

RELATÓRIO TÉCNICO - PESQUISA RDT CONCEPA/ANTT:

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DA
ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DE
MATERIAL FRESADO PARA USO COMO CAMADA DE
PAVIMENTO**

Porto Alegre, RS, Brasil

Julho, 2015



L. P. Gerenciamento e Construções Ltda.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Panorama do conhecimento e utilização de melhoria de solos no Brasil ...	16
Figura 2: Distribuição granulométrica e proporção de finos	17
Figura 3: Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos	30
Figura 4: Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio <i>in situ</i>	32
Figura 5: Comparativo de construção de base nova e reciclagem profunda	33
Figura 6: Vista do cilindro fresador de uma máquina fresadora.....	38
Figura 7: Superfície resultante de fresagem a frio.....	38
Figura 8: Fresadora W 35 DC da Wirtgen	39
Figura 9: Fresadora W 1000 da Wirtgen.....	40
Figura 10: Fresadora W 1900 da Wirtgen	41
Figura 11: Reciclagem parcial a frio <i>in situ</i>	42
Figura 12: Método da máquina única <i>single-pass</i>	43
Figura 13: Método do Trem de Equipamentos <i>single-pass</i>	44
Figura 14: Produção da espuma de asfalto.....	48
Figura 15: Deformação permanente	51
Figura 16: Afundamento em trilha de roda com presença de água na superfície.....	52
Figura 17: Revestimento em avançado grau de fissuração.....	53
Figura 18: Esquema do processo de reciclagem de superfície.....	56
Figura 19: Processo de reciclagem de superfície.....	57
Figura 20: Esquema do processo de repavimentação por <i>multiple-pass</i>	58
Figura 21: Esquema do processo de repavimentação por <i>single-pass</i>	59
Figura 22: Processo de repavimentação	59
Figura 23: Esquema do processo de remistura	60

Figura 24: Vista parcial do processo de remistura.....	61
Figura 25: Esquema dos materiais de uma mistura asfáltica reciclada a quente	62
Figura 26: Esquema do processo de reciclagem a quente em usina.....	63
Figura 27: Esquema do processo no interior de um TSM paralelo	65
Figura 28: Tambor secador misturador com entrada central de RAP	67
Figura 29: TSM com entrada central de RAP e fluxo contracorrente	67
Figura 30: Máquina fresadora Caterpillar PM102	71
Figura 31: Detalhe do cilindro de corte da fresadora Caterpillar PM102.....	71
Figura 32: Distribuição granulométrica dos agregados minerais	74
Figura 33: Especificação granulométrica - DNIT 141/2010	76
Figura 34: Projeto de estabilização do fresado com adição de agregado virgem	77
Figura 35: Curva de compactação do material fresado e da mistura 70/30	79
Figura 36: Aspecto visual da mistura 70/30 com cimento (a) após desmoldagem e (b) preparada com capeamento de enxofre para ruptura	85
Figura 37: Resultados ensaios de resistência à compressão simples <i>versus</i> teor de cimento	86
Figura 38: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	88
Figura 39: Ensaio para determinação do módulo de resiliência.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) na Europa	24
Tabela 2: Dados da coleta das amostras de fresado	70
Tabela 3: Distribuição granulométrica das amostras de material fresado	72
Tabela 4: Distribuição granulométrica das amostras de material fresado após extração de betume.....	72
Tabela 5: Resultados do teor de ligante.....	73
Tabela 6: Características tecnológicas dos agregados utilizados	73
Tabela 7: Distribuição granulométrica dos agregados	74
Tabela 8: Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa.....	75
Tabela 9: Projeto de estabilização do fresado com adição de agregado virgem.....	77
Tabela 10: Resultados do ensaio de compactação do fresado	78
Tabela 11: Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30 (fresado / agregado).....	79
Tabela 12: Parâmetros de compactação dos materiais em estudo	80
Tabela 13: Resultados do ensaio de CBR.....	81
Tabela 14: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 3 dias de cura	84
Tabela 15: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura	84
Tabela 16: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura	85
Tabela 17: Resultados ensaios de resistência à tração com 4,86% de cimento	88

Tabela 18: Resultados ensaios de Mr com 4,86% de cimento.....90

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ARRA	– Asphalt Recycling and Reclaiming Association
ASTM	– American Society for Testing and Materials
CAP	– Cimento asfáltico de petróleo
CBR	– California Bearing Ratio
CBUQ	– Concreto betuminoso usinado à quente
CO ₂	– Dióxido de carbono
CP	– Corpo de prova
DAER	– Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNER	– Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	– Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	– Emulsão asfáltica
FHWA	– Federal Highway Administration
ISC	– Índice de Suporte Califórnia
LMCC	– Laboratório de Materiais de Construção Civil
MPa	– Mega Pascal
MR	– Módulo de resiliência
NBR	– Norma brasileira
PMF	– Pré-misturado à frio
PMQ	– Pré-misturado à quente
RAP	– Recycled/Reclaimed asphalt pavement
RCS	– Resistência à compressão simples
RTCD	– Resistência à tração por compressão diametral

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

UTM – Universal Testing Machine

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS.....	3
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	5
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. Estabilização de solos.....	13
2.1.1. Estabilização granulométrica.....	16
2.1.2. Estabilização química.....	18
2.2. Reciclagem de pavimentos	22
2.2.1. Conceitos	27
2.3. Técnicas de reciclagem de pavimentos à frio	31
2.3.1. Fresagem de pavimentos (cold planing)	33
2.3.2. Reciclagem a frio <i>in situ</i> (espessura parcial)	41
2.3.3. Reciclagem a frio <i>in situ</i> com profundidade total (<i>Full Depth Reclamation</i>)	45
2.3.4. Restrições e limitações das técnicas de reciclagem a frio <i>in situ</i>	48
2.4. Técnicas de reciclagem de pavimentos à quente	49
2.4.1. Reciclagem a quente <i>in situ</i>	50
2.4.2. Reciclagem à quente em usina estacionária	62
2.4.3. Vantagens e Desvantagens	68
3. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS	76
3.1 Dosagem – Estabilização Granulométrica.....	76
3.2 Compactação	78
3.3 Califórnia Bearing Ratio (CBR)	81
3.4 Resistência à compressão Simples (RCS)	83
3.5 Resistência à Tração (R_t)	87
3.6 Módulo de resiliência (MR)	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1. Conclusões	91
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1. INTRODUÇÃO

É um fator desconhecido para grande parte da sociedade, a real importância que os transportes exercem no nosso cotidiano. A forma como nos locomovemos, como recebemos nossas correspondências ou como os mais diversos produtos são escoados do seu local de origem até seu destino de consumo. Todos esses processos, dentre muitos outros, são diretamente propiciados por meios de transportes. Para muitos, do ponto de vista econômico, político e militar, o transporte é a indústria mais importante do mundo.

O modal rodoviário tem papel fundamental no desenvolvimento social e econômico mundial, principalmente no Brasil, onde os outros modais não possuem tanta força, sua importância é indiscutível, pois mais da metade das cargas são transportadas através das rodovias. Segundo Medina e Motta (2005) as rodovias transportam 60% da carga e 96% dos passageiros no Brasil. Segundo a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2012), rodovias que apresentam algum tipo de comprometimento do pavimento aumentam o consumo de combustível e contribuem para uma maior emissão de poluentes. Uma rodovia em bom estado de conservação pode resultar em até 5% de economia no consumo de combustível em relação a uma rodovia com estado de conservação inadequado.

Indicações gerais mostram que 46% das rodovias do país estão classificadas como: regulares, ruins ou péssimas. Se o pavimento de todas as rodovias tivesse classificação boa ou ótima em 2012, seria possível uma economia de 616 milhões de litros de óleo diesel, ou seja, R\$ 1,29 bilhão e uma redução da emissão de 1,6 megatonelada de CO₂, principal gás de efeito estufa (CNT, 2012).

Outra questão importante que diz respeito às rodovias, são os acidentes que estão diretamente relacionados à qualidade da via, considerando ou não a imprudência dos motoristas, a CNT divulgou que quase 190 mil acidentes ocorreram no ano de 2011 nas rodovias federais policiadas, onde mais de 28 mil pessoas sofreram lesões graves, outras 8,5 mil vítimas fatais. Os custos com estes acidentes

neste ano foram de R\$ 15,7 bilhões, um valor elevado que se aplicado na conservação das rodovias, poderia diminuir o número de vítimas.

A rodovia, e em especial o pavimento, com relação à importância do transporte no complexo da atividade socioeconômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo (de ordem de grandeza, por exemplo, secular) deve apresentar permanentemente um desempenho satisfatório. Este desempenho se traduz na oferta, ao usuário, de condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas – atendendo aos preceitos de otimização do custo total de transporte (DNIT, 2006).

Com a utilização frequente das vias, a degradação dos pavimentos é inevitável, causada principalmente pelo alto volume de tráfego, pois veículos circulam nas rodovias com excesso de carga, o que, segundo Medina e Motta (2005) têm como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga de pontes e viadutos, causando um dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o trincamento por fadiga, que pode ser definido como o dano causado pelas solicitações repetidas do tráfego está entre os tipos mais importantes de defeitos considerados para avaliação de intervenções de restauração. Toda e qualquer intervenção para restauração de pavimentos tem como objetivo preparar a estrutura e a superfície do pavimento para resistir a ação das intempéries e das cargas do tráfego atuantes durante um novo ciclo de vida útil, garantindo a segurança, o conforto e a economia projetada para os usuários da rodovia neste período.

A crescente conscientização do emprego correto dos recursos naturais, da necessidade da preservação ambiental e redução das emissões de poluentes tem impulsionado a busca de alternativas ambientalmente favoráveis. Ainda que os métodos aplicáveis devam obedecer a questões como a maior durabilidade e a preservação das rodovias, ao tratar-se das questões ambientais com seu devido merecimento, estes métodos já podem ser enquadrados à frente dos demais. Com isso, os métodos de reciclagem de pavimentos têm ganhado a simpatia dos órgãos de gestão e da sociedade, por serem alternativas técnicas politicamente corretas e economicamente viáveis.

Os processos construtivos de rodovias tem característica de apresentar alto consumo de recursos naturais, tanto materiais quanto energéticos, o que vai contra a ideia da sociedade no que diz respeito à conservação do meio natural em que vivemos. E é na busca de alternativas a este cenário que entram os conceitos de reciclagem, inseridos na amplitude da sustentabilidade ambiental e aplicado às tecnologias de pavimentação, visando atender às demandas da civilização por transporte rodoviário e minimizando a agressão ao meio ambiente.

O consumo de cerca de 1,52 bilhões de toneladas de agregados virgens e 80 milhões de toneladas de betume para a produção de 1,6 bilhões de toneladas de asfalto em todo o mundo revela a importância da abordagem ambiental sustentável em termos de efeitos ambientais e consumo de recursos naturais de forma sustentável. A difusão da reciclagem de pavimentos tem um potencial econômico de aproximadamente um bilhão por ano. Isso só será possível com a aplicação de processos corretos para reciclar o material asfáltico fresado, não desperdiçando-o e utilizando técnicas eficazes. Desta forma, a resultante de efeitos ambientais e do consumo de recursos naturais em processos de produção de pavimentos asfálticos irá minimizar (GENCER *et al.*, 2012).

O termo “Reciclagem” expressa um conceito fixado no pensamento da população como uma prática correta. Além disso, a reciclagem de materiais de construção rodoviária, como a utilização de material fresado, também é economicamente viável, porque racionaliza, simplifica e agiliza a logística da obra de restauração de uma rodovia.

Segundo Bonfim (2011), entre diversos tipos de reciclagem de pavimentos existentes, a fresagem é o procedimento aplicado para recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. O método possibilita a reobtenção dos agregados em forma granular, mesmo que envoltos por ligante envelhecido, em função do desbaste da camada, com sua granulometria alterada.

Com o passar dos anos cada vez mais pesquisas sobre reciclagem de pavimentos têm sido elaboradas. Ao tratar da reutilização dos materiais disponíveis,

como o material asfáltico fresado, e tentar encontrar métodos eficazes de aplicação, surgem outros componentes que podem se tornar importantes.

Neste contexto, o presente relatório técnico, produto final da pesquisa RDT/ANTT, apresenta os resultados do cumprimento dos objetivos e metas da pesquisa “*Reciclagem de pavimentos flexíveis: estudo da estabilização química e granulométrica de material fresado para uso como camada de pavimento*” envolvendo a Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A - CONCEPA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estabilização de solos

O solo natural é um material complexo e variável, mas devido sua disponibilidade universal e seu baixo custo, ele oferece grandes variedades de utilização como um material de engenharia. Para que um solo específico seja adequado para utilização na construção, Ingles e Metcalf (1972) relatam que decisões fundamentais devem ser tomadas: aceitar o material local como ele é e projetar com padrões suficientes para que possa atender as restrições impostas por sua qualidade; remover o material do local e substituir por um material de qualidade superior ou ainda alterar as propriedades do solo existente a fim de criar um material capaz de suportar as exigências para determinada utilização, a melhoria de solos.

