – Seção tipo da estrutura de implantação das faixas adicionais: declividade voltada ao canteiro central

Fonte: Projeto de Implantação, Canhedo Beppu, 2017.

Figura 34 – Seção tipo da estrutura implantação das faixas adicionais: declividade voltada à pista existente (superelevação)

Fonte: Projeto de Implantação, Canhedo Beppu, 2017.

3.7 USINAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA

Para a realização da usinagem da mistura reciclada foi empregada uma recicladora na forma de usina móvel de reciclagem a frio *in situ*, modelo RT-500 ROADTEC. A recicladora possui uma usina dotada de uma unidade de peneiramento e destorroamento, permitindo a utilização de até 100% de RAP e podendo limitar o diâmetro máximo de RAP em 31 mm, conforme preconizado pelo manual de reciclagem da ARRA (2015). O misturador é do tipo *pugmill*, de duplo eixo horizontal, com 3,2 m de comprimento, que permite a homogeneização e o recobrimento do material fresado, mesmo com baixos teores de agente de reciclagem emulsionado. A injeção de agente de reciclagem emulsionado é realizada por dispositivos eletrônicos, que fazem a pesagem dinâmica do RAP na correia transportadora e regulam a taxa de injeção de emulsão. A recicladora pode ser observada na Figura 35.

Figura 35 – Recicladora a frio RT-500 da ROADTEC

Fonte: Autor, 2017.

É importante frisar que se trata de uma recicladora desenvolvida para reciclagem a frio *in situ*, para trabalhar em comboio. Uma fresadora de pavimentos lidera a comboio, realizando a fresagem do pavimento a ser reciclado. A partir daí, o material é lançado diretamente na usina, onde é feito o destorroamento e a usinagem. Na sequência, o material usinado é lançado diretamente em uma vibroacabadora, para distribuir o material na pista na espessura correta e proceder com a compactação. Para melhor entendimento do funcionamento da usina, um desenho esquemático da usina pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 – Desenho esquemático do funcionamento recicladora usada nesta pesquisa

Fonte: Adaptado Catálogo ROADTEC (2018)

A adaptação e configuração para uma usina estacionária (como foi empregada nesta pesquisa) é prevista tanto no site do fabricante, quanto no Manual de Reciclagem da ARRA (2015). Para realizar essa adaptação, é necessário acoplar um silo frio, juntamente com uma correia transportadora, para alimentar a usina de forma contínua, simulando a alimentação por uma fresadora. Essa adaptação pode ser observada na Figura 37, onde tem-se o detalhe da adaptação com incorporação de um silo frio e uma correia transportadora no canto superior direito da imagem.

Figura 37 – Configuração da RT-500 como uma usina estacionária

Fonte: Catálogo ROADTEC (2018)

Após a usinagem da mistura, essa é depositada no local para posteriormente ser transportada até obra, onde será lançada e espalhada por uma vibroacabadora e, por fim, compactada.

Uma das dificuldades encontradas nesta pesquisa, durante a usinagem da mistura reciclada, foi o controle da taxa de injeção de emulsão no misturador. Como mencionado, para configurar o equipamento para uma usina estacionária, é necessário o acoplamento de um silo frio com uma correia transportadora. Como essa adaptação não estava disponível no momento da usinagem, a alimentação da usina foi realizada com uma pá carregadeira, diretamente na correia que levava material para o britador, como pode ser observado na Figura 38. Como o processo não ocorreu por alimentação contínua, mas sim por batelada, o sistema eletrônico de controle de emulsão não funcionou, dificultando o controle da taxa de emulsão. Neste caso, a saída encontrada foi controlar, sistematicamente, o teor total de CAP, antes e depois

da usinagem, tentando manter a diferença entre eles dentro do estipulado no projeto de dosagem.

Figura 38 – Alimentação da usina utilizada da nesta pesquisa com pá carregadeira

Fonte: Autor, 2017.

3.7.1 Usinagem da mistura reciclada a frio - trecho experimental 1

Para a obra do trecho experimental 1 não se justificou o deslocamento da usina da empresa proprietária desta, em Paulínia-SP, para a Cidade de Barueri-SP (local da obra), distante cerca de 120 km. Adicionalmente, também contribuiu para esta decisão o fato do RAP a ser utilizado estar depositado em Campinas-SP, a 20 km do local de usinagem.

À exceção do problema já relatado, quanto à dificuldade em ajustar o teor em usina devido à falta de alimentação contínua de RAP, a usinagem transcorreu sem problemas. Como o principal objetivo no caso deste trecho 1 era identificar problemas logísticos e de aplicação do material por parte da concessionária, não foram realizados maiores controles tecnológicos, nem na mistura, nem na aplicação. O aspecto da mistura reciclada a frio pode ser observado na Figura 39.

Figura 39 – Aspecto da mistura reciclada a frio com agente de reciclagem utilizando RAP do estoque 1

Fonte: Autor, 2017.

3.7.2 Usinagem da mistura reciclada a frio - trecho experimental 2

A usinagem da mistura reciclada a frio para execução das faixas adicionais do trecho experimental 2 ocorreu entre 15 e 30/01/2018. A usina foi implantada dentro do estoque 2. Nesta obra previa-se que o material usinado permaneceria estocado e coberto, sendo levado ao local de aplicação na medida em que fosse sendo utilizado. A usina já instalada no canteiro pode ser observada na Figura 40 e na Figura 41.

Figura 40 – Vista aérea da usina de reciclagem a frio mobilizada para a obra do trecho 2

Fonte: Cedido por Maximiliano Lucas, 2018.

Figura 41 – Detalhe da usina de reciclagem a frio mobilizada para a obra do trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

A necessidade de estocagem do material se deu por dificuldades operacionais de se trabalhar com duas empresas diferentes em uma mesma obra (a empresa responsável pela usinagem e a responsável pela execução), aliado ao tempo curto para executá-la. Caso a usinagem pudesse ser feita em tempo real em relação à aplicação, qualquer parada que viesse a ocorrer na usina, por exemplo, por quebra de equipamento ou por dificuldades em se ajustar o teor de agente de reciclagem (como visto anteriormente), poderia haver comprometimento do andamento da obra.

A usinagem prévia da mistura reciclada, com posterior estocagem, resolveu um problema logístico de obra, porém acabou gerando questionamentos quanto ao prazo máximo de estocagem e à eventual perda nas propriedades mecânicas da mistura que essa estocagem poderia causar. De fato, esta questão entrou em pauta quando houve real atraso na obra e o material teve que ficar mais de 4 meses estocado. Neste caso, houve dúvida se o comportamento da mistura poderia ficar comprometido, o que levou a um estudo laboratorial sobre esta questão do tempo de estocagem, conforme será detalhado no item 3.7.4. Entretanto, ciente das deficiências que a estocagem do material por tanto tempo porventura pudesse acarretar, procurou-se minimizar futuros problemas, cobrindo a mistura usinada estocada, evitando o contato direto com o sol e a lavagem da emulsão em caso de chuva.

O controle tecnológico, tanto do RAP quanto da mistura asfáltica usinada, foi realizado por laboratório móvel da empresa executora da usinagem, onde duas vezes ao dia era controlado de teores de CAP no RAP e na mistura. Assim como no caso do trecho experimental 1, a alimentação da usina também foi conduzida com pá carregadeira, sendo desativado o controle automatizado de taxa de aplicação de emulsão no misturador.

3.7.3 Massa específica e grau de compactação

Quando uma mistura reciclada é considerada uma mistura asfáltica, e não uma mistura estabilizada, recomenda-se que seja realizada dosagem pela metodologia SUPERPAVE (AASHTO R35-12) ou Marshall (DNER-ME 043/95). O manual da ARRA (2015), inclusive, orienta que as amostras sejam compactadas com 30 giros no compactador giratório a 25°C quando na ocasião da dosagem SUPERPAVE. Já quando compactada na metodologia Marshall, a recomendação é de 75 golpes em ambas as faces. O esperado é que a mistura apresente massa específica aparente equivalente quando compactado com 75 golpes no compactador Marshall ou 30 giros no giratório.

Todavia, considerando como uma mistura estabilizada, têm-se adotada o método de compactação do *Proctor* modificada (DNIT-ME 172/2016) como a mais adequada, em função do comportamento de BSM da mistura. Não havendo experiência prévia das misturas recicladas em estudo foi realizado um estudo visando determinar a influência, em termos de massa específica aparente, energia e equipamento de compactação.

Para a determinação da massa específica em laboratório nas duas metodologias de compactação foi coletada a mistura reciclada no estoque 2, sendo em seguida transportada para o CPR. Foram moldados corpos de prova (CPs) em cada metodologia/energia, todos a 25°C, e assim identificados:

- 3 CPs na energia *Proctor* modificada (PM) - 150 mm de diâmetro
- 6 CPs no compactador Marshall, sendo:
 - 3 CPs compactados com 50 golpes por face (M50)
 - 3 CPs compactados com 75 golpes por face (M75)
- 9 CPs no compactador giratório SUPERPAVE - 100 mm de diâmetro, sendo:
 - 3 CPs com 50 giros (G50)
 - 3 CPs com 75 giros (G75)
 - 3 CPs com 100 giros (G100)

Para a determinação da massa específica máxima da mistura, isto é, caso ela fosse compactada até obter a densificação máxima com 0% de vazios preenchidos com ar, foi utilizado o Rice Test (AASHTO T-209, 2012). Adicionalmente, foi determinado a massa específico máximo dos agregados, após a extração do ligante. Já a massa específica aparente da mistura compactada foi obtido segundo a AASHTO T-166 (2016). Para a medição do peso imerso, em função do alto volume de vazios, os CPs foram envolvidos em plástico filme (alternativamente ao uso de parafina), impedindo que absorvessem grande quantidade de água.

O ensaio Rice foi realizado na mistura coletada no dia 02/03/2018 e indicou massa específica máxima de 2,453 g/cm³ para a mistura e de 2,697 g/cm³ para os agregados. Os resultados obtidos foram próximos aos feitos em outras datas por ocasião do controle tecnológico (Tabela 16).

Tabela 16 – Massa específica máxima da mistura e do agregado (Rice Test)

Data de Coleta	Massa específica máxima da mistura (g/cm³)	Massa específica máxima dos agregados (g/cm³)
16/01/2018	2,451	2,696
22/01/2018	2,462	2,699
29/01/2018	2,483	2,698
09/02/2018	2,473	2,699
02/03/2018	2,453	2,697
Média	2,464	2,698
CV	0,55%	0,05%

CV: coeficiente de variação

O volume de vazios (V_v) foi calculado em relação à massa específica máxima da mistura do dia 02/03/2018. Importante frisar que para o ensaio com a energia *Proctor* modificada não foi realizada a curva de compactação em função da umidade, uma vez que tentou-se simular como ocorreria a compactação com o material no estado em que se encontrava vindo de campo. Os resultados de massa específica e volume de vazios são apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Massa específica aparente seca e volume de vazios em função da metodologia e da energia de compactação para a mistura reciclada usada no trecho 2 desta pesquisa

ρ: massa específica aparente seca (g/cm³)

Como pode ser observado na Figura 42, o material em estudo pôde ser mais densificado no compactador Marshall e no compactador giratório do que no Proctor modificado, que apresentou volume de vazios significativamente mais alto, na casa do 30%. De fato, o manual de reciclagem da ARRA (2015) recomenda a compactação de 75 golpes no compactador Marshall ou 30 giros no giratório.

3.7.4 Influência dos tempos de estocagem e cura em ensaios de comportamento mecânico

O ganho de resistência à tração na compressão diametral (RTCD) e de módulo de resiliência (MR) pelo processo de cura da mistura é uma característica conhecida em misturas recicladas a frio, como apresentado na revisão bibliográfica (DAVID, 2006;

SILVA, 2011; ANDRADE, 2017; MOLLENHAUER *et al.*,2016). Esse efeito poderia estar associado não apenas à cura, visto que, muitas vezes, essas misturas são usinas com a incorporação de fíler ativo, como a cal ou cimento *Portland*, além do agente de reciclagem ou da emulsão asfáltica. A incorporação de estabilizadores hidráulicos, mesmo em pequenos teores, pode aumentar os valores daqueles parâmetros de comportamento mecânico da mistura (MR e RTCD), contribuindo com os ganhos obtidos. As misturas produzidas nesta pesquisa foram dosadas com a incorporação, somente, de agente de reciclagem emulsionado.