Van Impe (1989) fala sobre a melhoria de solos como sendo a técnica mais antiga e também mais intrigante de todos os métodos de execução comuns em engenharia civil. A mais de 3000 anos atrás, a melhoria dos solos já era utilizada na construção de templos da Babilônia e pelos Chineses. Estes últimos utilizavam bambu, madeira ou palha para reforçar o solo. O ideograma chinês para o termo “engenharia civil” significa exatamente “solo e madeira”.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), desde os primórdios da construção de estradas, foi reconhecido que para transportar o tráfego, a superfície de uma estrada tem de ser mecanicamente estável, isto é, resistente às cargas que lhe são impostas. A estabilidade de uma estrada depende da resistência do material selecionado, adequadamente compactado e drenado. Os autores citam que a estabilidade mecânica também depende em sua grande maioria dos materiais utilizados, onde qualquer material bem compactado aumenta sua densidade, tornando mais resistente. A estabilidade também depende de disposição adequada de drenagem para impedir a penetração de água, sendo impossível superestimar a importância da drenagem e

da compactação em qualquer construção com materiais terreiros, onde a estrutura é necessária para o transporte de cargas.

Para Ingles e Metcalf (1972), a questão sobre a alteração das propriedades do solo para satisfazer as necessidades específicas da engenharia, é conhecida como estabilização de solos.

Vargas (1977) denomina como estabilização dos solos o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência estável às cargas, à erosão ou ao desgaste, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confiram uma coesão por cimentação ou aglutinação dos grãos.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), as propriedades de um solo podem ser alteradas de várias maneiras, entre as quais estão incluídos os tratamentos químicos, térmicos, mecânicos e de outros meios. Também deve ser reconhecido que a estabilização não é necessariamente uma solução 100% eficiente pela qual cada propriedade do solo é alterada para melhor. O uso correto exige reconhecimento de quais as propriedades do solo devem ser melhoradas, e esta exigência específica de engenharia é fator importante na decisão de estabilizar ou não.

A estabilização em pavimentos é direcionada, além do subleito, as camadas sob o revestimento, como bases e sub-bases. Comentando um pouco sobre estas camadas, Yoder e Witczak (1975) definem uma camada de base como àquela que se encontra imediatamente abaixo da superfície de desgaste de um pavimento, e a sub-base é uma camada de material entre a base e o subleito (ou camadas inferiores). Camadas de base podem ser construídas de fragmentos de pedra, escórias, solo-agregados, materiais granulares tratados com cimento, entre outros. No caso de pavimentos asfálticos, a camada de base encontra-se perto da superfície, por conseguinte, tem de possuir elevada resistência de deformação, a fim de resistir às altas pressões que lhe são impostas. Sendo assim estas camadas podem ser executadas com algum tipo de estabilização para melhorar seu desempenho.

Van Impe (1989) denomina sua obra como “*state of the art*” (estado da arte) em técnicas de melhoria do solo, onde os seguintes grupos são distinguidos:

- Técnicas de melhoria de solo temporárias: limitada ao período de construção;
- Melhoramento do solo permanente: técnicas são aplicadas para melhorar o solo natural em si, sem a adição de materiais;
- Melhoria permanente do solo com a adição de materiais.

Yoder e Witczak (1975) comentam que como em quase todos os projetos de engenharia a economia é a principal questão, se justifica muito determinar os benefícios do processo de estabilização, sendo necessário que tenha em mente a finalidade do processo para que possa selecionar corretamente o tipo de estabilização a utilizar. Os autores ainda explanam que em alguns casos onde pode-se necessitar de um processo de estabilização, como para melhorar subleitos e assim reduzir a espessura desejada do pavimento; também quando há limitações em materiais de base, como exemplo de alta plasticidade, estabilizando com cal ou cimento Portland para redução deste índice e estabilizações com substâncias químicas para controle de umidade, seja esta alta ou baixa.

Ingles e Metcalf (1972) comentam que as principais propriedades de um solo com as quais deve haver preocupações na construção são, a estabilidade de volume, resistências, permeabilidade e durabilidade. Embora os tratamentos de correção disponham para melhorar mais de um desses fatores ao mesmo tempo, é importante que os projetistas analisem cada um individualmente antes de englobá-los. E assim como já citado anteriormente, Ingles e Metcalf também citam que a estabilização deve ser considerada não só em termos de melhoria, mas também como uma medida preventiva contra situações adversas que possam ocorrer durante as execuções e durante toda vida da estrutura.

Mota e Bueno (2003) apresentam uma pesquisa (Figura 1) realizada junto à comunidade geotécnica brasileira acerca das técnicas de melhoria de solos conhecidas e aplicadas no território nacional. Constatou-se uma deficiência no

conhecimento e uso de diversos métodos amplamente utilizados em outros países, demonstrando a necessidade na difusão de informações destas técnicas. Uma vez que algumas daquelas que não estão sendo utilizadas podem ter aplicação bastante promissora para os solos brasileiros.

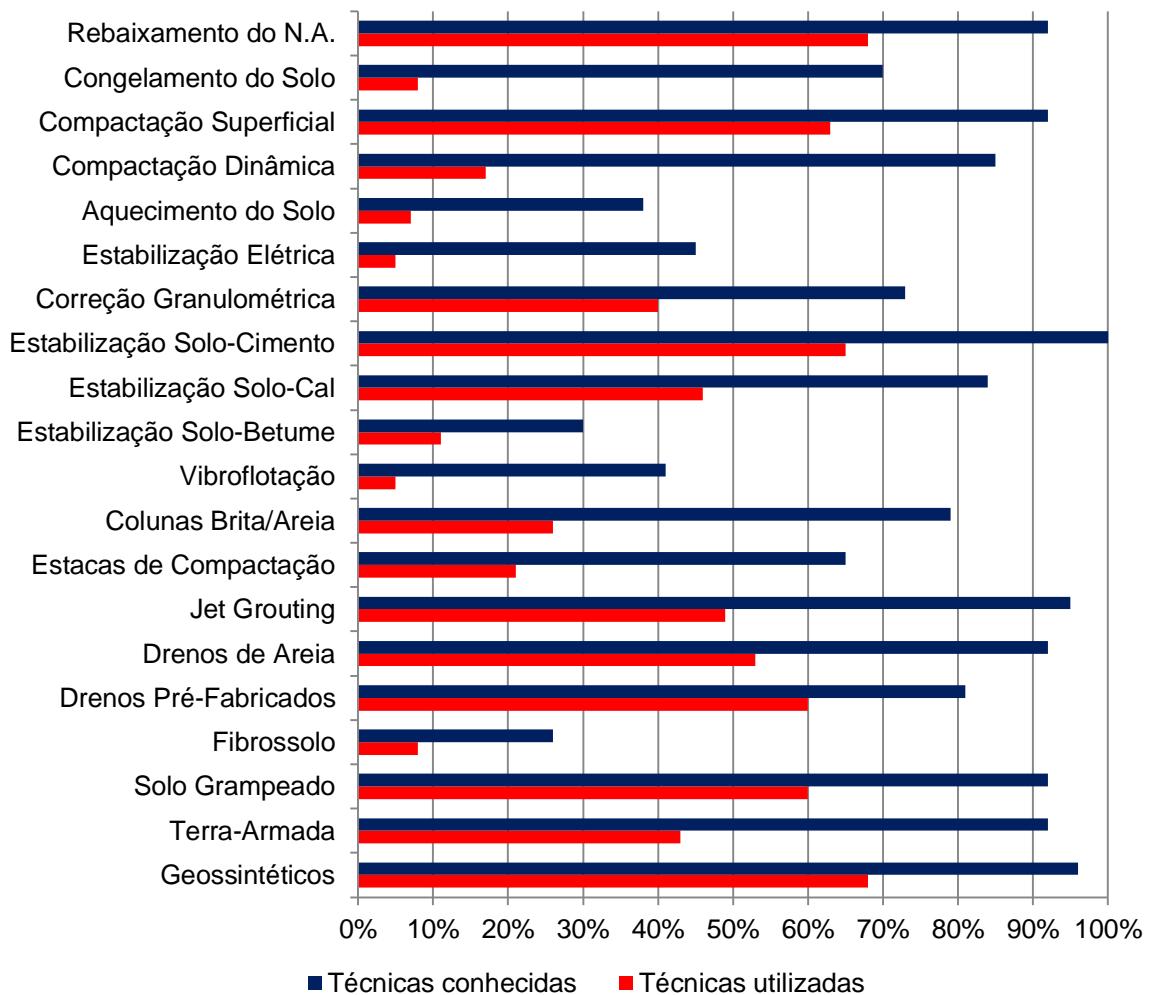


Figura 1: Panorama do conhecimento e utilização de melhoria de solos no Brasil

Fonte: Adaptado de Mota e Bueno (2003)

2.1.1. Estabilização granulométrica

Segundo Vargas (1977), muitas vezes não é possível uma simples correção do material a ser utilizado, mesmo que se disponha de solos em que predominam

pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Então se vê necessário a composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada.

Para Yoder e Witczak (1975), a estabilidade de uma mistura depende da forma e do tamanho das partículas, sua distribuição granulométrica, densidade relativa, fricção interna e da coesão. Um material granular concebido para a máxima estabilidade deve possuir fricção interna alta para resistir à deformação imposta pelas cargas. Destes fatores, a distribuição granulométrica e a proporção de finos para a fração de agregados graúdos é considerada a mais importante (Figura 2).

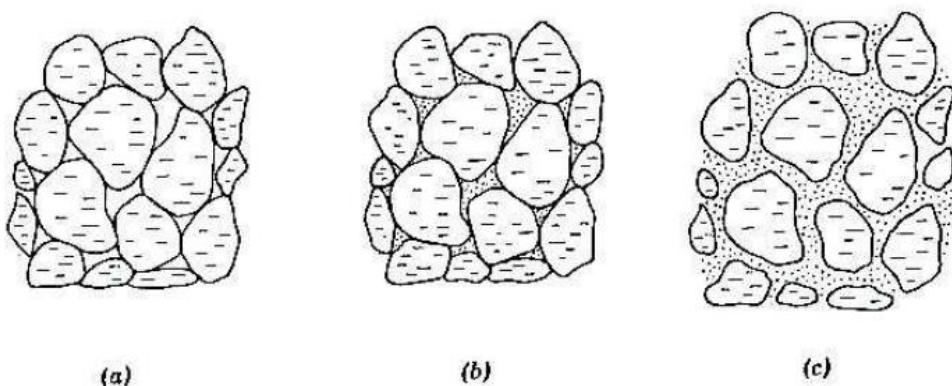


Figura 2: Distribuição granulométrica e proporção de finos

Fonte: Yoder e Witczak (1975)

(a) Uma mistura de agregados que contém pouco ou nada de material fino e ganha a sua estabilidade a partir do contato grão-a-grão. Um agregado que não contém finos normalmente tem uma densidade relativamente baixa, mas é permeável e não suscetíveis às baixas temperaturas. Por não ser coesivo é de difícil manuseio para construção;

(b) Mistura que contém finos suficientes para preencher todos os espaços vazios entre os grãos, ganhando sua força pelo contato entre os grãos, mas com maior resistência ao cisalhamento. A sua densidade é alta e pouco menos

permeável que (a). Seu manuseio é de moderada dificuldade, mas é ideal do ponto de vista da estabilidade.

(c) Esta contém uma grande quantidade de finos e não tem qualquer contato entre os grãos maiores, o agregado "flutua" no solo. A sua densidade é baixa e a estabilidade é fortemente afetada na presença de água. O material é bastante fácil de manusear durante a construção e compacta-se facilmente.

Com essa apresentação de Yoder e Witczak torna-se evidente que a estabilidade de misturas é dependente da distribuição granulométrica, de forma que a demasiada ou nenhuma presença de finos prejudica o desempenho da mistura.

Silva (2012) realizou ensaios de compactação e ISC - Índice de Suporte Califórnia para misturas estabilizadas granulometricamente com material fresado e agregados virgens. As misturas adotadas de material fresado/pó-de-pedra foram de 30/70% e 70/30%, onde para o ISC foram adotados diversos pontos da curva de compactação, desta forma os resultados de ISC encontrados em laboratório foram de 56% a 70% (mistura 30/70%) e 34% a 45% (mistura 70/30%). Mostrando valores dentro dos mínimos aceitados pelas normas DNER-ES 301/97 e DNER-ES 303/97, que tratam sobre sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente.

2.1.2. Estabilização química

Segundo Ingles e Metcalf (1972), quando um material ou uma combinação de materiais com estabilidade mecânica adequada não pode ser obtida, ou onde a resistência deve ser melhorada, pode ser aconselhável considerar a estabilização por meio da adição de estabilizantes químicos.

Yoder e Witczak (1975) citam alguns tipos de aditivos que podem ser utilizados para estabilização, como os agentes de cimentação, modificadores, impermeabilizantes, agentes de retenção de água e produtos químicos diversos. Os

comportamentos de cada uma dessas misturas são bem diferentes, cada um tem o seu uso particular, e, inversamente, cada um tem suas próprias limitações.

Os principais materiais de cimentação que podem ser usados incluem o cimento Portland, cal, cinzas volantes e materiais betuminosos (INGLES E METCALF, 1972; YODER E WITCZAK, 1975). O cimento Portland é o agente cimentante utilizado em maior escala e com maior sucesso. Ele pode ser utilizado para camadas de base e de sub-bases de todos os tipos. Sua aplicação pode ser em solos granulares, solos siltosos e argilas, mas não pode ser utilizado em materiais orgânicos, pois estes podem perturbar a hidratação do cimento (YODER E WITCZAK, 1975).

Outro agente de cimentação citado por Yoder e Witczak (1975), o qual é muitas vezes utilizado, é a cal hidratada. A cal aumenta a força do solo, principalmente pela ação pozolânica. Este material é mais eficiente quando utilizado em materiais granulares e argilas, a quantidade necessária para uma boa hidratação geralmente é relativamente baixa. As cinzas volantes também citadas, geralmente possuem teores elevados de sílica e alumina, além de menores teores de ferro e cálcio, portanto, a adição de cal em solos para a utilização das cinzas volantes acelera a ação pozolânica.

Para Van Impe (1989), juntamente com compactações, a melhoria do solo pode ser intensificada por uma forte mistura de cimento ou cal. Se na estabilização com cimento, a mistura intensiva e a compactação do solo úmido com pó de cimento seco dá bons resultados especialmente em solos de menos coesão, em solos coesivos como argila as vantagens podem ser obtidas por adição de cal durante a compactação da superfície. O princípio de melhoramento do solo usando reação química entre as partículas do solo, a água dos poros e os materiais adicionados é quase análoga, no caso destes materiais a pouco citados.

Segundo Dellabianca (2004), a incorporação de aditivos químicos como a cal, o cimento e a emulsão asfáltica, tem sido empregada na reciclagem de pavimentos flexíveis, desde meados da década de 40. Exemplos de revestimento e base reciclados com algum tipo de estabilizante químico podem ser encontrados em vários

estados americanos tais como Arkansas, Califórnia, Flórida, Nevada e Pensilvânia, entre outros.

Ingles e Metcalf (1972) falam sobre a utilização de aditivos secundários para melhorar o efeito do cimento em diferentes solos, e que além do uso de cal, para auxiliar a pulverização, e do cloreto de cálcio, para neutralizar a matéria orgânica. As cinzas volantes também podem ser usadas com sucesso, sendo materiais sustentáveis para substituir parte do cimento Portland, agindo como pozolanas.

No Brasil, a reciclagem de base e sub-base com estabilizantes químicos vem ganhando bastante espaço, ultimamente. Porém, observa-se ainda certa carência quanto a estudos relacionados ao comportamento dessas misturas recicladas, uma vez que os solos brasileiros e as condições climáticas apresentam peculiaridades que devem ser consideradas.

2.1.2.1. Estabilização química com cimento

Vargas (1977) conceitua solo-cimento como o produto de uma mistura compactada de solo com cimento e água, produzindo assim um novo material, com uma alta resistência, baixa deformabilidade, durabilidade a fatores agressores como a água, aos efeitos térmicos, e as baixas temperaturas, sendo assim, muito aplicada em obras de engenharia civil.

Ingles e Metcalf (1972) já citavam em sua obra que a estabilização química com cimento já tinha ampla utilização na construção de estradas naquela época. A técnica de utilização do cimento envolve, geralmente, o espalhamento do cimento sobre a superfície do solo, mistura e posterior compactação na devida umidade. Os autores comentam que a adição mesmo em pequenas quantidades, até 2%, modificam as propriedades do solo, enquanto que grandes quantidades, entre 5 e 10%, modificam radicalmente as propriedades, e, dependendo da mistura, alguns consideram um determinado tipo de “concreto magro”.

Para Yoder e Witczak (1975) a estabilização de solo com cimento consiste na adição do cimento Portland com um determinado tipo de solo, permitindo que a mistura endureça pela hidratação do cimento. Os fatores que afetam as propriedades físicas da mistura incluem o tipo de solo, a quantidade de cimento, o grau da mistura, o tempo de cura e a densidade seca da mistura compactada. Os autores salientam a questão do tempo de cura da mistura, sendo essencial a cura na presença de água, antes da abertura do tráfego. Para época, foi citada a ampla utilização da mistura de solo-cimento para restauração de estradas, onde o cascalho era escarificado, estabilizado com cimento, e então compactado. Este tipo de estabilização, sempre foi de grande utilização nos Estados Unidos para bases e subbases em estradas secundárias, e ainda citam ser muito difícil encontrar resultados de RCS entre 6,5 e 13,5 MPa.

Yoder e Witczak (1975) citam que a quantidade de cimento requerida para estabilizar um material granular depende da quantidade e qualidade dos finos contidos, bem como a densidade final da mistura compactada. Os valores típicos variam entre 2 e 6% em peso do material final compactado.

Segundo Guyer *et al.* (2011), a estabilização com cimento Portland pode ser usada tanto para modificar e melhorar a qualidade do solo, ou para transformar o solo em uma massa cimentada com maior resistência e durabilidade. A quantidade de cimento usado dependerá do fato de que o solo é para ser modificado ou estabilizado.

De acordo com o Instituto Americano de Concreto, *American Concrete Institute* (1997), desde 1915, quando uma Rua em Sarasota na Flórida foi construída utilizando uma mistura de conchas, areia e cimento portland misturados com um arado e compactado, o solo-cimento tornou-se uma das formas mais usadas de estabilização de solos para rodovias. Mais de 100.000 quilômetros de pavimento com 7,2 m de largura utilizando solo-cimento haviam sido construídos até 1997.

Silva e Miranda Junior (2000) realizaram no estado de Minas Gerais, obras de recuperação da BR-381 com reciclagem de camada betuminosa estabilizada com cimento como alternativa de sub-base. Na ocasião foi utilizada uma percentagem de 4,2% de cimento incorporado ao material fresado da capa asfáltica. Este valor foi

obtido com base em resultados de ensaios de compressão simples, realizados na mistura, para diferentes variações de teor de cimento. Na realização dos ensaios de RCS trabalhou-se com corpos de prova cujas dimensões apresentavam altura de 17,8 cm e diâmetro de 15,2 cm. O tempo de cura adotado foi de seis dias, em câmara úmida. Nos resultados encontrados foram verificados ganhos consideráveis de resistência em função da adição do cimento, conforme o aumento do teor.

Taha et al. (2002), realizaram uma avaliação laboratorial de material fresado e agregados virgens estabilizados com cimento. Os experimentos foram feitos para diferentes misturas de fresado/agregado virgem: 100/0; 90/10; 80/20; 70/30 e 0/100%. As amostras preparadas utilizando 0, 3, 5, e 7% de cimento Portland CP-I, curados durante 3, 7 e 28 dias para ensaios RCS e MR. Os resultados apresentados mostram que o fresado puro (100%) não é recomendado para utilização como um material de base, a menos que estabilizado com cimento, e as misturas de fresado/agregados virgens estabilizados com cimento mostram-se como boa alternativa de utilização na construção de bases rodoviárias.

De acordo com Dellabianca (2004), as propriedades mecânicas das misturas compactadas de solo e cimento devem ser consideradas, pois a importância da compactação está ligada não apenas ao grau de compactação, mas também ao tempo, uma vez que se realizada após a hidratação do cimento apresenta resultados ineficientes. O tempo de cura influencia positivamente no ganho dessa resistência, o que interfere até mesmo no tipo de cimento utilizado na mistura.

2.2. Reciclagem de pavimentos

Para Bernucci et al. (2008) reciclagem de pavimentos é o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP

ou EAP novos, quando necessários, e também com adição de aglomerantes hidráulicos.

Segundo publicação da *Federal Highway Administration - FHWA* (1996), a reutilização ou reciclagem da estrutura de um pavimento deteriorado não é nada novo. As primeiras formas de reciclagem de pavimentos foram datadas em meados de 1915 nos Estados Unidos. No entanto, a reciclagem de pavimentos asfálticos em sua forma atual ocorreu pela primeira vez em meados dos anos 1970, quando o interesse na reciclagem foi provocado pela inflação dos preços de construção e pelo embargo do petróleo pela *Organization of the Petroleum Exporting Countries – OPEC*.

Em resposta a essas pressões econômicas, a FHWA iniciou o Projeto de Demonstração 39 – Reciclagem de Pavimentos Asfálticos (*Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling Pavements*), em Junho de 1976.

O DP 39, como foi chamado, mostrava que a reciclagem de pavimentos asfálticos era uma técnica de reabilitação tecnicamente viável, e estimava que o uso do *Recycled/Reclaimed Asphalt Pavement – RAP* (como é chamado o material fresado internacionalmente) equivaleria a aproximadamente 15% da produção total de misturas asfálticas à quente, nos anos 1980. Com isso, esperava-se que a maior parte dos materiais asfálticos removidos seriam reutilizados na construção de novos pavimentos.

De acordo com Brosseau (2011), atualmente os materiais mais reciclados nos Estados Unidos são as misturas asfálticas, com mais de 80 milhões toneladas por ano. Isso representa aproximadamente duas vezes mais que os quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio, onde juntos somam 40 milhões de toneladas recicladas por ano.

Na Europa, a situação é variável, como indicado na tabela 1. Na Alemanha e na Holanda, os princípios de reciclagem são considerados como um modo de vida a 20 anos, diferentemente dos países do sul da Europa (Itália, Espanha, Grécia etc.), que são muito menos preocupados com estas questões.

Tabela 1: Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) na Europa

CBUQ	Alemanha	França	Itália	Holanda	Outros	Total
	55	40	35	10	180	320
Fresado disponível	14	7	12	5	12	50
Fresado utilizado em CBUQ	11	3	2	3	2	25
Taxa de fresado utilizado (%)	80	42	17	70	17	50

Fonte: Adaptado de EAPA (2010) apud Brosseau (2011)

Bresseaud (2011) cita ainda o caso da França especificamente, onde pesquisas realizadas em 2007 e 2010 mostraram que houve um aumento significativo da proporção de misturas asfálticas antigas recuperadas e recicladas que foram empregadas em novas misturas a quente, passando de 23 para 42% em apenas três anos. Isso reflete a vontade de todos os envolvidos no âmbito rodoviário que se engajaram voluntariamente na reciclagem.

No Brasil, a reciclagem foi empregada pela primeira vez em 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, onde o material asfáltico era removido das vias urbanas com marteletes e transportado até usinas para serem misturados novamente (CASTRO, 2003).

Em 1980 teve-se o incentivo do DNER no processo de reciclagem “*in situ*”, o qual consistia da utilização de equipamentos que fresavam o revestimento, processavam a mistura do material fresado e promoviam o seu espalhamento no local, por dois métodos (DNER, 1998):

- Método Marine: Empregava a planta móvel recicladora Marine A.R.T. 220, de fabricação italiana, onde a fresagem era realizada a frio. Essa técnica foi utilizada para a restauração de cerca de 80 km da rodovia Presidente Dutra no estado do Rio de Janeiro.
- Método Wirtgen: Utilizava a planta móvel "remixer" da Wirtgen, onde a fresagem era realizada após o aquecimento da superfície do revestimento. A técnica

foi adotada pelo DNER na Rodovia Presidente Dutra, em 1986, em cerca de 140 km da rodovia nas proximidades de Taubaté.

A primeira experiência brasileira de reciclagem de uma rodovia, após incentivos do DNER em 1980, ocorreu em 1985, em um trecho de 100 km da Rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas. Os autores citam que neste caso foi executada a fresagem do revestimento e posterior reciclagem em usina drum mixer (CAMPOS, 1987; MELLO; CAMERATO, 1995, apud DAVID, 2006).

Na década de 90, de acordo com Bonfim e Domingues (1995), foi realizada a primeira obra de reciclagem *in situ* a frio em área urbana no país, em um segmento comercial da Via Anchieta, São Paulo.

Já segundo Pinto et al. (1995 apud David, 2006), a reciclagem a frio *in situ* foi realizada pela primeira vez no Brasil pelo DNER em 1993, na BR-393, Rio de Janeiro, com a utilização de emulsão especial.

Em 2004, foi executado um trecho experimental na rodovia SP-147, entre Piracicaba e Limeira. Devido ao sucesso obtido, esta tecnologia foi escolhida para a restauração de 35 km desta rodovia. O projeto incluiu, entre outros, a avaliação da viabilidade de aplicação do sistema, projeto de mistura, testes de desempenho em amostras preparadas no laboratório e uma emulsão especialmente formulada para garantir coesão, rigidez inicial e elevada durabilidade. (LIBERATORI; CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

Sachet e Gonçalves (2008) apresentam uma proposta de trabalho sobre o controle tecnológico de reciclagem de pavimentos a frio *in situ* de bases granulares. Aplicados em trechos rodoviários de monitoramento no Estado do Rio Grande do Sul no ano de 2006, destacando para a verificação do ISC *in situ* através do uso do *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). Os resultados obtidos mostraram-se positivos para verificação da capacidade de suporte de bases granulares recicladas e para apontamentos de heterogeneidades construtivas localizadas.

Oliveira, Baran e Schmidt (2010), apresentam uma análise de projeto efetuada onde foi adotada a reciclagem profunda de pavimentos como solução de restauração para alguns segmentos da BR-282, entre os municípios de Florianópolis e Lages em Santa Catarina, totalizando aproximadamente 215 km. Para 76 km, onde a situação era mais crítica, foi constatado que a reciclagem profunda com correção granulométrica e adição de cimento era a alternativa mais adequada. Os autores também reforçam que a economia da reciclagem é realmente evidente e tem desempenho satisfatório.

Os trabalhos de Trichês, Lorena e Santos (2010) e Trichês e Santos (2013) mostram a avaliação do desempenho da reciclagem com a adição de cimento empregada na restauração da rodovia SC-303 (SC-150), trecho BR-282 entre os municípios de Joaçaba e Capinzal, Santa Catarina. O trecho de 30 km apresentava comprometimento total do revestimento e a reciclagem foi executada entre os anos de 2006 e 2007. A reciclagem contemplou em 15% de adição de agregados virgens, adição de 3% em peso de cimento, trituração de 8 cm de revestimento e 12 cm da camada de base, tratamento superficial simples e execução de revestimento em asfalto-borracha com 4 cm de espessura. Os resultados de monitoramentos durante os anos mostram que a reciclagem propiciou uma redução significativa na deflexão do pavimento existente e a homogeneização de sua capacidade estrutural. Os valores dos módulos retro analisados da camada de base foram considerados baixos pelos autores. Após 5 anos de abertura ao tráfego, 11,3% do revestimento precisa ser recuperado, valor considerado elevado pelos autores, indicando que a rodovia não atenderá ao período de projeto pelo critério de porcentagem de área trincada. Todavia, salientam que o baixo nível das trilhas de roda é indicativo que a camada reciclada não estaria trincada.