Conforme mencionado, em função das particularidades logísticas da obra de implantação das faixas adicionais neste trabalho, verificou-se a necessidade de se compreender melhor o efeito causado pela estocagem da mistura reciclada a frio, após a compactação e início de processo de cura.

Para avaliar o efeito da estocagem e da cura, no MR e na RT das misturas recicladas a frio, as amostras foram compactadas em dias específicos após a coleta: 7, 14 e 28 dias, simulando o material estocado por até um mês. De forma análoga, os ensaios de comportamento mecânico (RTCD e MR) foram realizados em períodos determinados após a compactação, simulando o período de cura da mistura (1, 3, 7, 14 e 28 dias).

Foram moldados seis corpos de prova para cada período, sendo 3 compactados no compactador Marshall, com 75 golpes por face e três no compactador giratório do SUPERPAVE com 50 giros, visando simular qual o ganho que esse material teria caso conseguisse ser aplicada uma energia de compactação maior. Para a realização dos ensaios, foi elaborada a matriz experimental apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Matriz experimental: avaliação do tempo de estocagem e cura

Tempo de cura entre compactação e ensaios (dias)	Tempo de estocagem: entre usinagem e compactação (dias)		
	7	14	28
1	M-7-1 (CP 1)	M-14-1 (CP 2)	M-28-1 (CP 3)
	G-7-1 (CP 22)	G-14-1 (CP 23)	G-28-1 (CP 24)
3	M-7-3 (CP 4)	M-14-3 (CP 5)	M-28-3 (CP 6)
	G-7-3 (CP 25)	G-14-3 (CP 26)	G-28-3 (CP 27)
7	M-7-7 (CP 7)	M-14-7 (CP 8)	M-28-7 (CP 9)
	G-7-7 (CP 28)	G-14-7 (CP 29)	G-28-7 (CP 30)
28	M-7-28 (CP 10)	M-14-28 (CP 11)	M-28-28 (CP 12)
	G-7-28 (CP 31)	G-14-28 (CP 32)	G-28-28 (CP 33)
56	M-7-56 (CP 13)	M-14-56 (CP 14)	M-28-56 (CP 15)
	G-7-56 (CP 34)	G-14-56 (CP 35)	G-28-56 (CP 36)

Após a compactação, cada corpo de prova permaneceu por 72 h em estufa ventilada a 60°C, de modo que fosse possível acelerar o período de cura inicial e permitir a extração do CP do cilindro de compactação do ensaio *Marshall* (exceto para os CPs ensaiados com 1 dia de cura, os quais permaneceram 24 h em estufa). O procedimento de cura escolhido foi o preconizado por WIRTGEN (2012) e utilizado por Silva (2011).

Os ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência, ambos por compressão diametral, foram realizados a 25°C, seguindo as normas DNIT 136/2010 e NBR 16018 (2011), respectivamente. Para o cálculo do MR, foi obtida a média de cinco aplicações de carga do tipo *haversine* de 0,1 s, seguido por um repouso de 0,9 s. Já para a determinação da resistência à tração, o CP foi ensaiado até a ruptura com taxa de deformação constante de 0,8 mm/s. Os ensaios foram realizados em uma prensa UTM (*Universal Testing Machine*), com capacidade aplicação de carga de até 25 kN, ilustrada na Figura 43.

Figura 43 – Prensa UTM utilizada para ensaios de MR e RT da mistura reciclada desta pesquisa

Fonte: Autor, 2018.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR) são apresentados na Figura 44 e na Figura 45, e de resistência à tração por compressão diametral na Figura 46 e na Figura 47.

Figura 44 – Evolução do módulo de resiliência com a cura e o tempo de estocagem - CPs Marshall 75 golpes

**Figura 45 – Evolução do módulo de resiliência com a cura e o tempo de estocagem - CPs
SUPERPAVE 50 giros**

**Figura 46 – Evolução da resistência à tração com a cura e o tempo de estocagem– CPs
Marshall 75 golpes**

Figura 47 – Evolução da resistência à tração com a cura e o tempo de estocagem – CPs SUPERPAVE 50 giros

Com base nos valores apresentados, é notável o ganho de rigidez (MR) e de resistência à tração das misturas estudadas com a cura. Após os 3 dias de cura, praticamente todas os CPs atingiram os valores mínimos especificados, corroborando o fato de que a estocagem do material não prejudicou o comportamento das misturas recicladas.

Observou-se ainda que os valores de RT foram sempre crescentes, independentemente do tipo de compactação e que, o MR apresentou maior dispersão, sobretudo aos 3 dias de cura, momento em que ocorreu a transição entre a cura térmica e a cura em temperatura ambiente.

Finalmente, é possível aferir que o compactador SUPERPAVE produziu CPs mais coesos, de maior massa específica, o que refletiu em valores superiores, tanto de MR quanto de RT, em relação aos CPs Marshall.

Para fins de comparação também foram realizados ensaios de RT e MT com a mistura reciclada com RAP do estoque 1. Essa mistura permaneceu estocada por 120 dias, sendo então moldados e testados depois de 1, 2, 7, 28 e 56 dias no caso da compactação Marshall, e depois de 7, 28 e 56 dias após a compactação SUPERPAVE. A compactação Marshall foi realizada com 75 golpes por face e o compactador giratório SUPERPAVE, com 50 giros em CPs de 100 mm de diâmetro. Foram moldados 3 corpos de prova para cada condição tempo de cura x método de

compactação. Adicionalmente, aos 7 dias de cura, foram compactados 6 CPs no compactador giratório com 100 giros, visando aferir a sensibilidade da mistura a uma maior compactação. Os resultados destes ensaios são apresentados na Figura 48 e na Figura 49.

Figura 48 – Evolução do MR com 120 dias de estocagem e o tempo de cura variável com o RAP do estoque 1

Figura 49 – Evolução da RTCD com 120 dias de estocagem e o tempo de cura variável com o RAP do estoque 1

Mesmo em uma situação limite, com a mistura asfáltica reciclada estocada por 120 dias, foi possível observar a evolução da RT e do MR na medida em que ocorria a cura após a compactação da mistura. Além disso, os valores de RT obtidos após 56 dias de cura, são maiores que o dobro da resistência mínima prevista na especificação, o que demonstra um ganho substancial de resistência à tração do material após a cura.

Quanto aos CPs compactados com 100 giros, o ganho, tanto de rigidez, quanto de resistência à tração é surpreendente. A RTCD aumentou quase 2,5 vezes, quando comparado com os CPs compactados com 50 giros, ganho esse causado pela maior compactação e, seguramente, pela maior interação entre o ligante residual e o agente de reciclagem. Nesse caso em particular, foram moldados 6 CPs para avaliar o ganho de rigidez e resistência com esta energia de compactação.

Sempre foram moldados 3 corpos de prova para cada configuração tempo de estocagem x tempo de cura, todavia, alguns corpos de prova não apresentaram coesão em curtos período de cura, 1 e 3 dias, o que inviabilizou os ensaios nesses CPs.

Apesar de não conseguir medir as propriedades nesse curto período em todos os CPs, tal dificuldade constatada foi de extrema importância para concluir que os ensaios devem ser sempre realizados após um período mínimo de cura. Pelos resultados obtidos, pôde-se chegar à conclusão que 28 dias é um tempo necessário e suficiente, para se estimar os valores que as misturas atingirão ao longo do tempo. Apesar de não ser os valores finais em serviço, os ensaios a 7 dias de cura podem ser um bom parâmetro para se comparar os valores obtidos com as especificações vigentes.

3.7.5 Dano por umidade induzida

Também foi avaliado o Dano por Umidade Induzida (DUI) nas misturas recicladas a frio. O DUI foi realizado seguindo o preconizado pela norma ASTM D-4867 e visa determinar a perda de resistência do material em função do acúmulo de água no interior da mistura, simulado no ensaio através de ciclos de imersão em água.

O DUI é determinado pela relação de resistência a tração, na compressão diametral, entre os CPs ensaiado sob condições de umidade e sob condições ideais. Quando mais próximo essa relação for de 100%, significa uma maior resistência à umidade.

O ensaio foi realizado e padronizado para um tempo de cura de 7 dias (3 dias em cura térmica a 60°C e 4 dias de cura em temperatura ambiente) para os corpos de prova, em três condições de estocagem diferentes, e com os dois métodos de compactação já utilizados para determinação da RTCD e do MR.

Os valores obtidos de DUI estão apresentados nas Figura 50 e Figura 51. A linha vermelha tracejada corresponde ao valor mínimo de DUI recomendado pelo manual de reciclagem da ARRA (2015), no valor de 70%.

Figura 50 – DUI aos 7 dias de cura em corpos prova SUPERPAVE

Figura 51 – DUI aos 7 dias de cura em corpos prova Marshall

Como pode ser observado, em nenhum dos casos foi possível obter o valor mínimo da especificação, nem ao menos considerando o desvio padrão, mostrando ser uma mistura bem suscetível a umidade.

Uma das possíveis razões pode estar associada a ausência de fíler ativo, em especial a cal, na dosagem da mistura. A opção pela não incorporação da cal, em valores típicos entre 1% e 2% em peso, foi em função da necessidade de estocagem do material e para não mascarar os ganhos de rigidez e resistência da mistura. Em ensaios apresentados pelo fornecedor da emulsão, o valor do DUI superava o valor mínimo especificado, razão pela qual optou-se em não incorporar a cal durante a usinagem da mistura. Essa não incorporação pode ter acarretado nessa deficiência de resistência à umidade.

3.8 IMPLANTAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Como mencionado, foram implantados dois trechos experimentais, o primeiro constituiu de uma fresagem e recomposição no km 32 da SP-280 no fim do ano de 2017 e segundo foram construídas duas faixas adicionais, no primeiro semestre de 2018, nos km 44 e km 50 da SP-280 - Pista Leste. O detalhamento da obra de cada trecho é apresentado a seguir.

3.8.1 Trecho experimental 1 - Construção

Em outubro de 2017 foi realizada a fresagem contínua de 80 m de extensão por 3,6 m de largura, da faixa 3 da SP-280 Pista Leste, sentido São Paulo. Após a execução da fresagem do pavimento deteriorado, na espessura contínua de 24 cm ao longo de toda a extensão do segmento a ser restaurado, foi feita a limpeza do fundo da caixa com vassoura mecânica e ar comprimido. Foi observado que o fundo da caixa era constituído somente por concreto asfáltico. Deste modo, a espessura de CA era superior aos 24 cm observados na sondagem, conforme citado.

O concreto asfáltico remanescente encontrava-se íntegro, não sendo observada a ocorrência de trincas severas ou deslocamentos (solas) no fundo da caixa. Pelo tempo disponível para a execução da obra (aproximadamente 9 h), não foi possível a

realização de controle deflectométrico no fundo da caixa de fresagem. O detalhe da abertura da caixa pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 – Aspecto da caixa de fresagem na espessura de 24 cm do trecho 1 desta pesquisa

Fonte: Autor, 2017.

A primeira camada de mistura reciclada a frio foi aplicada com vibroacabadora, na espessura de 9 cm, esperando-se obter espessura final da ordem de 7 cm após compactação. Esta foi realizada da seguinte forma: uma passada de rolo duplo tandem para regularização da mistura (Figura 53), 8 passadas de rolo de pneus para compactação (Figura 54), e finalizado com mais uma passada de rolo duplo tandem.

Também em virtude do tempo escasso para execução da obra, não foi possível realizar o controle da compactação, sendo o número de passadas definido em função da experiência da empresa executora. A eficiência de compactação não foi avaliada aqui, mas sim no segundo trecho experimental, relatado mais adiante.

Figura 53 – Regularização da superfície da mistura reciclada com rolo duplo tandem – trecho 1

Fonte: Autor, 2017.

Figura 54 – Compactação com rolo de pneus da mistura reciclada – trecho 1

Fonte: Autor, 2017.

Após a conclusão da primeira camada de mistura reciclada a frio, foi realizada uma pintura de ligação com emulsão do tipo RR-2C e executada a segunda camada, com procedimento igual à da primeira, totalizando uma espessura compactada de 14 cm de mistura reciclada a frio.

Na sequência, foram executadas duas camadas de concreto asfáltico usinado a quente, de 5 cm cada, concluindo-se, assim, o fechamento da caixa. Cabe mencionar

que não foi executado, nesse primeiro momento, o dreno de pavimento previsto em projeto. O reparo concluído é apresentado na Figura 55.