Pinto, Cervo e Pereira (2012), apresentam uma forma de reutilização do material fresado em acostamentos de rodovias, como agente regulador e nivelador. O estudo realizado utilizou o material sem alterações ou adições de insumos, onde da mesma forma possibilitava o reaproveitamento, além de destinar um local adequado para o resíduo e reduzir custos na manutenção de rodovias. O material analisado apresentou Abrasão Los Angeles de 36,67% e ISC de 38%. Os resultados obtidos indicam que o agregado fresado não é propício para usar em base de pavimentos na

faixa de rolamento, porém apresenta resultados bastante satisfatórios para reutilização nos acostamentos que recebe solicitações bem inferiores, devendo assim ponderar os locais de emprego e sua função estrutural.

Paiva e Oliveira (2014) desenvolveram uma investigação de laboratório usando duas amostras de fresado, uma com ligante convencional e outra com asfalto borracha para avaliar a resistência à fadiga destes materiais reciclados estabilizados com 3% em peso de cimento. Os materiais testados sofreram influência do percentual de asfalto fresado e do nível de atividade do CAP na resistência à fadiga. Os autores finalizam que materiais reciclados do pavimento com percentuais de fresado de borracha acima de 30% em peso são prejudiciais ao comportamento da camada reciclada. De igual modo se deve fazer o mesmo para pavimentos com características similares ao fresado de ligante convencional, cujo percentual máximo de asfalto fresado seria de 50% em peso.

Bessa et al. (2014) apresentam um trabalho voltado à técnica de reciclagem à frio na reutilização do material fresado. Foi adotada compactação Marshall para confecção das amostras, utilizando 2, 3 e 4% de emulsão asfáltica, ainda acrescidos 3% de água e 1% de cimento. Os autores realizaram ensaio de MR e RT, verificaram também a resistência ao dano por umidade induzida das amostras com teores variáveis de emulsão. Os resultados apresentados mostram que o aumento no teor de emulsão levou a uma pequena queda nos valores de MR e a um aumento nos valores de RT. O ensaio de dano por umidade revela maiores perdas em suas propriedades nas amostras com maior teor de emulsão asfáltica. Ainda, concluiu que alterações do tipo e do teor dos ligantes hidráulicos não apresentou variações significativas nos resultados mecânicos.

2.2.1. Conceitos

De acordo com a Associação de Reabilitação e Reciclagem de Pavimentos Asfálticos dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA*), a reciclagem dos materiais de um pavimento já existente para produzir novos

materiais de pavimentação, resulta em considerável economia de recursos, dinheiro e energia. Ao mesmo tempo auxilia na solução de problemas de disposição do que seriam os entulhos decorrentes de processos de restauração. Além disso, devido à reutilização dos materiais existentes, a geometria e espessura originais do pavimento podem ser mantidas durante o processo construtivo.

Segundo a ARRA (1997), o reaproveitamento dos materiais do pavimento para produzir um novo pavimento resulta em uma redução considerável de materiais, custo e energia. Ao mesmo tempo, a reciclagem do pavimento deteriorado também contribui para solucionar problemas de disposição do material na pista, pois o reuso do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento. Em alguns casos, a interrupção do tráfego é menor do que em outras técnicas de reabilitação. Assim, a técnica de reciclagem tem como vantagens específicas:

- Redução de custos da construção;
- Aproveitamento de agregados e ligantes;
- Preservação da geometria existente;
- Preservação do meio ambiente;
- Economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração da matéria prima;
- Menor tempo de execução.

No Brasil, o Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006) aborda a reciclagem como uma boa forma de solução para diversos problemas de pavimentação e expõe as técnicas de aplicação de acordo com alguns critérios estabelecidos pré-projeto, são eles:

- Observação dos defeitos do pavimento;
- Determinação das causas prováveis dos defeitos, baseado em estudos laboratoriais e de campo;
- Informações de projeto e histórico das intervenções de conservação;
- Custos;
- Histórico do desempenho do pavimento;
- Restrições quanto à geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- Fatores ambientais;
- Tráfego.

A Figura 3 a seguir, adaptada de Bonfim (2011), apresenta uma classificação bem definida dos tipos de reciclagem. A presente revisão foi baseada na classificação de técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos estabelecida pela ARRA (1997). Esta classificação designa as técnicas de acordo com a temperatura com que se dá a mistura (“a quente” ou “a frio”) e também, com o local em que ela é preparada (“em usina” ou “*in situ*”). Além disso, considera também a profundidade do pavimento existente que sofrerá a intervenção.

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	Quando não se mantém as cotas do greide
Quanto ao local de processamento	Em usina <i>In situ</i>	Fixa ou móvel, quente ou frio
	Mista	<i>In situ</i> da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial e CAP	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

Figura 3: Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos

Fonte: Adaptado de BONFIM (2011)

Abaixo estão às cinco técnicas determinadas na classificação que serão explanadas no decorrer deste trabalho:

- Fresagem (*Cold Planing*);
- Reciclagem a Frio *in situ* (*cold in-place recycling*);
- Full Depth Reclamation;
- Reciclagem a quente em usina (*hot recycling*);
- Reciclagem a quente *in situ* (*hot in-place recycling*).

2.3. Técnicas de reciclagem de pavimentos à frio

Reciclagem a frio é o procedimento aplicado para recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. O campo da reciclagem a frio abrange alguns tipos de aplicações, como para camadas relativamente finas, constituídas principalmente de material asfáltico (reciclagem a frio *in situ*), ou para camadas espessas, que incorporam além da camada asfáltica, a camada granular do pavimento, método conhecido como “*full depth reclamation*” (WIRTGEN, 2012).

A reciclagem a frio *in situ*, diferentemente das técnicas de reciclagem a quente, possui atualmente uma importância significativa no cenário nacional, sendo aplicada em maior escala. No âmbito sócio-econômico, a técnica se enquadra como uma maneira racional para resolver problemas de pavimentação de diversas naturezas com eficiência e gastos minimizados de energia, principalmente no caso *in situ*, em que não há necessidade de transporte até usinas estacionárias, economizando energia proveniente dos combustíveis. Não existe também o processo de aquecimento de materiais, o que resulta em economia de recursos e de capital aplicados.

De acordo com a ARRA (1997), entre os métodos de reciclagem a frio, destacam-se a fresagem (*cold planing*) já apresentada anteriormente, a reciclagem a frio *in situ*, que pode ser efetuada de duas formas: com profundidade total (*full depth*), ou profundidade parcial do pavimento. A Figura 4 de Rogge et al. (1993 apud David 2006) traz recomendações da utilização deste processo de reciclagem.

Não se recomenda quando houver:
Problemas de subleito
Incompatibilidade ao volume de tráfego
Falta de adesividade
Excesso de ligante
Condições severas de frio e umidade
Espessuras de revestimento inferiores a 4 cm
Recomenda-se quando houver:
Trincamento
Incompatibilidade ao volume de tráfego
Irregularidade superficial
Necessidade de camada de binder ou base no caso de recapeamento
Necessidade de reabilitação seletiva por faixa de rolamento
Falta de agregados virgens na região

Figura 4: Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio *in situ*

Fonte: ROGGE et al., (1993) apud DAVID (2006)

A PCA – Portland Cement Association (2013) relata sobre a reciclagem profunda com incorporação de cimento. Sendo uma técnica que recicla o material do pavimento asfáltico criando uma nova base estabilizada que será mais rígida, uniforme e resistente à umidade se comparada à base original, resultando em uma camada com maior durabilidade e com menores esforços de manutenção.

A PCA (2013) aponta que os custos deste tipo de reciclagem são normalmente de 25 a 50% menores do que a alternativa convencional de restauração que contemplam serviços de fresagem e recomposição do revestimento existente e posterior aplicação de camadas de reforço em concreto asfáltico. A Figura 5 mostra um comparativo entre o uso de energia e materiais entre a alternativa da implantação de nova base e de base reciclada. Como citado anteriormente, existem cinco técnicas determinadas pela ARRA (1997), onde três destas se enquadram nas técnicas de reciclagem à frio e serão expostas a seguir.

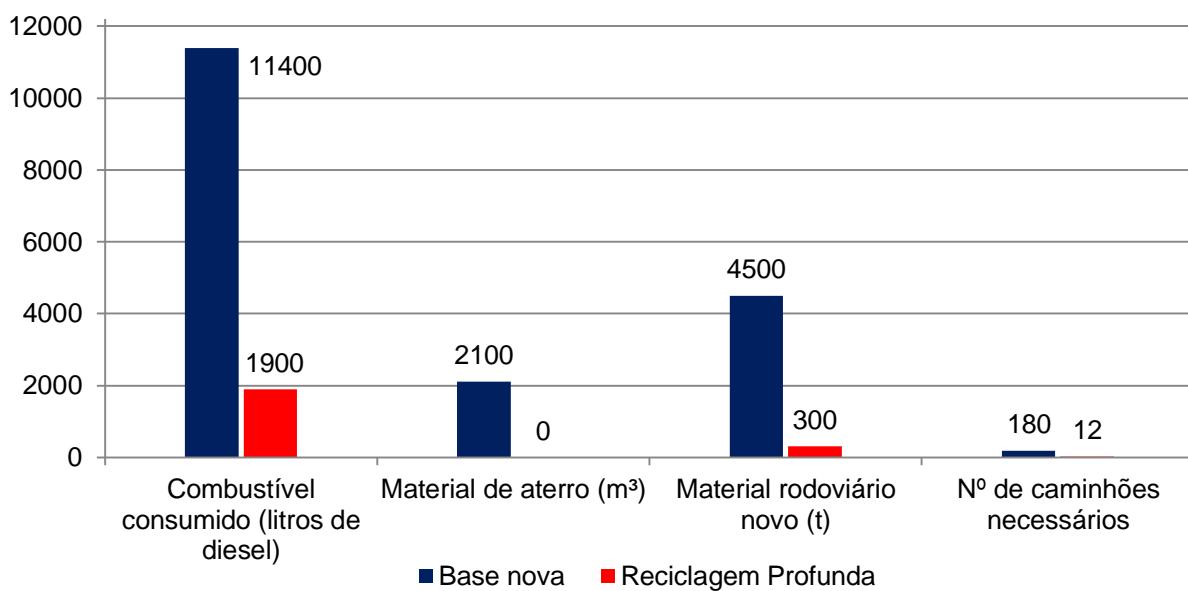


Figura 5: Comparativo de construção de base nova e reciclagem profunda
Fonte: Adaptado de PCA (2013)

2.3.1. Fresagem de pavimentos (cold planing)

Segundo ARRA (1997), o ingresso dos processos de fresagem revolucionou a reciclagem de pavimentos asfálticos. A fresagem possibilita a reobtenção dos agregados em forma granular, mesmo que envoltos por ligante envelhecido e em função do desbaste da camada, com sua granulometria alterada.

A fresagem para restauração de pavimentos originou equipamentos e processos específicos: “*cold milling machine*”, que efetua o desbaste da estrutura por meio simples abrasivo e rotação intensa, e processo a quente, que utiliza o pré-aquecimento da estrutura para facilitar o corte. Assim, a fresagem do pavimento pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura, a frio ou a quente. (BONFIM, 2011)

A fresagem a frio é definida como um método de remoção de pavimentos automaticamente controlada de acordo com a profundidade desejada, com

equipamentos especialmente projetados e desenvolvidos. Também pode ser alcançada uma restauração da superfície para um especificado grau de inclinação, livre de inchaços, trilhas de roda e outras imperfeições (ARRA, 1997).

Com base no exposto, com maior abrangência, pode-se conceituar a fresagem de pavimentos como sendo o corte ou desbaste de uma ou mais camadas de pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando restauração de pavimentos (BONFIM, 2011, p. 20).

2.3.1.1. Métodos aplicativos

A fresagem constitui o princípio do processo de reciclagem de um pavimento, promovendo sua desintegração e ocasionando a formação do *reclaiming asphalt material* (material de asfalto reciclado) termo normalmente aplicado para designar o material fresado de revestimentos asfálticos.

Bonfim (2011), afirma que de maneira resumida que os processos de fresagem podem ser classificados quanto à espessura do corte e à rugosidade resultante na pista. Quanto a espessura de corte há três tipos de fresagem, são elas: fresagem superficial; fresagem rasa e fresagem profunda. São três, também, os tipos de fresagem determinados quando o parâmetro analisado é a rugosidade resultante na pista, sendo: fresagem padrão; fresagem fina e microfresagem.

- **Fresagem: Quanto à espessura do corte**

Fresagem Superficial: Conhecida como fresagem de regularização, é destinada apenas a correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Sendo assim, pode ser dispensado o posterior recapeamento da pista, uma vez que a textura obtida permite o rolamento de forma segura, porém não muito confortável,

executando-se em pontos específicos onde a desagregação do revestimento remanescente acarrete a formação de buracos (BONFIM, 2011).