Figura 55 – Conclusão da fresagem e recomposição do trecho 1 desta pesquisa

Fonte: Autor, 2017.

3.8.2 Trecho experimental 2 - Construção

Após a experiência obtida com o trecho experimental 1, iniciou-se o planejamento para a obra de implantação das duas faixas adicionais internas na Pista Leste da SP-280, precisamente entre os km 44+060 e 45+960 e entre os km do 50+070 ao 52+780.

A primeira faixa executada foi a localizada no km 50. A implantação se iniciou em dezembro de 2017, com os serviços de limpeza e abertura da caixa no pavimento, sendo a obra concluída em março de 2018. Já a segunda faixa adicional, teve início em abril de 2018, sendo concluída em junho do mesmo ano. Em ambas, o método construtivo foi o mesmo.

O reforço do subleito da faixa adicional do km 50 foi inteiramente implantado com RCD, conforme previsto em projeto. Todavia, na segunda faixa a ser implantada, do km 44, foi realizado um estudo complementar com o uso de escória de aciaria em substituição às camadas de RCD e de BGS, de acordo com o retigráfico apresentado na Figura 56. Em função disso, no caso da faixa adicional do km 44 há uma análise

por segmento, de modo a verificar a influência no comportamento da estrutura devido à mudança dos materiais do reforço do subleito e da sub-base.

Figura 56 – Variação dos materiais de reforço do subleito e de sub-base na implantação da faixa adicional do km 44 – trecho 2 desta pesquisa

	45,960	44,960	44,660	44,360	44,060
	1,000 m	0,300 m	0,300 m	0,300 m	
Sub-base	BGS convencional	50% escória de aciaria + 50% RCD	BGS convencional	BGS convencional	
Reforço do subleito	RCD de concreto	RCD de concreto	Escória de aciaria	MS convencional	
	SH 1	SH 2	SH 3	SH 4	

3.8.2.1 Melhoria e preparo do subleito

Para a melhoria do subleito, este foi gradeado, homogeneizado e compactado na energia Proctor normal, na espessura de 20 cm.

Para permitir a saída de água de dentro da estrutura do pavimento, foi garantida uma declividade transversal de, no mínimo, 1% no sentido canteiro central, independentemente da declividade da pista. A diferença entre a declividade no topo da camada de subleito e da pista foi corrigida na camada granular subsequente, de reforço do subleito. A execução da camada de regularização do subleito pode ser observada na Figura 57.

Figura 57 – Homogeneização e estabilização do subleito do trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Na sequência, iniciou-se a execução do dreno subsuperficial de pavimento ao longo de toda a extensão da implantação das duas faixas (Figura 58). O dreno de pavimento se mostrou de suma importância em virtude dos problemas constatados no primeiro trecho experimental, sendo a sua execução não negligenciada, tanto no projeto, quanto no decorrer da obra.

Figura 58 – Execução do dreno de pavimento na implantação do trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

3.8.2.2 Reforço de subleito

Concluída a regularização do subleito e a implantação do dreno de pavimento, iniciou-se a execução da camada de reforço de subleito na espessura de 40 cm, lançada e compactada em duas camadas. A camada de reforço do subleito foi realizada, em sua grande parte, com RCD (adquirido da empresa produtora de concreto Polimix, localizada na cidade de Barueri-SP). Neste caso, o RCD foi gerado pela britagem de sobras de concreto produzido pela própria empresa, além de estruturas demolidas recebidas por ela. Nesta atividade foi utilizado um britador de mandíbula, ilustrado na Figura 59, com sistema de peneiramento e classificação do resíduo em duas granulometrias.

Figura 59 – Vista da usina beneficiadora de RCD utilizada no trecho 2 desta pesquisa

Fonte: Autor, 2017.

No sistema de peneiramento, o RCD britado foi classificado em duas granulometrias, uma mais graúda, com granulometria se aproximando da faixa do macadame seco do DER/SP (ET-DE-P00/011), ilustrada na Figura 60, e uma granulometria mais fina, próxima a uma bica corrida (ET-DE-P00/010) apresentada na Figura 61. Importante ressaltar que, ao menos visualmente, a pilha de RCD classificada como “bica corrida” apresentava um teor muito grande de pó, aparentemente superior aos 20% especificados para a bica corrida.

Figura 60 – RCD graúdo na usina beneficiadora, usado no trecho 2

Fonte: Autor, 2017.

Figura 61 – RCD de granulometria fina na usina beneficiadora, usado no trecho 2

Fonte: Autor, 2017.

Para a execução da camada de reforço do subleito, a empresa realizou uma composição dos dois materiais disponíveis, visando o enquadramento na faixa granulométrica de projeto. A definição da faixa para o RCD foi em função de diversas experiências em 2017 do Grupo CCR com o material e que permitiram a elaboração de uma especificação interna no início de 2018, sendo essa a primeira obra a adotá-

la. A faixa granulométrica especificadas, assim como as curvas granulométricas do controle tecnológico do RCD encontram-se na Figura 62.

Figura 62 – Faixa de projeto e curva granulométrica do RCD de concreto para execução do reforço do subleito do trecho 2

Como o RCD aplicado apresentou granulometria contínua, foi possível realizar o lançamento e compactação do material em etapa única, sem a necessidade de se lançar primeiramente o material graúdo para, na sequência, lançar o material de enchimento, como em uma camada de macadame seco convencional. A camada foi compactada com rolo pé de carneiro, em duas camadas de 20 cm, como pode ser observado na Figura 63.

Figura 63 – Compactação da camada de reforço do subleito com RCD no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Para a execução do segundo segmento do segundo trecho, foi realizada uma substituição, em um segmento de 300m, do RCD de concreto por escória de aciaria.

Foi identificado que na região existia uma planta da Gerdau de produção de aços longos, que tem como principal matéria prima sucata metálica. Nessa planta, a sucata metálica é fundida em um forno elétrico a arco, isto é, a fusão da sucata ocorre pelo aquecimento causado na passagem de uma corrente elétrica pelo material metálico em um arco fechado. Assim como em uma aciaria convencional, a fusão do aço gera um resíduo que flocula sobre o aço fundido e é denominado escória de aciaria.

Como toda escória, seja ela de aciaria ou de alto forno, existe um processo de expansão química que pode durar alguns meses, até a sua estabilização. Esse período de estabilização do material é denominado cura da escória.

Para a comercialização da escória, esta permanece estocada de 4 a 6 meses, visando estabilizar a expansão do material. O pátio de estabilização de escória pode ser observado na Figura 64. A empresa Gerdau comercializa a escória de aciaria sob o nome de agregado siderúrgico em duas granulometrias, como pode ser observado na Figura 65.

Figura 64 – Pátio de escória de aciaria da Gerdau dividido em baias por tempo de estocagem usando no trecho 2

Fonte: Cedido por Karina Suzuki, 2018.

Figura 65 – Diferença das duas granulometrias da escória de aciaria usadas no trecho 2

Fonte: Cedido por Karina Suzuki, 2018.

Esse material foi coletado e encaminhado ao CPR em Santa Isabel para ensaios de granulometria (Figura 66), e expansão, com o objetivo de caracterizar o material visando a substituição da camada de RCD.

Figura 66 – Curva granulométrica da escória de aciaria

Em função da aproximação da granulometria gráuda da escória com a faixa granulométrica do macadame seco do DER/SP Faixa I (ET-DE-P00/011), mesmo sem essa se enquadrar perfeitamente na faixa, optou-se por usar o material como camada de reforço do subleito, da forma como é comercializada, com posterior execução da camada de enchimento e travamento com bica corrida Faixa A (ET-DE-P00/010 DER/SP). A escória de granulometria mais fina foi, posteriormente, utilizada para compor uma faixa de BGS para a camada de sub-base e será descrita no item 3.8.2.3.

Para o ensaio de expansão foram moldados 3CPs compactados na energia do *Proctor* modificado. Os CPs foram saturados e mantidos submersos por 7 dias. Na sequência, mais 7 dias na condição saturada, mas não submersa. Os CPs foram mantidos durante os 14 dias de ensaio em estufa ventilada a 70°C, sendo a expansão avaliada por meio de extensômetros. Não foi observada nenhuma expansão ou retração dos CPs analisados, podendo o material ser considerado inerte, quanto à expansão.

Visando comparar os resultados obtidos com o RCD e com a escória de aciaria, foi implantado também um segmento de 300m com macadame seco convencional, pétreo, e com travamento em bica corrida Faixa A (ET-DE-P00/010 DER/SP), em procedimento similar ao adotado no segmento com escória de aciaria.

O aspecto da camada acabada de RCD pode ser observado na Figura 67 e da escória de aciaria na Figura 68. Tanto a execução da camada de RCD, quanto de escória de aciaria, foi realizada sem a ocorrência de maiores problemas, sendo uma excelente alternativa ao uso de agregados pétreos virgens, de menor impacto ambiental, menor custo e desempenho satisfatório. O estudo comparativo, entre os dois materiais em relação ao macadame seco convencional está descrito no item 3.8.3.

Figura 67 – Detalhe da camada de resíduo de construção usado no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Figura 68 – Detalhe da camada de escória de aciaria com enchimento em bica corrida

Fonte: Cedido por Flavio Ciccone, 2018.

3.8.2.3 Sub-base

A execução da camada de sub-base foi realizada com agregado pétreo, produzido a partir da britagem, peneiramento e posterior mistura, visando o enquadramento na faixa de BGS drenante da especificação do DER/SP (ET-DE-P00/008). A camada acabada pode ser observada na Figura 69.

Figura 69 – Detalhe da camada acabada de BGS do trecho 2

Fonte: Cedido por Flavio Ciccone, 2018.

Em um segmento de 300m, na faixa adicional do km 44, foi implementado um segundo teste utilizando uma mistura composta de 50% escória de granulometria fina (Figura 65) e 50% de fino de RCD (Figura 61). A composição dos dois materiais foi feita visando o enquadramento na Faixa de BGS drenante do DER/SP (ET-DE-P00/008). A mistura foi realizada em parceria com a Polimix, em uma usina de solos. A curva granulométrica obtida na composição dos dois materiais é apresentada na Figura 70.

Figura 70 – Curva granulométrica da mistura de escória de aciaria com fino de RCD usada no trecho 2

A camada mista de RCD com escória de aciaria foi compactada na energia do *Proctor* Modificado e a sua execução transcorreu sem maiores problemas. A análise comparativa do comportamento desta camada, quanto rigidez, esta detalhada no item 3.8.3.

3.8.2.4 Mistura asfáltica reciclada a frio

A execução da primeira camada de mistura reciclada a frio iniciou-se após a conclusão da camada de BGS. O material encontrava-se estocado no km 24, coberto, no local da usinagem. O lançamento foi realizado com vibroacabadora, na espessura de 10 cm na primeira camada e de 9 cm na segunda, esperando-se obter, após a compactação, espessuras de 8 cm e 7 cm respectivamente. Esses valores foram definidos com base no empolamento esperado da mistura solta da ordem de 25%. A aparência do material, após a primeira passada do rolo duplo tandem, pode ser observado na Figura 71.

Figura 71 – Execução da primeira camada de mistura reciclada a frio no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

O material aparentava um aspecto visual mais seco, com teor de umidade medida pelo método da frigideira da ordem de 4% a 5%. O uso de tal método de ensaio é pouco preciso e pode induzir a valores equivocados, podendo parte do ligante asfáltico ser perdido durante o processo, mas como um parâmetro indicativo foi considerado satisfatório.

Na sequência, iniciou-se uma etapa importante desta pesquisa: a compactação da camada e respectivo controle tecnológico. Adicionalmente, também foi realizado um controle deflectométrico, mas este foi apenas referencial, com base nos valores já observados em laboratório de ganho de rigidez e resistência à tração com o tempo. O principal controle adotado foi o controle convencional de compactação, o qual será detalhado a seguir.

Para determinar a máxima densificação possível, foram realizados diversos testes de compactação, utilizando-se diferentes patrulhas com rolos chapa do tipo duplo-tandem, rolo pé-de-carneiro e rolo de pneus, como pode ser visto na Figura 72, na Figura 73 e na Figura 74, respectivamente.