Fresagem Rasa: A fresagem rasa atinge normalmente as camadas superiores do pavimento, chegando em alguns casos na camada de ligação. Na maioria dos serviços é aplicada a uma profundidade média de corte em torno de 5 cm.

Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. É aplicado, principalmente, em vias urbanas, onde se deseja manter o greide do pavimento com relação aos dispositivos de drenagem superficial e obras de arte correntes. (BONFIM, 2011, p. 22).

Fresagem Profunda: A fresagem profunda é aquela cujo corte atinge níveis consideráveis, podendo atingir as camadas de ligação, de base e até de sub-base do pavimento.

Esse é um procedimento geralmente utilizado em intervenções de reabilitação estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento ou mesmo, por reciclagem e incorporação do revestimento à base. Visando a segurança e o restabelecimento das condições ideais de atuação dos dispositivos de drenagem superficial, esta técnica é utilizada para corrigir o greide original das rodovias (BONFIM, 2011, p.22).

- **Fresagem: Quanto à rugosidade resultante na pista**

Fresagem Padrão: A fresagem padrão (*standard*) resulta do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos. A distância lateral entre os dentes do corte é de aproximadamente 15 mm. A fresagem padrão deve ser seguida da aplicação de uma nova camada de revestimento, devido à rugosidade elevada resultante. (BONFIM, 2011).

Fresagem Fina: Este tipo de fresagem, conhecida como “*fine milling*”, é possibilitada por um menor espaçamento entre os dentes do tambor, aproximadamente 8 mm, resultando sulcos menores e menor rugosidade na pista. (BONFIM, 2011).

“Essa técnica é muito utilizada na regularização das vias, por possibilitar melhores condições de trafegabilidade aos usuários. Em alguns casos, neste tipo de aplicação, pode-se dispensar o posterior recapeamento da pista” (BONFIM, 2011).

Microfresagem: A microfresagem (“*micro milling*”) é resultante de fresagem com cilindro dotado de dentes espaçados lateralmente em aproximadamente 2 a 3mm.

“Consiste na remoção de uma camada muito delgada do revestimento, visando a adequação do perfil longitudinal ou retirada de faixas de sinalização horizontal das pistas, para alteração do layout viário” (BONFIM, 2011).

Ainda segundo Bonfim (2011), os cilindros de microfresagem eram inicialmente disponibilizados apenas para equipamentos de pequeno porte, e os dentes de corte eram de menores dimensões se comparados com os dentes utilizados em outros tipos de fresagem. Importante destacar que neste tipo de fresagem é dispensável a aplicação de uma nova camada de revestimentos.

2.3.1.2. Equipamentos

Para que a fresagem, presente nos processos de reciclagem seja executada com precisão e eficiência, com desempenho satisfatório do pavimento reciclado resultante, o guia de especificações da ARRA (1997) para máquinas fresadoras, determina que estas devam ter alto poder de operação, ser autossuficientes em tração, potência e estabilidade para remover o pavimento até a profundidade especificada.

Especifica-se também que uma fresadora deve ter um sistema automático para controle de elevação e grau de inclinação transversal, para poder executar corretamente a superelevação existente em curvas do traçado. A máquina deve ser equipada com um meio de controlar eficazmente a poeira gerada pela operação de corte. De acordo com a ARRA (1997), há cinco classes de fresadoras:

- Classe I – consiste em triturar o pavimento na medida necessária para remover irregularidades na superfície;
- Classe II – consiste em triturar a superfície até uma profundidade uniforme;
- Classe III – consiste em triturar a superfície até uma profundidade, dando a ela uma inclinação transversal e/ou disposições especiais;
- Classe IV – consiste na fresagem de toda profundidade do pavimento existente, a partir do sub-leito ou da base subjacente;
- Classe V – consiste na moagem/fresagem a uma profundidade variável do pavimento existente e/ou disposições especiais.

Os equipamentos possuem alguns componentes importantes, como o cilindro fresador e os dentes de corte. O cilindro fresador é um tambor rígido construído em aço especial, no qual os dentes de corte são fixados. Também é conhecido como rolo fresador ou tambor fresador. O sistema de corte do equipamento é basicamente o mesmo para todos os modelos. O cilindro gira em alta rotação e, quando colocado para cortar, inicia o desbaste da espessura desejada no pavimento.

Os dentes de corte são as pontas de ataque que agem diretamente no pavimento, responsáveis pelo desbaste. São peças constituídas por corpo forjado em aço, com ponta de material mais duro, de carboneto de tungstênio e cobalto.

A ARRA recomenda que a superfície resultante de operações de fresagem a frio devem possuir uniformidade, estrias longitudinais descontínuas ou outro padrão uniforme. As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, uma máquina fresadora e uma superfície resultante de fresagem a frio.

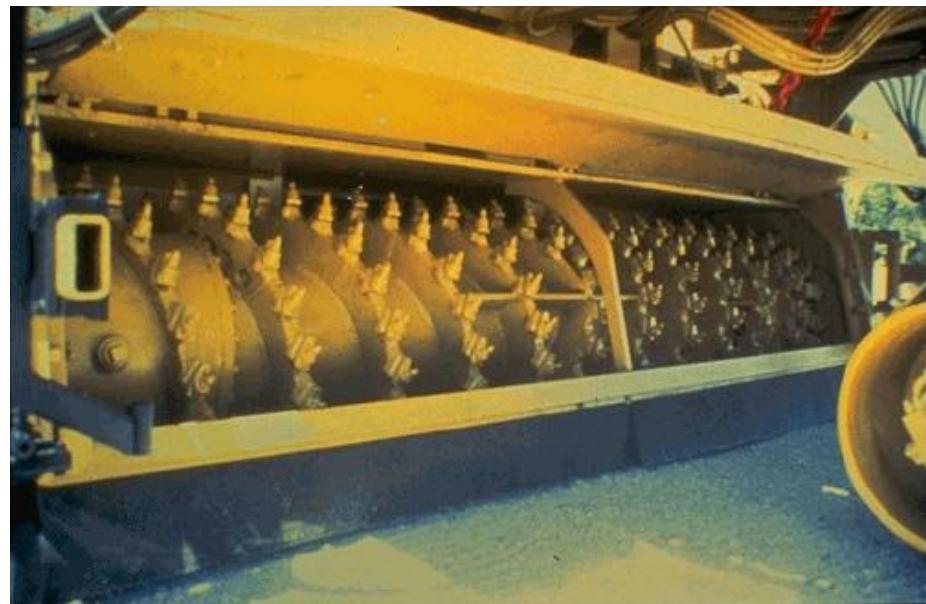


Figura 6: Vista do cilindro fresador de uma máquina fresadora

Fonte: ARRA (1997)



Figura 7: Superfície resultante de fresagem a frio

Fonte: ARRA (1997)

Bonfim (2011) em sua obra divide os equipamentos de fresagem quanto ao seu tamanho. São três as classes determinadas: Equipamentos de fresagem de pequeno, médio e grande porte.

Equipamentos de Pequeno Porte:

De acordo com Bonfim (2011), os equipamentos de pequeno porte (Figura 8) são destinados à fresagem de arremates junto às diversas interferências existentes nos pavimentos, onde anteriormente havia uma grande dificuldade em realizar esses serviços específicos. São utilizados principalmente para execução de pequenas intervenções como remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro, junto à sarjetões, entre outros. Por terem um tamanho menor, são mais versáteis, facilitando os serviços em vias urbanas.



Figura 8: Fresadora W 35 DC da Wirtgen

Fonte: Wirtgen (2012)

Equipamentos de Médio Porte:

Os equipamentos de médio porte (Figura 9) são destinados à execução de fresagem de pequenas e de grandes áreas. Se a frente de serviço oferece boas condições, sem muitas interrupções e quando utilizado em ruas estreitas, apresentam

boa versatilidade nas manobras. Possuem correia transportadora para carregamento do material fresado em caminhões basculantes simultaneamente à execução da fresagem (BONFIM, 2011).



Figura 9: Fresadora W 1000 da Wirtgen

Fonte: Wirtgen (2012)

Equipamentos de Grande Porte:

Os equipamentos de grande porte (Figura 10) são destinados a fresagem de grandes áreas, por possuírem cilindros fresadores maiores que os equipamentos de médio e pequeno porte. São indicados para locais que oferecem perfeitas condições de trabalho, sem muita interferência, como ruas largas, grandes avenidas e principalmente rodovias. Por seu grande tamanho, deve-se evitar realização de manobras, o que seria prejudicial para a produtividade e pelos problemas que pode causar ao trânsito local (BONFIM, 2011).



Figura 10: Fresadora W 1900 da Wirtgen

Fonte: Wirtgen (2012)

2.3.2. Reciclagem a frio *in situ* (espessura parcial)

A reciclagem a frio *in situ* é definida como uma técnica em que os materiais existentes no pavimento são reutilizados no próprio local. Os materiais são misturados sem aplicação de aquecimento. A operação é realizada utilizando máquinas de reciclagem, as quais evoluíram de máquinas fresadoras e estabilizadoras de solo. São máquinas especializadas e apresentam capacidade de reciclar uma camada espessa de pavimento numa simples passada (DAVID, 2006).

A reciclagem parcial aplica-se em pavimentos deteriorados com defeitos localizados somente no revestimento asfáltico, não havendo problemas estruturais de base ou sub-leito. O propósito dessa técnica é a eliminação de problemas superficiais como o trincamento por fadiga, a irregularidade superficial, o desgaste e a baixa resistência à derrapagem. (HALL et al. 2001 apud DAVID, 2006).

2.3.2.1. Métodos de execução e equipamentos

O procedimento consiste em fresar a camada asfáltica até certa profundidade sem afetar a base. O material removido é misturado com agente de reciclagem que pode ser emulsão asfáltica, espuma de asfalto ou agente de reciclagem emulsionado, que complementa a quantidade de ligante da mistura, possibilitando o reaproveitamento da mesma com as características definidas em projeto. Caso necessário, pode ser adicionado agregado virgem à mistura, que é espalhado na pista previamente. Após a operação de mistura dos materiais procede-se o espalhamento e a compactação da mistura reciclada (DAVID, 2006). A Figura 11 mostra o esquema básico do processo de reciclagem parcial a frio *in situ*:

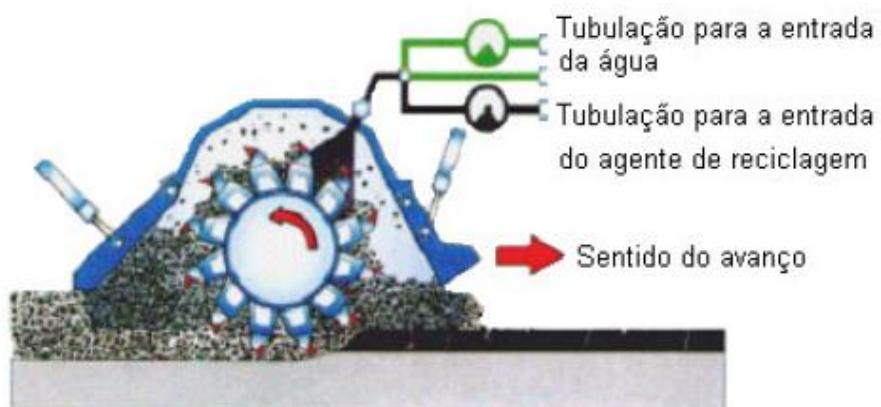


Figura 11: Reciclagem parcial a frio *in situ*

Fonte: Adaptado de Wirtgen (2012)

Segundo a ARRA (1997) as etapas para execução da reciclagem de revestimento a frio são:

- Preparação da área a ser reciclada;
- Fresagem do pavimento existente;

- Adição de agente de reciclagem e materiais virgens;
- Nivelamento;
- Compactação;
- Locação da camada de rolamento.

Dois métodos diferentes para a reciclagem a frio *in situ* são utilizados, atualmente. São eles: máquina única *single-pass* e trem de equipamentos *single-pass*. Os dois métodos serão discutidos a seguir.

Método da máquina única *single-pass*:

Este equipamento é o único capaz de desintegrar, pulverizar o pavimento e adicionar agentes de reciclagem em uma única passagem. O sistema consiste basicamente de uma unidade recicladora e outra pavimentadora. A Figura 12 demonstra um esquema básico do processo.

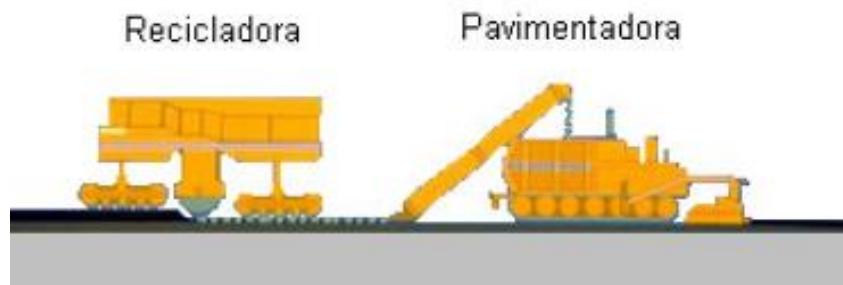


Figura 12: Método da máquina única *single-pass*

Fonte: Adaptado de ARRA (1997)

O material virgem, se necessário é espalhado na superfície à frente do equipamento de reciclagem. O agente de reciclagem é adicionado na câmara de moagem da pavimentadora. O RAP é adicionado por fresagem a frio (por uma máquina de fresagem) ou por um caminhão transportador (ARRA, 1997).

Método do Trem de Equipamentos *single-pass*:

O trem de equipamentos *single-pass* consiste de uma série de equipamentos, cada um designado para uma função em particular. Os componentes mais comuns são: uma máquina fresadora, um britador/peneirador móvel, uma unidade de mistura e uma unidade pavimentadora. Na execução do processo, a unidade de britagem e peneiramento esmagam e peneiram o material em forma de grumos proveniente da fresagem, deposita o material processado em um misturador do tipo *pugmill*, onde é adicionado o agente de reciclagem. Após a mistura o material é depositado sobre a pavimentadora para posterior aplicação e assentamento, ou disposto em leiras. Se for disposto em leiras, é pego em seguida por uma pavimentadora para assentamento (ARRA, 1997). A Figura 13 demonstra um esquema básico do processo.

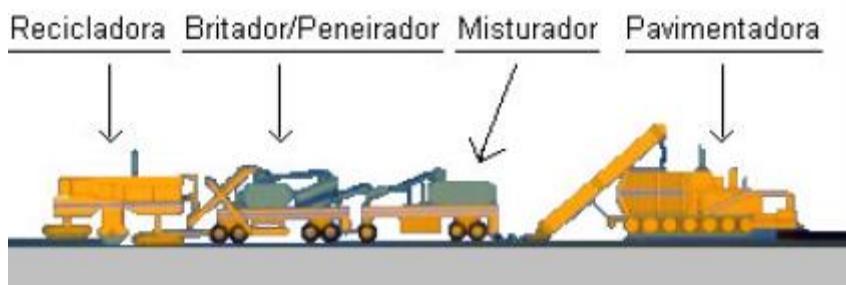


Figura 13: Método do Trem de Equipamentos *single-pass*

Fonte: Adaptado de ARRA (1997)

2.3.2.2. Reciclagem a frio *in situ* com adição de Emulsão Asfáltica

As emulsões asfálticas, são materiais constituídos de uma mistura de asfalto e água estabilizada por agentes emulsificantes. Essa estabilidade garante às emulsões a propriedade de se manterem em estado líquido em temperatura ambiente, o que lhes confere trabalhabilidade sem a necessidade de aquecimento. Devido a esta característica, as emulsões são o material ideal para o processo a frio de reciclagem.

Porém, quando são aplicadas na mistura asfáltica, ocorre a perda de estabilidade de mistura entre água e asfalto e consequente separação das fases constituintes, por simples evaporação da água ou por atração eletrostática que o agregado exerce sobre o asfalto. A esse fenômeno damos o nome de “ruptura”.

Segundo a ARRA (1997) as emulsões assumem um papel crucial no processo de reciclagem a frio, pois ajudam a aumentar a coesão e a capacidade de carga da mistura asfáltica reciclada. Ela também ajuda no rejuvenescimento e amolecimento do ligante asfáltico envelhecido presente no pavimento a ser reciclado. A vantagem em utilizar a emulsão é que, devido a sua baixa viscosidade, é perfeitamente adequada para aplicação através do sistema de adição presente nos equipamentos de reciclagem. Devido à ruptura, a água será forçada a sair da mistura asfáltica durante a compactação ou durante o período de cura. O cimento asfáltico resultante terá alta viscosidade e, portanto, irá melhorar o desempenho do material de base.

2.3.3. Reciclagem a frio *in situ* com profundidade total (*Full Depth Reclamation*)

As rodovias que são expostas a cargas muito elevadas provenientes de tráfego pesado, os danos frequentemente se estendem por todo o perfil transversal do pavimento, atingindo as subcamadas, como base e subleito. Para reparar esses danos, a estrutura do pavimento deve ser reabilitada com profundidade total (*full depth*).

A ARRA (1997) define “*full depth reclamation*” como um método em que toda a seção do pavimento e uma quantidade predeterminada de material subjacente são tratadas para produzir uma camada de base estabilizada. Diferentes tipos de aditivos,

tais como emulsões e agentes químicos, mais precisamente cloreto de cálcio, cimento portland, cinzas volantes e cal, são somados para se obter uma base melhorada.

Segundo a ARRA (1997), há algumas vantagens importantes na utilização deste método:

- A estrutura do pavimento pode ser melhorada de forma significativa, sem alterar a geometria do pavimento;
- Restaurar pavimento antigo para o perfil desejado, eliminar sulcos em trilhas de rodas existentes, restaurar inclinações, e eliminar buracos e irregularidades. Operações de alargamento do pavimento também podem ser executadas neste processo;
- Eliminar trincas do tipo couro de jacaré, transversal, longitudinal e trincas por reflexão;
- O custo de produção é reduzido, e apenas uma fina camada ou revestimento é necessário na maioria dos projetos;
- Custos de engenharia são baixos;
- Materiais e energia são conservadas, e os problemas de qualidade do ar decorrentes de poeira e fumaça são eliminados. O processo é ecologicamente desejável, uma vez que são evitados problemas de bota-fora.

2.3.3.1. Métodos de execução e equipamentos

De acordo com a ARRA (1997), há quatro formas de execução do método *full depth*, são denominadas:

- *Multiple-step sequence* ou sequência de múltiplas etapas – nesse método, diferentes máquinas estão envolvidas na execução e, embora existam máquinas pré-estipuladas e disponíveis para emprego nesse método, há deficiência no controle de profundidade, limitação da largura de operação, contaminação da camada asfáltica com material de base, além dos problemas de controle de tráfego;
- *Doble-step sequence* ou sequência de duas etapas – nesse método há uma etapa de quebra e desintegração do revestimento que resulta em uma pré-moagem do pavimento, essa operação é combinada com fresagem a frio e a mistura é feita por um equipamento de mistura e estabilização de solos. As desvantagens desse método incluem a necessidade por mão-de-obra treinada e equipamentos especializados, porém, possui alta capacidade de produção;
- Método da máquina única;
- Método do trem de equipamentos *single-pass*.

Os dois últimos processos citados são iguais ao que já foi mostrado anteriormente, porém, no método *full depth* o pavimento é tratado na totalidade de sua seção transversal.

2.3.3.2. Reciclagem a frio *in situ* com Espuma de Asfalto (*full depth*)

A tecnologia de reciclagem a frio com espuma de asfalto consiste no reaproveitamento de estruturas de pavimento danificadas através da adição de agregados pétreos, cimento Portland e de espuma de asfalto obtendo-se, assim, bases recicladas de boa qualidade (DNIT – ES 166/2013).

A Figura 14 demonstra o esquema que representa a formulação e adição da espuma de asfalto no processo de reciclagem a frio *in situ*.

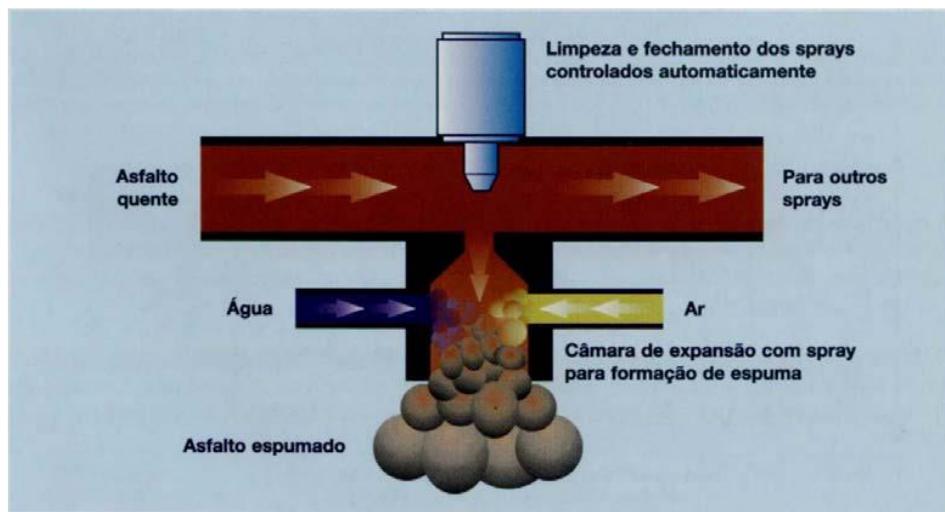


Figura 14: Produção da espuma de asfalto

Fonte: Wirtgen (2001) apud CASTRO (2003)

A espuma de asfalto está sendo cada vez mais utilizada na reciclagem *full depth*. A espuma facilita a melhor dispersão do asfalto para os materiais a serem reciclados. Uma pequena quantidade de água é injetada no asfalto quente ao passo que já vai sendo misturada com o pavimento reciclado ou solo (ARRA, 1997).

2.3.4. Restrições e limitações das técnicas de reciclagem a frio *in situ*

Os métodos de reabilitação de pavimentos que envolvem a aplicação de reciclagem a frio têm sido mais justificáveis no que diz respeito a custo de produção, consumo de energia, e condições de trabalho para os operários, já que não necessitam de aquecimento no processo de execução. Porém, possuem limitações que podem ser decisivas no momento da escolha no método de reabilitação a ser empregado.

A reciclagem a frio de pavimentos pode ser empregada somente na formulação de bases asfálticas a partir de um pavimento existente deteriorado, não podendo ser aplicado na concepção de revestimentos, visto que a mistura resultante não apresenta

bom desempenho quando exposta a tráfegos severos. Diferentemente, os métodos de reciclagem a quente possibilitam essa aplicação.

O emprego das técnicas de reciclagem a frio, a exemplo dos processos a quente, também exigem a utilização de maquinário específico e em alguns casos, mão-de-obra treinada, o que acaba tornando o processo mais oneroso. Podem surgir, também, problemas de controle de qualidade, visto que a profundidade (no método *full depth*) de serviço atinge toda a espessura do pavimento, podendo haver contaminação das camadas asfálticas pelos materiais do subleito.

Contudo, no Brasil os investimentos na área de reciclagem de pavimentos estão voltados para os processos a frio. Há um crescente interesse das empresas do ramo na utilização das técnicas, visto que os benefícios que trazem ao meio ambiente são indiscutíveis e o desempenho quando devidamente empregadas é satisfatório.

2.4. Técnicas de reciclagem de pavimentos à quente

As técnicas de reciclagem a quente, de acordo com a classificação da ARRA (1997), diferem de acordo com a temperatura em que ocorrerá o processo, se será a temperatura ambiente (a frio), ou se será sob condições de aquecimento dos materiais (a quente). As técnicas são, também, subdivididas de acordo com o local onde irá acontecer a mistura dos materiais, se no próprio local onde está sendo executada a obra (*in situ*) ou em usina estacionária. Além disso, o termo “a quente” não se refere à maneira como o pavimento antigo é removido para reciclagem, pois esse processo pode ser realizado a quente, através do aquecimento do pavimento até a profundidade que se deseja remover e posterior remoção da camada, ou a frio, com a utilização do processo de fresagem. Refere-se à temperatura em que ocorre a mistura e compactação dos componentes oriundos da reciclagem e os materiais “virgens” que serão adicionados.

O Grupo Wirtgen, especializado na execução de obras de reciclagem, afirma que o processo a quente é um método utilizado exclusivamente para recuperação de

superfícies de pavimentos asfálticos danificadas e, que através desse método é possível restabelecer todas as propriedades relevantes, tanto do revestimento quanto da camada subjacente, bem como a composição dos agregados na camada de desgaste. Ele ajuda a restaurar a resistência à derrapagem, a capacidade de drenagem da pista e a eliminar o afundamento nas trilhas de roda (WIRTGEN, 2012).

2.4.1. Reciclagem a quente *in situ*

Define-se reciclagem a quente *in situ* de pavimentos, como o processo de remoção e processamento, no local da obra, do material asfáltico e granular de um pavimento flexível com a utilização do calor, transformando-o em uma nova mistura asfáltica e posterior compactação a quente.

O DNIT ainda discrimina a utilização de material granular adicional para correção de granulometria, adição de filer e o emprego de maquinário específico para aplicação do método.

2.4.1.1. Aplicações e Defeitos

A reciclagem a quente *in situ* é, portanto, uma técnica utilizada unicamente para solucionar problemas decorrentes de defeitos em pavimentos, e assim atua ao lado da eficiência e economia. Wirtgen (2012) determina quais são os principais defeitos, como interferem no desempenho do pavimento e de que forma a técnica de reciclagem em questão é utilizada na resolução do problema. Temos então o afundamento em trilha de roda.

Afundamento em trilha de roda:

As deformações permanentes em trilhas de roda são como sulcos que ocorrem geralmente no sentido longitudinal do pavimento e são causados por deficiência na estabilidade da camada de desgaste. As razões prováveis para este defeito estão

relacionadas ao ligante, onde seu percentual está muito alto com relação à mistura, onde temos uma “massa gorda”, e também com o baixo teor de agregados graúdos na granulometria utilizada na mistura (Figura 15).

O conforto do motorista, ao trafegar na rodovia, não é tão afetado pelos afundamentos em trilha de roda quanto a sua segurança, visto que, com a ocorrência de chuva a água acumula no sulco formado nas trilhas, resultando em uma película de água que irá reduzir drasticamente a área de contato entre o pneu e o pavimento, o que garante as condições de atrito, estabilidade e dirigibilidade do veículo (Figura 16). A reciclagem a quente trata desse problema adicionando misturas corretivas contendo agentes de ligação mais rígidos ou uma alta proporção de agregados graúdos com grãos de alta qualidade.