Figura 72 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo pé-de-carneiro no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Figura 73 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo duplo tandem no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Figura 74 – Compactação da mistura reciclada a frio com rolo de pneus no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

O controle de compactação foi realizado com ensaio do frasco de areia (NBR 7185; DNER 092/94), como pode ser observado na Figura 75. A compactação de referência foi aquela determinada pelo ensaio Marshall, buscando-se atingir uma massa específica em campo de $2,1\text{g/cm}^3$.

Figura 75 – Controle de compactação da mistura reciclada a frio com ensaio de frasco de areia no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Adicionalmente, foi realizado um ensaio de medida de rigidez para auxiliar a equipe de compactação a identificar quando, provavelmente, a mistura havia atingido a máxima densificação. Foi utilizado um equipamento *GeoGauge*, desenvolvido para a medição de rigidez de solos. Trata-se de um equipamento eletromecânico portátil, que permite medir rapidamente o módulo de resiliência e a rigidez *in situ* (LIMA *et al.*, 2015).

O valor de saída do equipamento não apresentou uma medição direta da compactação, tampouco uma sensibilidade para materiais muito mais rígidos que solo (para o qual foi desenvolvido), mas foi possível observar um ganho de valores a cada passada de rolo, até um momento que este estabilizava. Esse valor de estabilização, apesar de não ser conclusivo, era um indicador que havia concluído a compactação da mistura, otimizando-se as medições da massa específica com o ensaio de frasco de areia. O controle com o *GeoGauge* pode ser observado na Figura 76.

Figura 76 – Controle de compactação da camada reciclada a frio com *GeoGauge* no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Em virtude da heterogeneidade do material, a especificação da ARRA (2015) tolera um valor de grau de compactação de 95% daquela obtida em laboratório. Esta

pesquisa trabalho teve como meta atingir, pelo menos, 97% do grau de compactação nos pontos analisados. Foi possível atingir a compactação de referência em mais de 95% da extensão do segmento. A primeira camada de mistura reciclada a frio, da faixa adicional do km 50 teve a quantidade de passadas de rolo controlada de modo a se obter a melhor sequência de compactação para obtenção da massa específica de projeto e é ilustrada na Figura 77.

Figura 77 – Número de passadas de rolo de pneus, tandem e pé-de-carneiro para atingimento da massa específica dos CPs compactados segundo metodologia Marshall

Desta maneira, pode-se concluir que, para otimizar a obra e minimizar as quantidade de medições de grau de compactação, ficou estabelecido que o material deveria ser compactado, no mínimo, com duas passadas de rolo do tipo tandem e, pelo menos, 11 passadas de rolo de pneus lastreado, totalizando o peso de 25 toneladas.

O rolo pé-de-carneiro, apesar de não ter prejudicado a compactação, não demonstrou nenhum ganho expressivo em relação aos demais que justificasse a continuidade do seu uso. A sua utilização, nessa primeira camada, causou problemas de irregularidade na camada compactada. O próprio processo de descarregamento do equipamento do caminhão prancha, e o seu deslocamento para o local da obra, danificou segmentos adjacentes da camada reciclada já concluída. A sua utilização em obras de reciclagem com espuma de asfalto, na execução de BSM, se faz necessária pelo fato de as

camadas a serem compactadas apresentarem espessuras maiores e a massa específica aparente a ser atingida é inferior.

Outro aspecto importante quanto à compactação se refere a espessura da camada. Estas seriam executadas com 8 cm e 7 cm para a primeira e a segunda camada respectivamente. Todavia, em alguns pontos, em virtude de uma irregularidade das camadas granulares inferiores, as espessuras da mistura reciclada variaram de 6 até 12 cm, no pior caso. Inicialmente, estava previsto a variação das espessuras da camada, todavia, em virtude na necessidade de aprovação de projeto no órgão regulador, essa variação não foi autorizada.

Apesar de não ter sido realizada de maneira sistemática, foi possível obter uma boa correlação entre a espessura da camada e o respectivo grau de compactação. Importante frisar que esses foram os máximos valores obtidos, não sendo possível aumentar a massa específica nem com um acréscimo do número de passadas de rolo. Esse estudo é apresentado na Figura 78.

Figura 78 – Relação entre a espessura da camada de mistura reciclada a frio e o grau de compactação, em relação à compactação Marshall – trecho 2

Como pode ser observado, espessuras de até 8 cm conseguiram atingir o grau de compactação previsto em projeto. No limite do desvio padrão, atingiria o valor de 96% do grau de compactação, 1% acima do tolerado pela especificação da ARRA (2015),

sendo que as espessuras maiores tenderam ao não atingimento da massa específica aparente de projeto. Portanto, foi possível concluir que, para os tipos de rolo utilizados, 8 cm é a espessura máxima exequível. A especificação da ARRA (2015) tolera a camadas acima de 10 cm, todavia recomenda que sejam usados rolos compactadores de pneu acima de 32 toneladas, que é pouco disponível no Brasil.

3.8.2.5 *Revestimento e Microrrevestimento Asfáltico a Frio*

Após a execução das duas camadas de mistura reciclada a frio, iniciou-se o lançamento da camada de revestimento em concreto asfáltico na espessura de 5 cm. Foi utilizada uma mistura convencional, com CAP 30-45, e curva granulométrica enquadrada na Faixa III do DER/SP (ET-DE-P00/027).

Na sequência, visando garantir aderência e atender aos critérios de macro e microtextura e permitir a correção da sinalização horizontal em função da implantação da faixa adicional, foi executada uma camada de microrrevestimento asfáltico a frio, na espessura de 12 mm, seguindo a especificação técnica do DER/SP (ET-DE-P00/022). A faixa adicional do km 50, concluída, está apresentada na Figura 78.

Figura 79 – Faixa adicional do km 50 concluída e aberta ao tráfego

Fonte: Cedido por Flavio Ciccone, 2018.

3.8.3 Controle Deflectométrico e Módulo de Elasticidade das Camadas

Logo após a execução de cada camada, foi realizado o controle deflectométrico com viga *Benkelman* (DNER-ME 024/94), visando obter os deslocamentos verticais recuperáveis destas. Importante ressaltar que se encontra neste trabalho apenas os dados de controle tecnológico que foram supervisionados, minimizando a ocorrência de inconsistências. Além disso, os dados apresentados são a média dos valores medidos nas trilhas interna e externa, em cada estaca.

Por deflexão, entende-se que é o deslocamento recuperável, medido na superfície da camada, causado pela somatória das deformações específicas das camadas do pavimento, mediante a aplicação de uma carga de roda padronizada. Uma vez que a deflexão é uma medida de deslocamento, seu valor é inversamente proporcional a rigidez dos materiais que constituem o pavimento. Quanto menor o seu valor, significa que mais alta é a rigidez, em serviço, dos materiais.

Os controles deflectométricos, das faixas dos km 50 e km 44, são apresentados nas Figura 80 a Figura 91 a seguir. A faixa adicional do km 44 apresenta-se segmentada em função da variação dos materiais do reforço do subleito e da sub-base. Além disso, partindo da hipótese que as deflexões medidas seguem uma distribuição Normal, foi adotada também uma faixa de valores característicos que contemplasse 70% dos dados medidos, determinado pelo deslocamento, em relação à média, para mais e para menos, de uma vez o desvio padrão. Por fim, o resumo com os levantamentos deflectométricos é apresentado na Tabela 18.

Figura 80 – Deslocamento vertical – subleito – faixa adicional do km 50

Figura 81 – Deslocamento vertical –subleito – faixa do km 44

Figura 82 – Deslocamento vertical – reforço do subleito – faixa do km 50

Figura 83 – Deslocamento vertical – reforço subleito – faixa do km 44

Figura 84 – Deslocamento vertical – sub-base – faixa do km 50

Figura 85 – Deslocamento vertical – sub-base – faixa do km 44

Figura 86 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (1ª camada) – faixa do km 50

Figura 87 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (1ª camada) – faixa do km 44

Figura 88 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (2ª camada) – faixa do km 50

Figura 89 – Deslocamento vertical – mistura reciclada (2ª camada) – faixa do km 44

Figura 90 – Deslocamento vertical – revestimento – faixa do km 50

Figura 91 – Deslocamento vertical – revestimento – faixa do km 44

Tabela 18 – Resumo do controle deflectométrico com deflexão média por camada do trecho 2

Segmento	Deslocamento vertical médio (10 ⁻² mm) ± desvio padrão						
	Subleito	Reforço do subleito (RCD, MS ou escória)	Sub-base (BGS ou escória+RCD)	Base 1ª Camada (MARF)	Base 2ª Camada (MARF)	Revesti-mento (CA)	
50-53	258 ± 47	116 ± 14	87 ± 12	66 ± 10	58 ± 5	52 ± 5	
44-46	SH1	163 ± 43	79 ± 20	70 ± 11	40 ± 10	48 ± 8	43 ± 9
	SH2	165 ± 28	68 ± 9	75 ± 16	39 ± 6	50 ± 10	40 ± 5
	SH3	208 ± 41	100 ± 20	79 ± 10	59 ± 10	50 ± 6	40 ± 7
	SH4	203 ± 50	92 ± 11	70 ± 16	43 ± 16	51 ± 6	47 ± 7

Com base no levantamento deflectométrico, foi possível constatar que a camada de reforço de subleito reduziu em cerca de $100 \cdot 10^{-2}$ mm a deflexão em relação ao subleito, mostrando um comportamento muito satisfatório, independentemente do material utilizado (RCD, escória de aciaria com enchimento em bica corrida ou macadame seco com enchimento em bica corrida).

Quanto à camada de sub-base, a mistura de escória+RCD elevou a deflexão em relação à camada inferior, demonstrando que o material não apresentou nas condições da pesquisa rigidez equivalente ao da BGS, pelo menos no momento da aplicação. Uma hipótese desse comportamento foi que a umidade da escória, no momento da leitura, era de 8,6%, enquanto na BGS era uniforme, em torno de 5,6%. Essa maior umidade do material pode ter afetado a leitura da deflexão, aumentando o seu valor.

Em relação às camadas de mistura asfáltica reciclada, a primeira camada reduziu em torno de $30 \cdot 10^{-2}$ mm a deflexão. Como a medição foi realizada após a execução de toda a camada, houve um tempo mínimo de cura para a mistura. Importante observar também que a menor deflexão se deu justamente sobre a camada de escória de aciaria, mostrando que esta, provavelmente, estivesse já com uma rigidez maior em relação ao momento de sua execução.

Já a segunda camada de mistura reciclada, como o levantamento foi realizado imediatamente após a conclusão, para liberação da camada para execução do concreto asfáltico, não houve redução substancial, inclusive com um acréscimo de deflexão em alguns segmentos.

Por fim, a camada de revestimento reduziu a deflexão em torno de $7 \cdot 10^{-2}$. A baixa redução está associada a espessura de 5 cm da camada executada.

Ainda com base nos dados de deflexão, foi possível estimar o módulo elástico linear do subleito e das camadas granulares de base e sub-base. Essa determinação foi realizada visando calibrar o software EVERCALC, que foi utilizado para avaliar evolução da rigidez das misturas recicladas partir das bacias de deflexão, medidas com o FWD, sendo esse estudo detalhado no item 3.9.2.5.

Para estimar os valores de módulo de elasticidade do subleito e das camadas granulares, foi utilizado o software de análise elástico-linear Elsym 5. O software tem como entrada as propriedades dos materiais constituintes da estrutura do pavimento,

a espessura de cada camada e o carregamento. Como saída, o estado de tensão em pontos pré-determinados pelo usuário. Para a análise, fez-se o cálculo do deslocamento vertical no topo da camada, entre duas rodas, mesmo local da leitura com a viga *Benkelman*. Os parâmetros de entrada do software foram os listados a seguir:

- Carga aplicada: 4 cargas de 20,50 kN;
- Distribuição das cargas (configuração do eixo padrão da viga *Benkelman*):
 - Carga 1: 0,00 cm;
 - Carga 2: 28,80 cm;
 - Carga 3: 176,10 cm;
 - Carga 4: 204,90 cm;
- Pressão de inflação dos pneus: 0,56 MPa;
- Ponto de leitura do deslocamento: 14,40 cm (entre rodas de um semieixo), no topo da camada.

Primeiramente foi determinado o módulo de elasticidade do subleito, a partir das deflexões medidas neste. Para isso, foi calculada uma regressão potencial, correlacionando o deslocamento medido no topo de uma camada semi-infinita e o módulo de elasticidade equivalente desta camada. Essa correlação é apresentada na Figura 92.