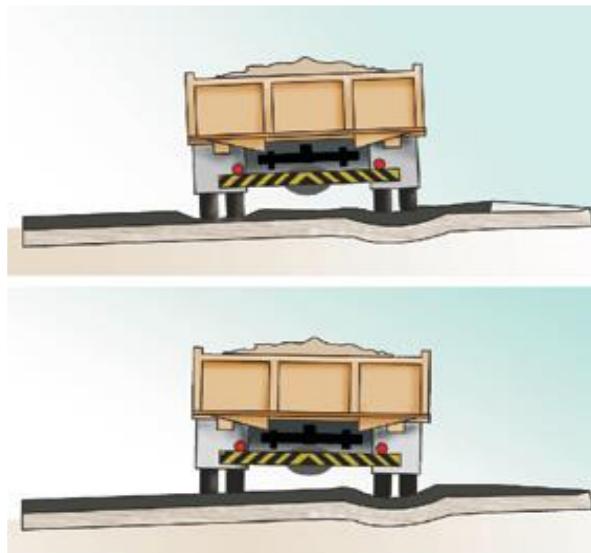


Figura 15: Deformação permanente

Fonte: Bernucci et al. (2008)



Figura 16: Afundamento em trilha de roda com presença de água na superfície

Fonte: Wirtgen (2012)

Baixa resistência à derrapagem:

Quando o percentual de ligante asfáltico no revestimento é muito alto, o pavimento da rodovia se torna escorregadio, principalmente na ocorrência de chuvas. A aderência dos pavimentos também pode ser afetada adversamente por um percentual insuficiente de agregado graúdo. Se for esse o caso, pode ser adicionada ao processo de reciclagem uma mistura asfáltica corretiva de alta qualidade ou adicionar agregados graúdos na mistura reciclada.

Fissuras na camada de desgaste do pavimento:

A fissuração ocorre na superfície de uma rodovia quando o pavimento se torna rígido ou quebradiço, como apresentado o exemplo na Figura 17. As possíveis causas estão relacionadas a erros na dosagem do ligante asfáltico, erros de execução, espessura inadequada do revestimento ou ancoragem deficiente entre as camadas do pavimento. No processo de reciclagem, a adição de ligantes suaves protege o novo revestimento de fissurar em médio prazo.



Figura 17: Revestimento em avançado grau de fissuração

Fonte: Bernucci et al. (2008)

2.4.1.2. Métodos de execução e equipamentos

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006), a reciclagem a quente de pavimentos ainda é um processo relativamente novo e a variabilidade dos materiais removidos é maior se comparado com materiais novos. Isso exige que sejam tomados cuidados especiais na formulação do projeto e na construção de camadas com misturas recicladas a quente. Devido a esta variabilidade existem ainda incertezas quanto ao desempenho das misturas e, sua aplicação em camadas de rolamento ainda não é extensiva no Brasil.

Este método traz consigo algumas vantagens importantes que propiciam a economia de grandes montantes. Podem ser descritos principalmente, a redução no tempo de interrupção do tráfego na rodovia e a minimização da necessidade por transportes de materiais, já que a maior parte destes a serem utilizados são provenientes do próprio pavimento a ser reciclado e o processo de mistura acontece no local da obra.

São estabelecidos dois processos básicos de reciclagem a quente *in situ* de pavimentos asfálticos e seus respectivos equipamentos:

No primeiro sistema, o pavimento é aquecido através de um circuito de ar quente (até 600°C) que com a ajuda de um sistema de infravermelhos que está sobreposto à camada a reciclar, permite que o pavimento atinja temperaturas de 150 a 160°C numa espessura de até 6 cm de profundidade. Seguidamente o pavimento quente é fresado, entrando posteriormente num misturador onde se junta um agente rejuvenescedor. Após isso, a mistura é colocada numa espalhadora de misturas betuminosas do equipamento, que lança o novo material no pavimento para em seguida ser compactada.

No segundo sistema o material é fresado a frio e colocado num tambor secador misturador, onde se adiciona o agente rejuvenescedor. Posteriormente, é colocado numa espalhadora e compactado.

Para execução, a ARRA (1997) destaca de forma distinta e mais aprofundada as etapas necessárias a um processo de reciclagem a quente *in situ*, que se dá da seguinte maneira:

- Amolecimento da superfície do pavimento asfáltico com calor;
- Fresagem e/ou remoção mecânica do material da superfície;
- Mistura do material com agentes rejuvenescedores e ligante asfáltico;
- Adição de material granular virgem, quando necessário para correção de granulometria;
- Assentamento e compactação da mistura reciclada sobre a superfície do pavimento.

O procedimento pode ser realizado em operações de *single-pass* (passada simples) ou *multiple-pass* (múltiplas passadas). No processo de *single-pass*, materiais virgens são misturados ao RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) que é oriundo do pavimento asfáltico fresado e executado em uma única passagem, ao passo que no processo *multiple-pass*, uma nova camada de rolamento é adicionada após, recompactando o RAP.

A ARRA (1997) reconhece, ainda, três tipos básicos de processos de reciclagem a quente *in situ*, são eles:

- Reciclagem de superfície;
- Repavimentação;
- Remistura.

Reciclagem de superfície:

A reciclagem de superfície é definida como um processo de reabilitação adequado para pavimentos trincados, frágeis e irregulares, em preparação para um revestimento final de fina espessura. Os pavimentos ideais para esse processo são aqueles cuja base é estável e adequadamente projetada. Apesar de o processo ser capaz de atingir a profundidade de até 50 mm, as espessuras mais usuais estão na faixa entre 20 mm e 25 mm. Pode ser realizado por *multiple-pass* (ARRA, 1997).

Este método é, também, utilizado para restabelecer as condições geométricas do pavimento garantindo drenagem adequada. É eficiente para retardar e evitar a reflexão de fissuras para a nova camada, isso se antes do revestimento final for aplicada uma camada de mistura quente. Esse processo pode ser otimizado se a camada imediatamente inferior ao revestimento for escarificada, a fim de aumentar a aderência entre elas. A Figura 18 mostra o esquema de um processo de reciclagem de superfície.

O processo funciona da seguinte forma: a unidade de pré-aquecimento aquece a superfície do pavimento antigo, a unidade de aquecimento e reciclagem aplica mais calor e fresa o pavimento com um conjunto de dentes não rotativos e agentes de reciclagem. Em seguida, o material do antigo pavimento e os agentes de reciclagem são misturados com um trado padrão e estabilizados com uma placa. Um rolo de pneus de borracha é utilizado para compactar o material reciclado. Nenhum agregado novo é, geralmente, adicionado ao processo de reciclagem de superfície. A Figura 19 mostra um processo de reciclagem de superfície.

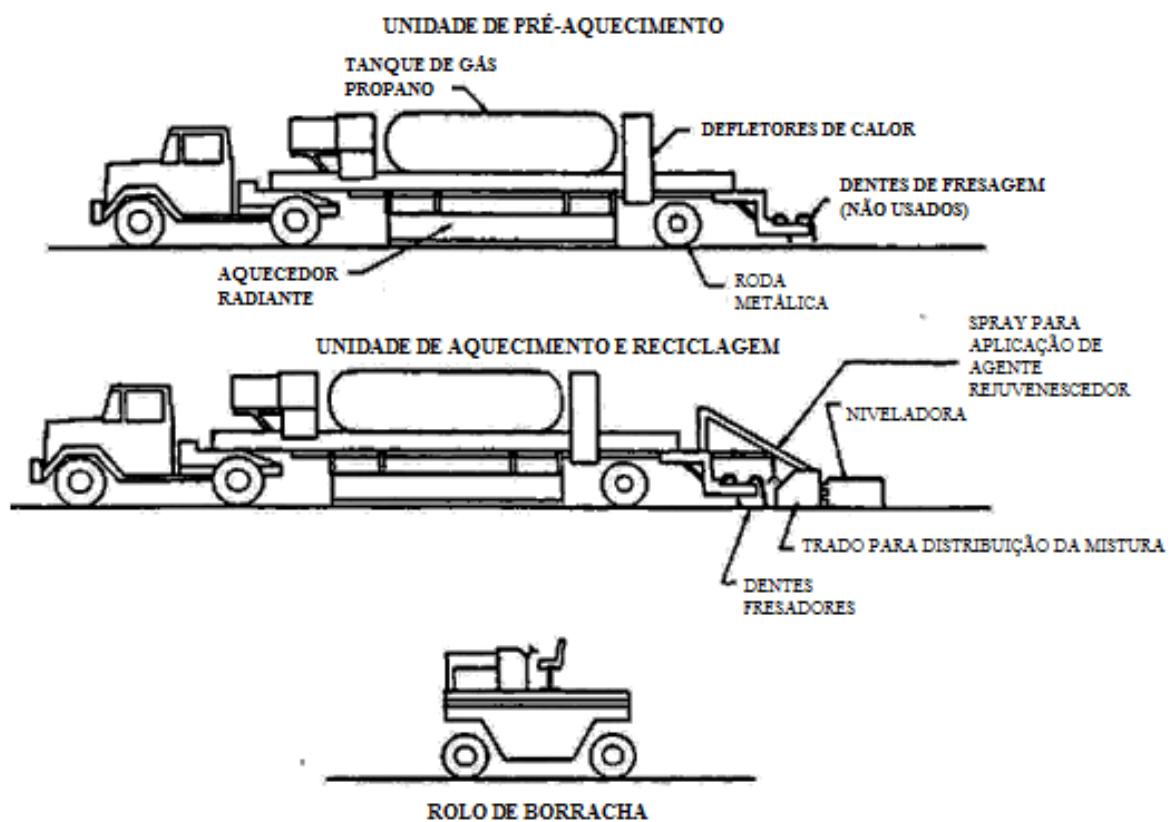


Figura 18: Esquema do processo de reciclagem de superfície

Fonte: ARRA (1997)



Figura 19: Processo de reciclagem de superfície

Fonte: ARRA (1997)

Repavimentação:

É o método de reciclagem de superfície combinado com uma sobreposição simultânea de uma nova camada de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) para formar uma ligação térmica entre a camada nova e a reciclada. Este processo é utilizado para corrigir as deficiências da parte superior do pavimento, entre 20 e 50 mm. Defeitos no pavimento, tais como afundamentos em trilha de menor magnitude, trincas por retração térmica e desagregação da mistura podem ser eliminados a partir desse método.

De acordo com a ARRA (1997), o processo de repavimentação torna-se útil quando a reciclagem de superfície não é suficiente para restabelecer as características exigidas de conforto e segurança do pavimento. Revestimentos muito finos, com espessuras da ordem de 12 mm, podem ser usados em conjunto com o processo de repavimentação com rendimento e desempenho satisfatórios.

As Figuras 20 e 21 mostram os esquemas de repavimentação por *multiple-pass* e *single-pass*, respectivamente.

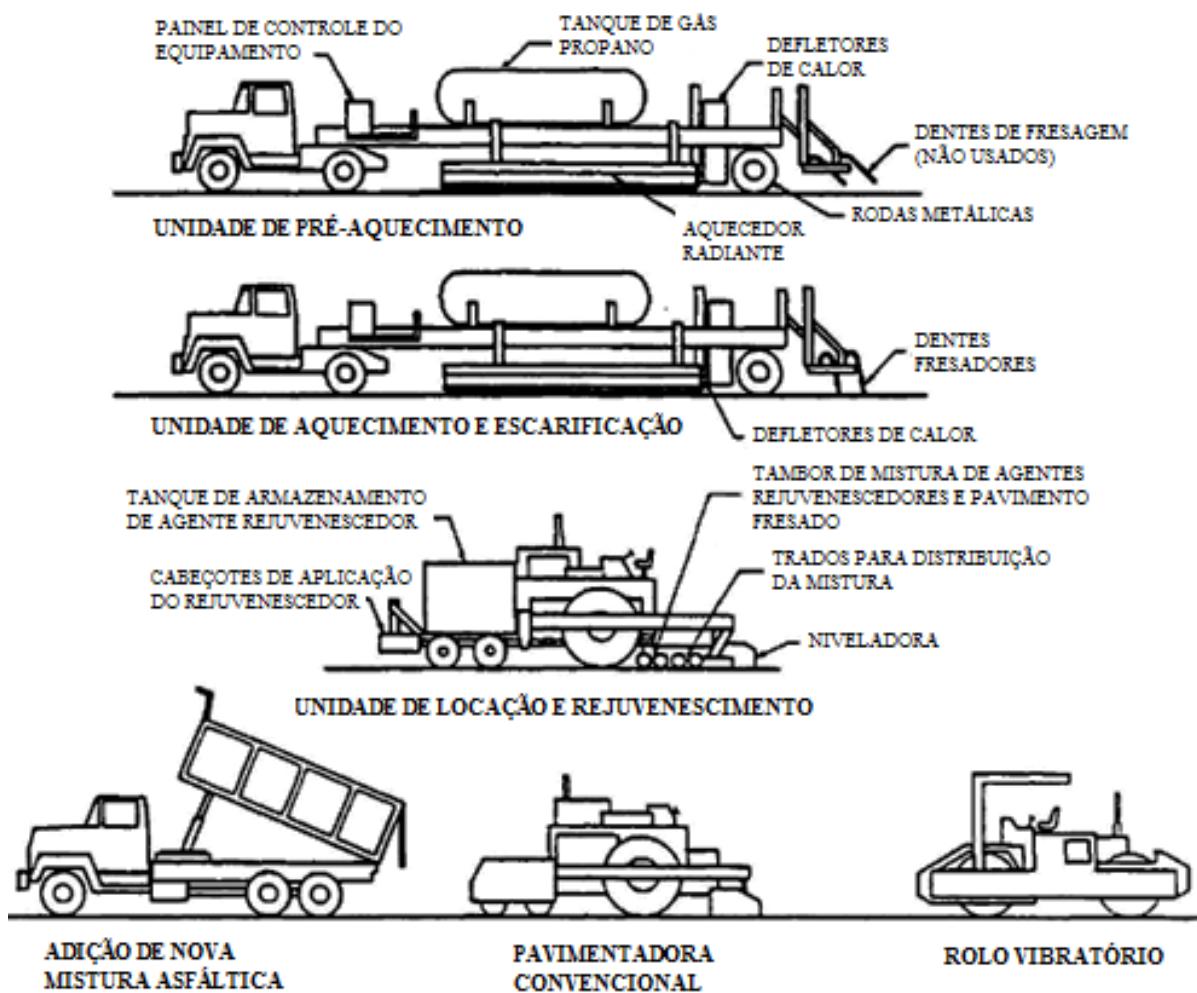


Figura 20: Esquema do processo de repavimentação por *multiple-pass*

Fonte: ARRA (1997)

O processo consiste de pré-aquecimento, posterior aquecimento e escarificação e/ou moagem rotativa, aplicação e mistura de um agente de reciclagem, aplicando a mistura reciclada como uma camada de nivelamento e, finalmente, a colocação de um novo revestimento de CBUQ.