Figura 92 – Correlação entre o módulo elástico linear equivalente de uma camada semi-infinita e o deslocamento recuperável calculado

Com base na correlação, a partir dos dados reais de deflexão medidos no controle tecnológico da obra, foi possível estimar os módulos de elasticidade do subleito, apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Módulo de elasticidade do subleito do trecho 2

Segmento	Deslocamento (10^{-2} mm)				Módulo de elasticidade (MPa)		
	Média	σ	Média + σ	Média - σ	Mínimo caract.	Médio	Máximo caract.
50-53	258	47	305	211	29	35	42
44-46 SH1	163	43	207	120	43	55	74
44-46 SH2	165	28	193	136	46	54	66
44-46 SH3	208	41	249	167	36	43	53
44-46 SH4	203	50	253	153	35	44	58

Na Tabela 19 é possível observar que os módulos de elasticidade médios obtidos indicam uma capacidade de suporte do subleito baixa, de 35 MPa para a faixa adicional do km 50 e entre 43 e 55 MPa para a faixa do km 44.

Levando-se em conta os valores característicos, os módulos de elasticidade mínimos das duas faixas adicionais estariam variando entre 29 e 35 MPa, mostrando que, a previsão feita inicialmente de MR igual 25 MPa se mostrou coerente.

Na sequência, foi estimado o módulo de elasticidade da camada de reforço do subleito. Para isso, foi elaborado um sistema de duas camadas, subleito e reforço. Uma vez que os módulos de elasticidade do subleito já estavam determinados, e a espessura da camada de reforço foi constante, de 40 cm, as duas únicas variáveis foram a deflexão e o módulo da camada de reforço. O módulo de elasticidade linear adotado para o subleito foi o valor médio obtido anteriormente. Foi elaborada uma correlação para cada segmento, conforme apresentado na Figura 93.

Figura 93 – Correlação entre o módulo elástico linear da camada de reforço do subleito deslocamento recuperável calculado com viga *Benkelman*

Na sequência, a partir das correlações obtidas, foi estimado o módulo de elasticidade do reforço em cada segmento, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Módulo de elasticidade do reforço do subleito do trecho 2

		50-53	44-46 SH1	44-46 SH2	44-46 SH3	44-46 SH4
		RCD	RCD	RCD	Escória	MS
Deflexão 10 ⁻² mm	Média	116	79	68	100	92
	Máxima	130	99	77	120	103
Módulo de Elasticidade MPa	média	240	311	452	234	264
	mínimo	167	162	317	135	191
	Subleito	35	55	54	43	44

Como pode ser observado na Tabela 20, a camada de RCD apresentou um módulo de elasticidade médio entre 240 e 452 MPa, sendo a média entre os segmentos de 335 MPa, valor que credencia o material como uma excelente alternativa ao uso de materiais pétreos.

Como comparativo, o segmento 44-46-SH4, executado em macadame seco convencional, apresentou módulo com mesma ordem de grandeza, da ordem de 264 MPa. O segmento em escória de aciaria, segmento 44-46 SH3, foi o que apresentou

o menor desempenho numérico, mas muito próximo do macadame seco, sendo também uma boa alternativa como camada de reforço.

Com os valores de módulo da camada de subleito e da camada de reforço determinados, foi possível estimar os módulos da camada de sub-base, em BGS e em escória de aciaria com RCD. A correlação entre a deflexão calculada sobre a camada de sub-base e o módulo de elasticidade calculada desta, é apresentado na Figura 94.

Figura 94 – Correlação entre o módulo elástico linear da sub-base e deslocamento recuperável

A partir das correlações obtidas, foram cálculos os módulos de elasticidade médios e mínimos característico da camada, apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Módulo de elasticidade da sub-base do trecho 2

		50-53 BGS	44-46 SH1 BGS	44-46 SH2 Escória+RCD	44-46 SH3 BGS	44-46 SH4 BGS
Deflexão 10 ⁻² mm	Média	87	70	75	79	70
	Máxima	99	81	92	89	87
Módulo de Elasticidade MPa	Média	482	215	62	553	632
	Mínimo	191	87	19	254	158
	Reforço	240	311	452	234	264
	Subleito	35	55	54	43	44

Quanto a camada de sub-base, pode-se constatar que tiveram uma variabilidade de módulos de elasticidade muito superior à da camada de reforço, variando as médias entre 215 Mpa e 632 MPa.

Não é possível afirmar que os maiores valores estão associados a um maior suporte da camada inferior pois os valores obtidos não representam esse comportamento. De fato, os valores variaram sem uma explicação plausível. Uma hipótese está associada à época de execução a obra, onde a leitura pode ter sido feita com as camadas inferiores saturadas ou não, mas é apenas uma hipótese que não pôde ser verificada.

Um comportamento claro que pode ser observado é quanto à camada de escória+RCD. Como já constatado na análise do controle defletoométrico, a camada apresentou rigidez extremamente baixa, à época da leitura, de apenas 62 MPa. Seria um caso para descartar o material caso o levantamento defletoométrico com FWD, após a conclusão da obra, não mostrasse um enrijecimento dessa camada com o tempo, como será descrito no item 3.9.2.3.

3.8.4 Dificuldades executivas observadas

Durante a realização dos trabalhos de campo, foram observadas diversas dificuldades, que foram entendidas e contornadas, visando melhoria do processo executivo, para esse e para os próximos trechos.

A primeira dificuldade esteve associada ao controle de teor de agente de reciclagem a ser incorporado à mistura. A utilização de um equipamento não plenamente adaptado para usinagem estacionária acarretou em uma deficiência na pesagem dinâmica do material, necessitando-se que o controle eletrônico de injeção de emulsão fosse desligado. Desta forma, o controle de teor de asfalto precisou ser controlado com determinações de teores antes e após a usinagem.

Uma segunda dificuldade foi quanto ao armazenamento da mistura usinada. O uso de lonas plásticas de baixa densidade (espessura de 150 μm) mostrou-se sensível à insolação, rasgando com facilidade e necessitando diversas substituições durante o tempo de armazenamento. A substituição por lonas de maior densidade e fabricada com materiais mais resistentes aos raios solares é de fundamental importância para o correto armazenamento de misturas asfálticas recicladas a frio. Como observado

em laboratório, mesmo com 4 meses de estocagem a mistura reciclada conseguiu manter valores mecânicos bem satisfatórios, então melhorias no método de armazenamento torna-se essencial para melhor aproveitamento do material, facilitando a logística da obra.

Durante a execução, observou-se que, mesmo com a mistura sendo aplicada em temperatura ambiente, foi necessário que os pneus dos rolos compactadores e o tambor do rolo tandem sejam borrifados com produto antiaderente, evitando-se assim o “arrancamento” superficial do material. A utilização de antiaderentes vegetais sanou o problema.

A velocidade do rolo compactador de pneus também foi objeto de atenção. O aumento da velocidade de compactação acarretou no surgimento de estrias transversais na camada acabada, como observado na Figura 95. O problema foi sanado limitando-se a velocidade do rolo de pneus em até 5km/h. Esse é um defeito que pode aparecer com frequência e que deve ser fiscalizado, principalmente por que o aumento da velocidade de compactação representa ganho de produtividade e agilidade na obra, mas podem prejudicar o desempenho final da mistura.

Figura 95 – Fissuras transversais geradas na mistura reciclada a frio em função da alta velocidade do rolo compactador de pneus

Fonte: Autor, 2018.

Em um segmento de superelevação, ocorreu um escorregamento transversal da mistura reciclada. O teor de umidade da mistura, nesse segmento, estava em 6%, limite levemente superior pela especificação da ARRA para compactação, e pode ter potencializado a aparição do defeito, que pode ser observado na Figura 96.

Esse defeito foi sanado com dois procedimentos: limitando-se a espessura máxima de compactação, nas declividades transversais superior a 2%, em 5 cm. Além disso, foi reforçado com a construtora a sequência correta de rolagem, começando a compactação com o ponto mais baixo da seção transversal e indo no sentido do ponto mais alto. Assim, eliminou-se o problema de escorregamento em toda a execução posterior.

Figura 96 – Escorregamento transversal da mistura reciclada a frio em segmentos de elevada declividade transversal no trecho 2

Fonte: Autor, 2018.

Quanto à compactação, observou-se que a utilização do método do frasco de areia com diâmetro de furo igual a 100mm gerava uma dispersão muito grande dos resultados, em função da pequena massa do material coletado e pelo pequeno volume do furo, causando imprecisão nos resultados.

A solução foi a adoção de furo do ensaio com diâmetro de 150 mm, aumentando-se, assim, em 2,25 vezes tanto a massa extraída quanto o volume do furo, melhorando a precisão dos dados. Deste modo, a determinação da densidade *in situ* e seu respectivo grau de compactação, em relação à densidade aparente obtida em laboratório, pode ser melhor medida.

3.9 MONITORAÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Após a conclusão dos dois trechos experimentais, ambos foram monitorados de modo a avaliar o seu comportamento, em serviço. O reparo, com fresagem e recomposição, teve um acompanhamento visual de aparição de defeitos, enquanto as duas faixas adicionais foram monitoradas também com levantamentos deflectométricos, além das inspeções visuais. A monitoração é descrita a seguir.

3.9.1 Trecho experimental 1

Como mencionado, esta foi uma obra emergencial e realizada em um curto intervalo de tempo, que impossibilitou um controle tecnológico mais detalhado, visando monitorar o segmento. O segmento foi escolhido para treinar as equipes quanto aos processos de usinagem, transporte, lançamento e compactação e, nesse ponto, o teste foi satisfatório.

Em visita ao trecho 3 meses após a execução da obra, em janeiro de 2018, foi constatado que o segmento, em sua maior parte, estava integro, sem deformação por afundamento de trilha de rodas, nem trincamentos, seja por fadiga ou por reflexão das camadas inferiores, como pode ser observado na Figura 97.

Figura 97 – Estado do pavimento do trecho experimental 1 - 3 meses após a obra

Fonte: Autor, 2018.

Todavia, infelizmente, em virtude da demora na execução do dreno profundo previsto em projeto, detalhado na Figura 28, teve a ocorrência de defeitos em dois pontos do trecho: um no ponto mais baixo do segmento e outro em local onde existe a inversão da declividade transversal da pista, acarretando no acúmulo de água subsuperficial e profunda dentro da estrutura do pavimento.

A presença de água profunda na estrutura do pavimento é uma hipótese muito plausível, em função da topografia do local, com uma grande área de contribuição e com terreno mais elevado, como observado na Figura 98, acarretando na percolação de água transversalmente à estrutura do pavimento.

Figura 98 – Terreno adjacente ao trecho experimental 1

Fonte: Autor, 2018.

Tal defeito já se manifestava anteriormente à execução da obra, sendo possível observar bombeamento de finos na Figura 26, em função da entrada e principalmente do represamento de água no interior da estrutura do pavimento.

Como descrito na Tabela 3, problemas de drenagem não podem ser corrigidos por meio de reciclagem a frio, devendo a drenagem ser corrigida antes da reciclagem, o que não ocorreu, por dificuldades operacionais, no trecho em questão.

Os defeitos apareceram em duas áreas que totalizavam, aproximadamente, 10 m². Na primeira área, foi observado um trincamento do tipo couro de jacaré, provavelmente causado pela perda da capacidade de suporte da mistura reciclada em contato com a água e consequente aumento da deformação de tração do revestimento asfáltico. Tal condição, pode ter levado à camada asfáltica do revestimento ao trincamento precoce por fadiga, como detalhado na Figura 99.

Figura 99 – Trincamento por fadiga em função do acúmulo de água na estrutura do pavimento em um pequeno ponto do trecho 1

Fonte: Autor, 2018.

No segundo ponto, foi observado um afloramento de água, com bombeamento de finos, na interface do pavimento remanescente com a caixa de fresagem e recomposição, como pode ser visto na Figura 100.

Figura 100 – Afloramento de água e bombeamento de finos na interface do reparo com o pavimento existente no trecho 1

Fonte: Autor, 2018.

É visível que a água percolou transversalmente à pista, partindo da grande área permeável adjacente ao acostamento (Figura 98) em direção ao canteiro central, ficando retida na interface das diferentes camadas, em função da diferença de permeabilidade entre os materiais constituintes do pavimento. Um dreno de pavimento que interceptasse essa água, ainda no acostamento, poderia ter evitado esse defeito.

No momento da vistoria ainda, em janeiro de 2018, nesse ponto, não foi observado um trincamento interligado no local, todavia, era uma questão de tempo para que um afundamento localizado em associação a um trincamento severo acontecesse no segmento.

Os problemas enfrentados com a drenagem, nesse primeiro trecho teste, foram fundamentais para melhorar a concepção do projeto de implantação das faixas adicionais.

Após a execução da drenagem no acostamento nesse segmento, o trecho foi novamente fresado e recomposto, nesse caso apenas com concreto asfáltico, o que impossibilitou continuar com o monitoramento do trecho.

3.9.2 Trecho experimental 2

O desempenho, em serviço, das duas faixas adicionais, foi realizado por meio de levantamentos defletoométricos, medidos com FWD de modelo *Dynatest*, pelas empresas TNM e *Road Runner*.

3.9.2.1 Levantamento Defletoométrico

A análise da condição defletoométrica dos trechos em estudo teve por objetivo aferir o ganho de rigidez da mistura reciclada, já observada em laboratório, com o tempo, resultado da cura e do aumento da coesão da mistura. Tal aumento de rigidez esteve associada, em laboratório, também a um ganho expressivo de resistência à tração, deste modo, o ganho de rigidez foi benéfico às misturas mediante o ganho de resistência à tração.

Os levantamentos defletoométricos foram realizados em 3 épocas distintas, conforme mostrado na Tabela 22.

Tabela 22 – Cronograma de realização dos ensaios com FWD no trecho 2 desta pesquisa

Segmento		44-46	50-53
1 ^a Leitura	Período entre obra e leitura	-	7 dias
	Data	-	05/04/2018
	Condição climática	-	chuvoso
2 ^a Leitura	Período entre obra e leitura	40 dias	90 dias
	Data	05/07/2018	05/07/2018
	Condição climática	seco	seco
3 ^a Leitura	Período entre obra e leitura	130 dias	180 dias
	Data	03/10/2018	02/10/2018
	Condição climática	úmido	úmido

Os valores de deflexão (D_0) foram corrigidos para a temperatura de referência de 25°C, pela equação proposta no Manual de Pavimentação do DER/SP (2006), apresentada a seguir:

$$T_{25^{\circ}\text{C}} = T_{pav} \cdot e^{[n(25^{\circ}-t)]}$$

Onde “n” é dado em função da espessura do revestimento de acordo com a Tabela 23.

Tabela 23 – Valor de “n” em função da espessura do revestimento

Espessura do revestimento	n
3	0,00196
6	0,00467
10	0,00836
15	0,01150
20	0,01339

Fonte: Adaptado de DER/SP, 2006.

Os valores de D_0 , ou seja, o deslocamento vertical no ponto de aplicação de carga, são apresentados nas Figura 101 e Figura 102. Para a análise da deflexão medida com o FWD, foi descartado o início e o fim do segmento, pois estão em área de transição do pavimento antigo para o pavimento novo, como apresentado na Figura

30, sendo considerando apenas os valores que estão integralmente dentro das faixas adicionais.

Figura 101 – Deslocamento recuperável D_0 com FWD – km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 102 – Deslocamento recuperável D_0 com FWD – km 44 ao 46 do trecho 2

É visível um ganho estrutural, em termos de rigidez do pavimento, com o decorrer do tempo na faixa do km 50, comprovando o aumento de MR da mistura reciclada, obtido em laboratório. As demais camadas do pavimento não possuem características que pudessem justificar essa redução, sendo a cura da camada de mistura reciclada a frio a única com o potencial de ganho de rigidez, tão significativo, com o tempo. A faixa

do km 44, com o primeiro levantamento com FWD realizado 40 dias após a conclusão da execução da mistura reciclada, não apresentou ganho substancial de rigidez, o que mostra que o maior ganho foi entre os primeiros 40 dias.

Outra hipótese, no caso particular do segmento localizado entre os km 50 e km 53, poderia estar associada ao fato de a primeira leitura ter sido realizada após a obra, em março, período chuvoso, e as demais em agosto e outubro, período seco. Para mitigar essa dúvida, faz-se necessário o entendimento e a análise de todos os pontos da bacia de deflexões.

Independentemente do tipo do pavimento, dos materiais constituintes das camadas e de suas espessuras, é esperado que a deflexão mais distante, D_{120} , em função da distância de aplicação de carga, seja o deslocamento apenas da camada de subleito, não sofrendo influência da estrutura do pavimento. Dentro dessa hipótese, foi realizada a análise da D_{120} , visando identificar se o subleito, em função da época dos levantamentos, possa ter influenciado os valores de D_0 . Os levantamentos estão apresentados nas Figura 103 e Figura 104.

Figura 103 – Deslocamento recuperável D_{120} com FWD - km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 104 – Deslocamento recuperável D_{120} com FWD - km 44 ao 46 do trecho 2

Como pode ser observado, o valor de D_{120} não sofreu nenhuma mudança significativa ao longo do tempo, permanecendo no mesmo patamar durante todo o período monitorado, inclusive no trecho em que a sub-base fora construída com BGS de escória de aciaria + RCD e o reforço do subleito em escória e em macadame seco. Portanto, o ganho de rigidez da estrutura observado ocorre unicamente em função da camada de mistura reciclada a frio. Inclusive, na faixa do km 50, aos 180 dias o valor de D_{120} foi ligeiramente superior.

Com isto, se D_0 representa o deslocamento total em toda a estrutura do pavimento, e D_{120} o deslocamento sofrido pelo subleito, intuitivamente, os demais valores obtidos pelo levantamento deflectométrico, D_{20} , D_{30} , D_{45} , D_{65} e D_{90} representam a condição estrutural de cada uma das camadas.

Existem diversos estudos quanto aos parâmetros a serem analisados na bacia de deflexões. Segundo a experiência sul-africana, os parâmetros da bacia de deflexão mais significativos em termos da descrição do estado do pavimento são os parâmetros *Surface Curvature Index* (SCI), *Base Damage Index* (BDI) e *Base Curvature Index* (BCI), (LOPES, 2012; HORAK, 1987), sendo os limites de cada parâmetro, estabelecidos por Lopes (2012), apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros da bacia de deflexão admissíveis para cada faixa de tráfego

PBD	$N \geq 1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7 > N \geq 1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6 > N \geq 1 \cdot 10^5$
SCI (10^{-2} mm)	<15	<30	<60
BDI (10^{-2} mm)	<10	<15	<30
BCI (10^{-2} mm)	<6	<10	<15

Fonte: Adaptado de LOPES, 2012.

Apesar de as faixas adicionais estarem na segunda faixa de tráfego, de $1 \cdot 10^6$ a $1 \cdot 10^7$, como critério para avaliar a evolução dos parâmetros, serão adotados como valores limites os determinados para a faixa de $N \geq 1 \cdot 10^7$.

3.9.2.2 Índice da Curvatura da Superfície (SCI)

O Índice da Curvatura da Superfície (SCI, *Surface Curvature Index*, em inglês) é diferença entre o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga (D_0) e a deflexão a 30 cm desta (D_{30}), sendo um indicativo de resistência das camadas superiores do pavimento (LOPES, 2012). Quanto menor o valor de SCI, menor a deformação das camadas superiores e menor a contribuição das camadas superiores na deflexão total D_0 .

Valores de SCI superiores a $25 \cdot 10^{-2}$ mm indicam que as camadas superiores do pavimento são pouco resistentes, sendo que as deficiências observadas possam ser atribuídas, principalmente, as camadas de revestimento e de base. (LOPES, 2012).

Para a análise do SCI foi admitido o valor máximo de $15 \cdot 10^{-2}$ mm e a análise das duas faixas adicionais esta apresentada nas Figura 105 e Figura 106 a seguir.

Figura 105 –Índice da Curvatura da Superfície (SCI) - km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 106 – Índice da Curvatura da Superfície (SCI) - km 44 ao 46 do trecho 2

Como pode ser observado na Figura 105, a cura da mistura reciclada, situada na região da base, ao longo dos primeiro 90 dias, levou o SCI de um valor inicial em torno de $17 \cdot 10^{-2}$ mm para um valor em torno de $8 \cdot 10^{-2}$ mm e, ao 180 dias, ainda teve uma redução adicional, para algo em torno de $5 \cdot 10^{-2}$ mm, indicando um aumento de rigidez das camadas recicladas a frio.

Este fato não pôde ser observado na segunda faixa adicional, do km 44, ou pelo fato de a cura já ter ocorrido nos primeiro 40 dias, ou pelo fato de a mistura para essa faixa ter tido um maior tempo de estocagem. Outro aspecto interessante é no SH2, em que

a base foi realizada com escória+RCD, apresentou os valores mais baixos, da ordem de $9 \cdot 10^{-2}$ mm em ambos levantamentos, provavelmente em função de algum reflexo da rigidez dessa camada nas camadas superiores.

3.9.2.3 Índice de Danos à Base (BDI)

O Índice de Danos à Base (*Base Damage Index*, BDI, em inglês) é a diferença entre os deslocamentos medidos a 30 cm (D_{30}) e a 60 cm (D_{60}) do ponto de aplicação da carga do FWD. É considerado o melhor indicador da condição da camada de base do pavimento (LOPES, 2012), sendo inversamente proporcional à sua rigidez. Valores de BDI maiores que $40 \cdot 10^{-2}$ mm indicam pavimentos com base deficiente. (LOPES, 2012).

Para análise do BDI das faixas adicionais, considerou-se um valor limite de $10 \cdot 10^{-2}$ mm como condição ótima para a base. As análises se encontram nas Figura 107 e Figura 108 a seguir.

Figura 107 – Índice de Danos à Base (BDI) - km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 108 – Índice de Danos à Base (BDI) - km 44 ao 46 do trecho 2

A análise do BDI indicou, assim como a análise do SCI, um ganho expressivo de rigidez das mistura recicladas com o tempo de cura, partindo de um valor na casa dos $9 \cdot 10^{-2}$ mm para $4 \cdot 10^{-2}$ mm na faixa adicional do km 50. O comportamento observado da faixa adicional do km 44 não foi tão bom quanto do km 50, porém ficou na faixa dos $6 \cdot 10^{-2}$ mm nos segmentos com base em BGS convencional.

Um ganho surpreendente de rigidez aconteceu no SH 2, com sub-base em escória + fino de RCD, chegando em valores de BDI da ordem de $1 \cdot 10^{-2}$ mm, mostrando um comportamento de elevada rigidez. Essa foi uma constatação interessante e que demanda estudos futuros.

Apesar de mais discreto em relação à faixa do km 50, foi possível observar um ganho de rigidez também na faixa do km 44 entre 40 e 130 dias de cura.

3.9.2.4 Índice da Curvatura da Base (BCI)

O Índice de Curvatura da Base (*Base Curvature Index*, BCI, em inglês), é obtido pela diferença entre os deslocamentos medidos a 60 cm (D_{60}) e a 90 cm (D_{90}) ponto de aplicação da carga, sendo o melhor indicador da condição do subleito (LOPES, 2012). Por ser um indicativo da resistência do subleito, não deve sofrer influências do tipo de pavimento, tampouco em função de sua deterioração.

Sua análise é importante para constatar se deflexões elevadas em um pavimento estão associadas a um problema estrutural das camadas ou uma baixa capacidade de suporte do subleito.

Importante ressaltar que como nas pista experimental foi realizado uma camada de reforço do subleito, é provável que esta camada interfira nos valores do BCI, uma vez que é possível que o D_{60} não esteja lendo somente a deformação específica do subleito, já que a espessura total do pavimento, incluindo a camada de reforço do subleito, é de 80 cm.

Os valores de BCI das duas faixas adicionais estão apresentados nas Figura 109 e Figura 110. Foi adotado, como valor admissível, $6 \cdot 10^{-2}$ mm para o BCI.

Figura 109 –Índice da Curvatura da Base (BCI) - km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 110 –Índice da Curvatura da Base (BCI) - km 44 ao 46 do trecho 2

Para a faixa do km 50, não foi observada nenhuma melhoria entre os levantamentos realizados em 7 e 90 dias, permanecendo constante na casa de $1,7 \cdot 10^{-2}$ mm. O primeiro levantamento, em abril, foi realizado em estação chuvosa e a segunda, em julho, em estação seca. O fato de não ter tido variação no BCI é um indicativo que o clima úmido não prejudicou a obtenção dos resultados da bacia de deflexão, sendo as melhorias nos parâmetros associado à cura da mistura reciclada a frio.

No levantamento de 180 dias após a conclusão da obra, em outubro, em período que teve chuvas ocasionais, ocorreu ainda uma redução sensível do BCI para $1 \cdot 10^{-2}$ mm, que pode ter sido motivado por um reflexo do aumento de rigidez da base reciclada.

Já na faixa adicional do km 44, é possível observar que os segmentos com RCD (SH1 e SH2) apresentaram um comportamento sensivelmente melhor que os segmentos com escória e macadame seco, SH 3 e SH 4 respectivamente. O valor mais baixo foi no SH2, com sub-base executada com escória+RCD, o que influenciou na queda do BCI nesse segmento, uma vez que a leitura do D_{120} não constatou uma melhora do subleito nesse local. Novamente, é observada um aumento da rigidez da escória com RCD, contrariando as medições de deflexão iniciais, com viga *Benkelman*.

Ocorreu uma melhora uniforme do parâmetro ao longo da faixa. Porém, uma cimentação do RCD na camada de reforço com granulometria graúda é pouco provável, pois a redução ocorreu, inclusive, no SH4 executado em MS e no SH3, executado com escória de aciaria.

3.9.2.5 Retroanálise do Módulo de Elasticidade da Mistura Reciclada a Frio

A última análise quanto à evolução da rigidez da mistura asfáltica reciclada a frio com agente de reciclagem emulsionado foi a retroanálise dos módulos elásticos. Foi utilizado o software EVERCALC, o qual, a partir de um número determinado de interações, tenta aproximar a bacia real medida com o FWD de uma bacia teórica, calculada a partir das simulações de módulo de cada camada, em um sistema de múltiplas camadas elásticas lineares sobrepostas.

Como parâmetros de entrada é necessário fornecer o número de camadas, o intervalo de módulo de elasticidade esperado e coeficiente de *Poisson* de cada camada. Adicionalmente, caso desejado, é possível adicionar a temperatura do ar e da superfície do pavimento, para que o programa estime o módulo de elasticidade da

primeira camada, de revestimento, à 25°C. Importante ressaltar que a correção é apenas para a primeira camada, então na hipótese de a temperatura do pavimento ter afetado o módulo da camada reciclada (2ª camada), esta não teve seu valor corrigido para 25°C.

O programa permite fazer a análise com até 5 camadas, sendo que a última, obrigatoriamente, é uma camada semi-infinita, representando o subleito. Todavia, é esperado um valor de maior confiabilidade quando são fornecidas até 3 camadas, e com uma probabilidade menor de acerto com 5 camadas, pelo fato de diferentes combinações de módulo obterem a mesma bacia teórica. Deste modo, optou-se em se considerar um pavimento de 4 camadas, sendo a primeira, de 7 cm, composta pelo microrrevestimento asfáltico a frio e o concreto asfáltico. A segunda, de 15 cm, a mistura reciclada. A terceira, de 60 cm, as camadas granulares de BGS e reforço do subleito. A última camada, a camada de subleito.

Importante frisar que foram feitas simulações com as mais variadas combinações até se encontrar a que melhor convergisse para valores dentro de faixas esperadas. Fez-se simulações com a BGS e o reforço em duas camadas separadas, com o reforço incorporado ao subleito, todavia, a melhor combinação foi a apresentada.

As camadas de subleito e a combinação das camadas granulares tiveram seus módulos de elasticidade limitados de acordo com os obtidos com viga *Benkelman*, durante o controle tecnológico da execução da obra. A camada de concreto asfáltico e de mistura asfáltica reciclada tiveram seus módulo limitados de acordo com uma faixa provável.

Outra consideração foi sobre como fazer o tratamento da bacia de deflexão. Uma alternativa seria a realização de uma segmentação homogênea, a determinação de uma bacia média, encontrar a bacia real que melhor se aproximasse da média e fazer a retroanálise apenas desta. O problema em se fazer essa análise foi justamente não considerar a variabilidade que o material poderia ter, levando a uma interpretação equivocada que aquele resultado representaria todo o segmentos. Desta forma, optou-se em fazer a retroanálise de todas as bacias, sendo a análise estatística feita a partir dos resultados.

Além disso, também se optou em não corrigir as deflexões com a temperatura antes de entrar com as bacias no programa. Foram retroanalizadas as bacias reais,

medidas. Deste modo, os valores de temperatura, do ar e do pavimento, foram também considerados na alimentação do programa, para a correção pelo próprio software.

Uma vez estabelecida as condições de contorno, calculou-se assim o módulo elástico retroanalisado de cada camada. A evolução da rigidez, com o tempo, em cada bacia, da mistura reciclada a frio, é apresentada nas Figura 111 e Figura 112 a seguir.

Figura 111 – Módulo de elasticidade da mistura reciclada a frio obtido a partir da retroanálise das bacias de deflexão - km 50 ao 53 do trecho 2

Figura 112 – Módulo de elasticidade da mistura reciclada a frio obtido a partir da retroanálise das bacias de deflexão - km 44 ao 46 do trecho 2

Como pode ser observado, as duas faixas adicionais tiveram comportamento completamente diferente. Primeiramente será realizada uma análise da primeira faixa adicional, do km 50 ao 53.

A primeira leitura, 7 dias após a conclusão da obra, indicou um módulo de elasticidade médio para a camada reciclada de 358 MPa, com 100% dos pontos analisado com módulo inferior à 1.000 MPa. Na segunda leitura, apesar de uma grande dispersão dos valores, o módulo médio subiu para 1.725 MPa. Já na terceira leitura, 180 dias após a conclusão da obra, o módulo permaneceu no mesmo patamar, com valor médio de 1.840 MPa. Os valores individuais, agrupados por faixa, estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Faixa de valores de módulo de elasticidade da camada reciclada a frio para a faixa adicional do km 50 do trecho 2

E (MPa)			7 dias	90 dias	180 dias
0	≤ E <	1.000	100%	13%	7%
1.000	≤ E <	1.500	0%	29%	27%
1.500	≤ E <	2.000	0%	29%	27%
2.000	≤ E <	3.000	0%	29%	38%
Média			358 MPa	1.725 MPa	1.840 MPa

Os valores observados foram próximos aos valores obtidos em laboratório nos CPs com compactação Marshall, o que demonstrou que este possa ser o ensaio que melhor represente o comportamento do material em laboratório.

Uma observação importante é quanto a temperatura média do pavimento durante o ensaio do FWD nas três leituras, 26°C, 19°C e 49°C respectivamente, para a faixa do km 50. Como pode ser observado, uma mudança de temperatura de revestimento de 26°C para 19°C entre a primeira e a segunda leitura poderia justificar, em parte, a variação de módulo de elasticidade, mas como não houve queda da segunda para a terceira leitura, ou um novo incremento de rigidez foi mascarado pelo aumento de temperatura ou a variação de temperatura, na superfície, não afetou a camada reciclada em profundidade. Para análise mais conclusiva, os levantamentos precisariam ser feitos na mesma temperatura do pavimento.

Já na segunda faixa, do km 44 ao 46, não possível foi observar uma evolução do módulo de elasticidade com o tempo, permanecendo no mesmo patamar aos 40 e aos 130 dias de cura, de média de 692 MPa e entre 82% e 95% dos pontos com módulo de elasticidade inferior à 1.000 MPa, conforme Tabela 26.

Tabela 26 – Faixa de valores de módulo de elasticidade da camada reciclada a frio para a faixa adicional do km 44 do trecho 2

E (MPa)			40 dias	130 dias
0	≤ E <	1.000	82%	95%
1.000	≤ E <	1.500	18%	5%
1.500	≤ E <	2.000	0%	0%
2.000	≤ E <	3.000	0%	0%
Média			692 MPa	647 MPa

A não evolução dos módulos de elasticidade, entre as duas leituras, já era esperado, uma vez que tanto na análise das deflexões D_0 , quanto na análise dos parâmetros da bacia, não foi possível observar um ganho de rigidez da camada, o que foi comprovado com a retroanálise. O que realmente causou surpresa foi a rigidez baixa da camada, levemente superior do que a esperada para uma camada granular. Esse segmento, de fato, não atingiu a expectativa e, provavelmente, com o tempo, será possível observar uma deterioração precoce, não observada até o momento. As duas faixas adicionais, até outubro de 2018, permaneceram sem defeitos.

Uma das explicações pode estar associada ao problema de estocagem do material. Como relatado no item 3.8.4, das dificuldades executivas, o material permaneceu estocado por até 5 meses, entre a usinagem em janeiro até a conclusão da camada na segunda faixa, em junho.

Em laboratório, com temperatura e umidade controladas, de fato a estocagem de até 4 meses não comprometeu a cura do material, e o ganho de rigidez e resistência foi observado, mas isso não aconteceu em campo. A estocagem não foi bem executada. Problemas com a lona e o manejo das pilhas deixou o material exposto a chuvas e altas temperaturas o que prejudicou o desempenho da mistura, não conseguindo atingir a coesão necessária.

4 CONCLUSÕES

A utilização de misturas asfálticas recicladas a frio com agente de reciclagem emulsionado, visando a execução de bases asfálticas para pavimentos novos, se mostrou uma alternativa promissora. A trabalhabilidade relativamente simples do material, aliada a redução em 20% dos custos de implantação da estrutura do pavimento, corroborou para que a técnica passasse a ser considerada em todas as alternativas de pavimentação do Grupo CCR.

Quanto aos resultados dos ensaios, foi possível comprovar o ganho de rigidez e de resistência à tração das misturas asfálticas recicladas a frio em função do tempo de cura. Com valores mais confiáveis em mãos, será possível melhorar e otimizar o dimensionamento de novas estruturas.

Em relação à compactação, os corpos de prova compactados na metodologia SUPERPAVE apresentaram uma maior massa específica em relação aos compactados com o soquete Marshall. Essa melhor compactação pode ser a explicação pelos maiores valores de MR.

Quanto resistência à tração na compressão diametral, também foi possível observar um ganho de resistência com o tempo de cura, e, novamente, os CPs SUPERPAVE alcançaram melhores valores em relação aos CPs Marshall. Os valores mínimos das especificações da ARRA (2015) e da WIRTGEN (2012) foram facilmente atingidos.

A estocagem das misturas em laboratório, após a usinagem e antes da compactação, não prejudicou nem a cura e nem o ganho de rigidez e resistência das misturas, pelo contrário, proporcionou maiores valores nos primeiros dias de cura. A mistura estocada por 120 dias também não apresentou perdas de rigidez ou resistência em função da estocagem por longo período.

No acompanhamento da construção das pistas experimentais, foi possível observar que, com os equipamentos de compactação disponíveis no mercado, é possível atingir massa específica muito próxima das observadas nos corpos de prova moldados em laboratório no compactador Marshall, com 75 golpes. O grau de compactação só não foi atingido em segmentos onde as espessuras de mistura reciclada a frio eram superiores a 8 cm. Nesses casos, a recomendação é limitar a espessura de compactação. Caso haja necessidade de compactar espessuras maiores, deverão ser utilizados equipamentos mais pesados.

Ainda quanto à compactação, não se observou grandes diferenças do grau de compactação em função do tipo de rolo utilizado: rolo de pneus e rolo pé de carneiro. Provavelmente, nos segmentos que o material foi lançado em espessuras maiores, a camada poderia ter tido uma melhor compactação com o rolo pé-de-carneiro, porém, como a variação de espessura de compactação não era escopo desse trabalho, essa propriedade não foi avaliada sistematicamente. O controle de compactação foi satisfatório utilizando-se o ensaio de frasco de areia, porém, trata-se de um ensaio destrutivo e demorado. Recomenda-se que seja incorporado, o mais rápido possível, aos controles tecnológicos de obra, o uso de densímetros (nucleares ou não) para controle de compactação, não apenas em camadas recicladas à frio, mas para controle de todas as misturas asfálticas.

O material mostrou-se susceptível a chuvas, perdendo compactação facilmente caso não imprimado. Todavia, a imprimação precoce dificultou a perda de umidade da mistura, mas foi necessária em função de chuvas quase que diárias. A recompactação, como mencionado no Manual de Pavimentação da ARRA (2015), resolveu os problemas de compactação nos segmentos onde o material foi lançado com uma maior umidade, em torno de 6%.

Quanto ao desempenho do primeiro trecho experimental, em função da demora na implantação dos drenos de pavimento, o reparo não foi bem-sucedido em dois pontos, com trincamento tipo couro de jacaré e bombeamento de finos, justamente nos pontos baixos e locais de inversão da declividade transversal. Nos demais pontos, durante o período de análise (3 meses), não foram observados defeitos na superfície. Os dois pontos que apresentaram problemas estavam associados a falha no sistema de drenagem subsuperficial, mostrando a necessidade obrigatória de drenagem eficiente.

No segundo trecho experimental, no primeiro segmento, a mistura reciclada apresentou o mesmo comportamento observado em laboratório, com ganho de rigidez com o tempo de cura. Os valores dos módulo de elasticidade retroanalizados foram convergentes com os módulos de resiliência obtidos em laboratório nos CPs Marshall. O sucesso obtido na execução deste segmento foi a comprovação da eficácia da técnica. Já no segundo segmento, por possíveis problemas na estocagem, esse evolução não pôde ser observada.

Em relação ao RCD e à escória de aciaria, como camada de sub-base e de reforço do subleito, os materiais se mostraram uma excelente alternativa aos agregados pétreos, de fácil trabalhabilidade e execução, atingindo os parâmetros de rigidez previstos em projeto, inclusive superiores ao do macadame seco.

Por fim, gostaria de concluir que o principal ganho com a utilização da técnica de reciclagem a frio não foi em relação à rigidez, tampouco de resistência a tração. O principal ganho foi ambiental, reduzindo drasticamente o consumo de materiais pétreos e o descarte de um material nobre com o RAP. Além da reciclagem a frio, com a utilização de RCD e escória de aciaria, foi possível reduzir em 70% o consumo de agregados pétreos virgens e evitar o descarte, desnecessário, de 6,5 toneladas de RAP.

Sugestões para pesquisas futuras

- Comparar misturas asfáltica recicladas elaboradas com agentes de reciclagem emulsionados de outros fornecedores.
- Estudar, em termo da reologia, o ligante residual do RAP antes e depois da incorporação do agente de reciclagem.
- Avaliar o grau e a forma de interação entre dois ligantes a frio (residual do RAP e residual do ARE), onde a única energia empregada é relativa a mistura e compactação, sem a presença de temperatura.
- Avaliar o aumento de rigidez com a cura da mistura de RCD com escória de aciaria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, Estados Unidos, 1993.

____AASHTO. – **Preparing and Determining Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of The Superpave Gyrotory Compactor**. AASHTO-T312. Estados Unidos, 2012.

____AASHTO. – **Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)**. AASHTO-T209. Estados Unidos, 2012.

____AASHTO. – **Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens**. AASHTO-T166. Estados Unidos, 2016.

AGGREGATES BUSINESS EUROPE. **Increased Use of Recycled Asphalt Pavement Technology**. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method**. ASTM D1856-09, 2009.

____ASTM. **Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method**. ASTM D6307-16, 2016.

____ASTM. **Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures**. ASTM D2172-17, 2017.

____ASTM. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. ASTM D-2041M-11, 2011.

____ASTM. **Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures**. ASTM D-4867M-09, 2014.

ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais asfálticos — Determinação da Penetração NBR 6576**, 2007.

____ABNT. **Ligantes asfálticos — Determinação do ponto de amolecimento — Método do anel e bola NBR 6560**, 2016.

____ABNT. **Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia. NBR 7185**, 2016.

____ABNT. **Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. NBR 15235**, 2009.

____ABNT. **Misturas asfálticas — Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. NBR 16208**, 2013.

____ABNT. **Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. NBR16018**, 2011.

ASPHALT ACADEMY, **Technical Guideline: Bitumen Stabilized Materials, a Guideline for Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials.** Pretoria, Africa do Sul, 2009.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **Recommended Quality Control Sampling and Testing Guidelines for Cold Recycling Using Bituminous Recycling Agents – CR201.** Glen Ellyn, Illinois, Estados Unidos, 2017.

____ARRA. **Recommended Mix Design Guidelines for Cold Recycling Using Emulsified Asphalt Recycling Agent – CR102.** Glen Ellyn, Illinois, Estados Unidos, 2017.

____ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual First Edition.** Washington, Estados Unidos, 2001.

____ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual Second Edition**. Annapolis, Estados Unidos, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO – ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas 2ª Edição**. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobrás e Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

BONFIM, V. **Estudo da Granulometria Resultante da Fresagem de Revestimentos Asfálticos com Vistas à Reciclagem In Situ A Frio**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil, 1999.

BORGES, C.B.S. **Estudo Comparativo Entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2011.

CANHEDO BEPPU. **Projeto Executivo de Implantação de Faixa Adicional na Pista Leste da Rodovia Castello Branco – SP-280 – km 44+220 ao 045+810**. São Paulo, Brasil, 2017.

CANHEDO BEPPU. **Projeto Executivo de Implantação de Faixa Adicional na Pista Leste da Rodovia Castello Branco – km SP-280 – km 50+420 ao 52+430**. São Paulo, Brasil, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Brasília, Brasil, 2018.

CROSS, S. **Determination of SUPERPAVE Gyratory Compactor Design Compactive Effort for Cold In-Place Recycled Mixtures**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1819, 2003.

DAVID, D. **Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM – DER/SP. **Concreto Asfáltico**. Especificação Técnica ET-DE-P00-02. São Paulo, Brasil, 2006.

____ DER/SP. **Projeto de Pavimentação**. Instrução de Projeto IP-DE-P00/001. São Paulo, Brasil, 2006.

____ DER/SP. **Pré-Misturado a Frio**. Especificação Técnica ET-DE-P00/025. São Paulo, Brasil, 2006.

____ DER/SP. **Sub-Base ou Base de Macadame Seco**. Especificação Técnica ET-DE-P00/011. São Paulo, Brasil, 2005.

____ DER/SP. **Sub-Base ou Base de Bica Corrida**. Especificação Técnica ET-DE-P00/010. São Paulo, Brasil, 2005.

____ DER/SP. **Sub-Base ou Base de Brita Graduada**. Especificação Técnica ET-DE-P00/018. São Paulo, Brasil, 2006.

____ DER/SP – COMISSÃO ESPECIAL DE AUTO ESTRADAS. **Rodovia Presidente Castello Branco: Seu Projeto e Execução**. São Paulo, Brasil, 1971.

DEPARTAMENTO NACIONAL E ESTRADA DE RODAGEM - DNER. **Agregados: Análise Granulométrica**. Métodos de Ensaio. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

____ DNER. **Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman**. Métodos de Ensaio DNER-ME 024/94 Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

____ DNER. **Solo – determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia**. Métodos de Ensaio. DNER 092/94. Rio de Janeiro, Brasil, 1994.

____ DNER. **Mistura Betuminosa a Frio, com Emulsão Asfáltica - Ensaio Marshall**. DNER-ME 107. Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-719. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

EBELS, L. J.; JENKINS, K. **Mix Design of Bitumen Stabilized Materials: Best Practice and Considerations for Classification**. Proceedings of the 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Gaborone, Botsuana, 2007

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – EAPA. **Key Figures of The European Asphalt Industry In 2015**. Bélgica. 2015.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. Publication No. FHWA-SA-98-042. Washington, ESTADOS UNIDOS, 1997.

_____. FHWA. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Publication N°. FHWA-HRT-11-021. Washington, Estados Unidos, 2011.

_____. FHWA. **Overview of Project Selection Guidelines for Cold In-place and Cold Central Plant Pavement Recycling**. Publication N°. FHWA-HIF-17-042. Washington, Estados Unidos, 2018.

FREIRE, J.; GÓIS, T. S.; DOMINICINI, W.K; LUTIF, J. **O Estado da Arte sobre Uso de Reciclado de Pavimento Asfáltico na Pavimentação no Brasil e no Mundo**. ANPET, Brasil, 2014.

GENNESSEAU, M.M.L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil, 2015.

HORAK, E. **Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa**. Tese de Doutorado. Department of Civil Engineering, University of Pretoria. Pretoria, África do Sul, 1987.

HUGENER, M.; PARTL, M.N.; MORANT, M. **Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators.** Road Materials and Pavement Design. 2013.

JENKINS, K. J., LONG, F. M., EBELS, L.J. **Foamed bitumen mixes = shear performance?** International Journal of Pavement Engineering Volume 8. 2007.

KEARNEY, E. J.; HUFFMAN, J. E. **Full-Depth Reclamation Process.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1684, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, 1999.

KIM, Y.R.; PARK, H. **Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation.** Department of Civil Engineering North Carolina State University Raleigh. North Carolina, Estados Unidos, 2002.

KIM, Y.; LEE, H. D.; HEITZMAN, M. **Laboratory evaluation of cold-in place recycling mixtures using foamed asphalt based on dynamic modulus and repeated dynamic load tests.** 87th Annual Meeting of Transportation Research Board. 2008.

LIN, J.; HONG J. B; XIAO, Y. **Dynamic Characteristics of 100% Cold Recycled Asphalt Mixture Using Asphalt Emulsion and Cement** Journal of Cleaner Production. 2017.

LIMA, M. C., ALVES, H.C., MOREIRA, K.C., FERNANDES, G. **Estudo Comparativo de Determinação do Módulo de Resiliência Utilizando os Métodos GeoGauge H4140 e *California Bearing Ratio* (CBR) de Campo e Laboratório.** 44ª Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2015.

LOPES, F. M. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Asfálticos com Base nos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo, Brasil, 2012.

MARTÍNEZ, A. H.; MIRÓ, R.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F. **Spanish experience with the application of gyratory compactor and indirect tensile test in design and control of cold recycled asphalt pavement.** Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2007.

MARTÍNEZ, G. V. **Experimental Study of Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement – RAP**. Transportation Record Board, 2010.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos. 3ª Edição**. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

MOLLENHAUER, K.; SIMNOFSKE, D.; VALENTIN, J.; ČÍŽKOVÁ, Z.; SUDA, J.; BATISTA, F.; MCNALLY, C. **Mix designs for cold recycled pavement materials considering local weather and traffic conditions**. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Praga, República Tcheca, 2016.

MOURA, E. **Apostila de Materiais de Pavimentação**. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC. Departamento de Transportes e Obras de Terra. São Paulo, Brasil, 2018.

MOREIRA, H. S. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Frio com Diferentes Teores de Agregado Fresado Incorporado e Diferentes Modos de Compactação**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, Brasil, 2005.

NASCIMENTO, M. V. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Recicladas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2011.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **High RAP Asphalt Pavements Japan Practice — Lessons Learned**. Information Series 139. Washington D.C., Estados Unidos, 2015.

NORTHWEST PAVEMENT MANAGEMENT ASSOCIATION. **Pavement Surface Condition Field Rating Manual for Asphalt Pavements 1a Ed**. Washington D.C., Estados Unidos, 2008.

PÉREZA, I; MEDINA, L.; DEL VALB, M.A. **Mechanical Properties and Behavior of In Situ Materials Which Are Stabilized with Bitumen Emulsion**. Road Materials and Pavement Design, 2013.

ROADTEC. **Cold-In-Place-Recycling – CIR Equipment**. Catálogo de Equipamentos. Estados Unidos, 2018.

SCHELLHAMMER, P.E.D. **Cold Recycling**. Putting Earth Day into Practice on Our Nation's Roads and Highways. Federal Highway Administration. Washington, Estados Unidos, 2018.

SCHWARTZ, C. W; DIEFENDERFER, B.K.; BOWERS; B. F. **Material Properties of Cold In-Place Recycled and Full-Depth Reclamation Asphalt Concrete**. Cooperative Highway Research Program; Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2017.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do Comportamento de Pavimentos com Camada Reciclada de Revestimentos Asfálticos a Frio com Emulsão Modificada por Polímero**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

TANNOUS, K.; PERNA R.F. **Difusividade Mássica em Sólidos**. Notas de Aula. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2011.

TEBALDI, G. **Cold Recycling**. Arizona Pavements and Material Conference. Estados Unidos, 2013.

TIA, M.; WOOD, L.E. **Use of Asphalt Emulsion and Foamed Asphalt in Cold-Recycled Asphalt Paving Mixtures**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 898, 1983.

WIRTGEN GMBH. **Tecnologia de Reciclagem a Frio, 1a ed**. Wihagen, Alemanha, 2012.

WORLD HIGHWAYS. **Efficient processing of RAP in the Mix**. Dartford, Reino Unido, 2017.