No processo *single-pass* de repavimentação são usadas duas argamassas de CAP. Uma é aplicada para nivelar a mistura fresada e a outra para nivelar a camada nova de CBUQ. Os passos até a colocação da mistura reciclada são semelhantes aos do processo de reciclagem de superfície.



Figura 21: Esquema do processo de repavimentação por *single-pass*

Fonte: ARRA (1997)

A Figura 22 a seguir mostra a execução do processo de repavimentação pelo método *single-pass*.



Figura 22: Processo de repavimentação

Fonte: ARRA (1997)

Remistura:

Este método é normalmente utilizado quando o processo de repavimentação não é suficiente para restabelecer as propriedades desejáveis do pavimento no que diz respeito a conforto e segurança do usuário da rodovia. Nesse processo são adicionados agregados e/ou CBUQ novo, o que garante o restabelecimento da capacidade de suporte e estabilidade para o pavimento reciclado (ARRA, 1997).

Através desse método é possível se eliminar, efetivamente, afundamentos e fissuras e, também corrigir o problema da oxidação (endurecimento) do ligante asfáltico nos 50 mm superiores da superfície do pavimento. A seguir o esquema simplificado do processo de remistura na Figura 23, e uma vista parcial deste processo na Figura 24.

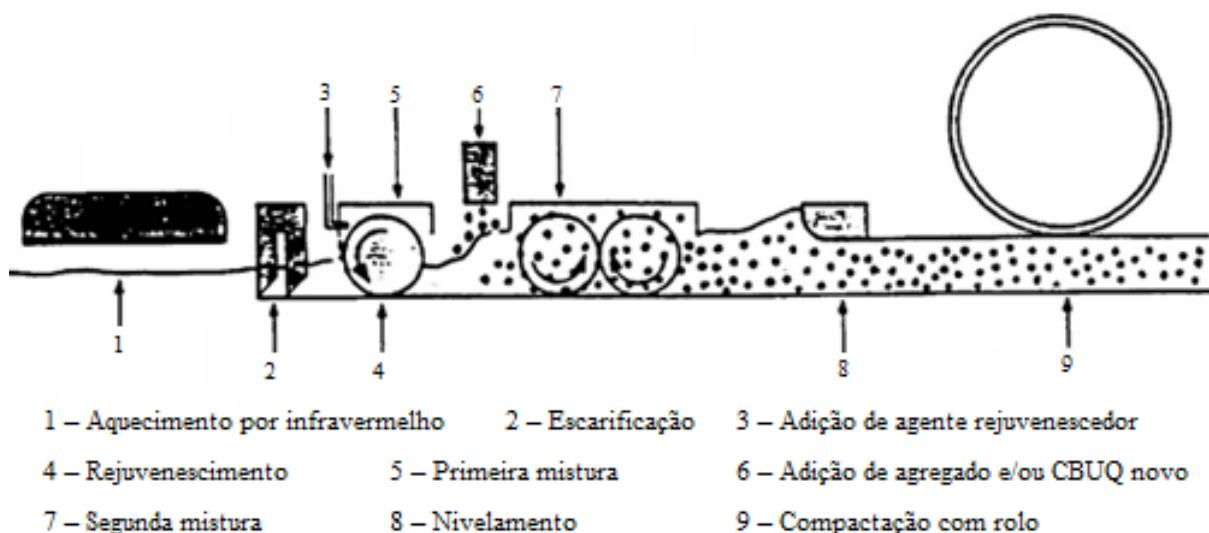


Figura 23: Esquema do processo de remistura

Fonte: ARRA (1997)

No processo de execução, o pavimento é primeiramente aquecido e amolecido por aquecedores infravermelhos em unidades de pré-aquecimento. A temperatura do asfalto é elevada até níveis compreendidos entre 85°C e 104°C. O material então

amolecido é escarificado e coletado em uma leira. A remoção pode ser feita por escarificadores fixos, podendo ser seguida de um conjunto adicional de fresadores e atinge profundidades que variam entre 25 mm e 40 mm, embora possa alcançar mais de 50 mm. O material coletado na leira é misturado com agentes de reciclagem e agregados virgens para recomposição da granulometria. A partir daí o material é espalhado por um conjunto de brocas transversais. Uma mesa vibratória é utilizada então para compactar parcialmente o material. O processo final de compactação é realizado pelo método usual.



Figura 24: Vista parcial do processo de remistura

Fonte: ARRA (1997)

2.4.1.3. Restrições e limitações

Como se pode verificar no decorrer da demonstração das técnicas de reciclagem à quente *in situ*, a aplicação dos métodos comprehende a utilização

ostensiva de equipamentos de funcionamento complexo e elevado custo de aquisição e manutenção.

As limitações do emprego da técnica estão diretamente ligadas à escassez dos recursos financeiros disponíveis, por parte do agentes públicos e privados em relação a aquisição e manutenção do maquinário necessário para realização dos serviços.

2.4.2. Reciclagem à quente em usina estacionária

Segundo o DNIT (2006), concreto asfáltico reciclado a quente em usina estacionária é a mistura realizada em central com características específicas, utilizando-se como agregado o material do revestimento asfáltico removido a frio do pavimento existente, cimento asfáltico e agregados adicionais e, se necessário, materiais de enchimento (filer), assim como agente de reciclagem misturado, espalhado e comprimido a quente. Este poderá ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço do pavimento.

Uma mistura asfáltica reciclada a quente resulta da combinação de misturas betuminosas envelhecidas de pavimentos asfálticos existentes, normalmente resultantes da fresagem das camadas superiores destes pavimentos, e de materiais novos, agregados e asfalto (BAPTISTA, 2006).

A Figura 25 traz um esquema simplificado dos materiais constituintes de uma mistura reciclada a quente.



Figura 25: Esquema dos materiais de uma mistura asfáltica reciclada a quente

No que diz respeito às aplicações da técnica, pode-se estender o que foi apresentado pela Reciclagem a Quente *In Situ*. Porém, no âmbito da logística os dois métodos são completamente diferentes. A reciclagem a quente em usina consistirá, de remoção do pavimento existente por fresagem, onde material fresado será lançado em caminhões que ficarão a cargo do transporte até uma central de mistura a quente, onde haverá, ainda, a adição de materiais novos, como agregados e cimento asfáltico. Em seguida, ocorre a mistura do material fresado com os materiais novos e o consequente transporte da mistura final reciclada até o canteiro de obras para ser efetuada a pavimentação. A Figura 26 demonstra o processo básico da reciclagem à quente em usina.



Figura 26: Esquema do processo de reciclagem a quente em usina.

2.4.2.1. Métodos de execução e equipamentos

De acordo com ARRA (1997), existem dois processos possíveis para obtenção de misturas asfálticas recicladas a quente em usina, são eles:

- Planta de batelada ou Centrais Gravimétricas;

- Tambor secador misturador ou *Drum Mixer*, ou ainda, Centrais Volumétricas (TSM).

Apesar das centrais gravimétricas apresentarem uma margem de erro menor nos processos de mistura, com relação às centrais volumétricas, devido ao controle intermediário de agregados realizado durante o processo, os procedimentos de reciclagem a quente em usina utilizando as centrais volumétricas têm se mostrado mais vantajosos com relação ao método das usinas gravimétricas. Devido a isto, as tendências de mercado se voltaram para a utilização das centrais com funcionamento a base de TSM.

A ARRA (1997) destaca algumas vantagens importantes das centrais TSM com relação às centrais em lote de mistura:

- Portabilidade: as centrais com TSM são mais portáteis e requerem menor tempo de instalação com relação às centrais em lote;
- Versatilidade: um percentual relativamente maior de material fresado pode ser incluído na mistura reciclada;
- Produção: as taxas de produção são relativamente pouco afetadas pelo percentual de material fresado utilizado;
- Mistura: uma mistura mais homogênea pode ser produzida em uma central com TSM desde que o material fresado seja misturado com agregados virgens e ligantes asfálticos por um longo período de tempo.

Reciclagem em centrais com Tambor Secador Misturador (TSM):

Segundo a ARRA (1997), o processo de produção de misturas asfálticas em usinas com TSM, descrito resumidamente, funciona da seguinte forma: os agregados a serem utilizados são dispostos, previamente dosados, conforme especificações de projeto, e armazenados em silos de acordo com sua granulometria. São lançados em

uma esteira que os transporta até o TSM. O interior do TSM é continuamente aquecido por uma chama proveniente de um queimador que funciona a óleo ou a gás natural. Os agregados são, em uma primeira etapa, aquecidos e secos para, então, serem misturados ao CAP que é injetado no tambor a jusante da chama, nos tambores de fluxo paralelo e, a montante nos tambores de contra fluxo, que por sua vez, são mais vantajosos e eficientes. A mistura sai do tambor a aproximadamente 155°C pronta para ser empregada na obra. A Figura 27 demonstra um esquema do processo.

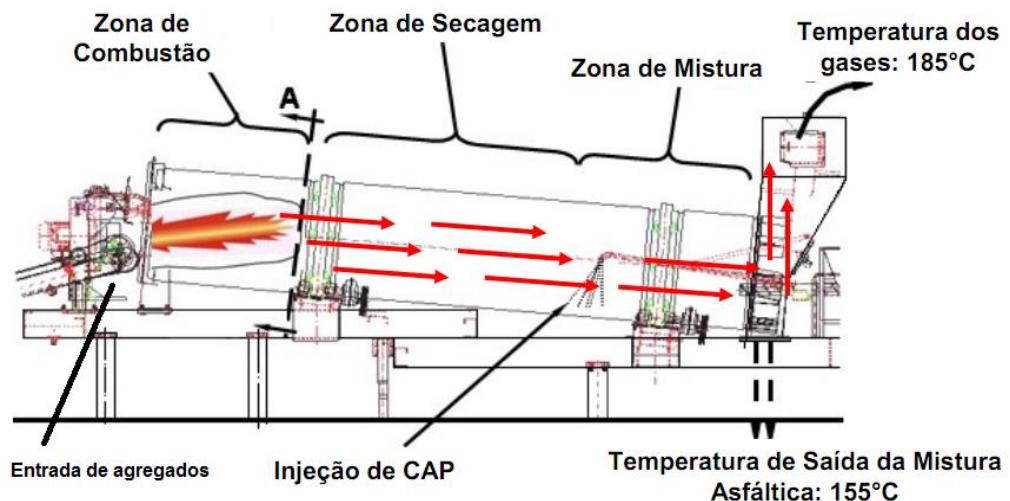


Figura 27: Esquema do processo no interior de um TSM paralelo

Fonte: Terex (2007)

O material fresado não pode ser processado em usinas *Drum Mixer* convencionais, pois o contato do RAP com a chama do tambor, que tem por finalidade gerar calor para secagem dos agregados virgens que serão incorporados na mistura, irá resultar em queima do ligante envelhecido que está aderido ao material. Essa queima resulta na produção da chamada “fumaça azul”, que acaba prejudicando o funcionamento do sistema (ARRA, 1997).

Pensando nesse problema, chegou-se a conclusão de que poderia ser resolvido de várias maneiras, como por exemplo, incluindo maior teor de umidade no RAP, para que esse fosse apenas aquecido e não queimado. No entanto, medidas como esta iriam diminuir a produção, visto que mais energia seria necessária para

aquecer a mistura que estaria mais úmida e mais tempo seria gasto para isso. Verificou-se então, que uma maneira mais eficaz de solucionar o problema seria modificando a central TSM, chegando ao que chamamos de “Tambor Secador Misturador de Entrada Central”.

Embora existam algumas variações nesse processo, é o método mais utilizado para a fabricação de misturas recicladas a quente em usinas volumétricas. Neste processo, o RAP é introduzido no tambor, para misturar com os agregados virgens superaquecidos pelo contato direto com a chama. Os agregados virgens quentes aquecem o material fresado por condução. O RAP é protegido de entrar em contato direto com a chama por uma densa camada de agregados que é lançada a montante do queimador. A temperatura do agregado virgem cai conforme o RAP é aquecido. A mistura reciclada é elevada até alta temperatura na última etapa do tambor, quando é incorporado asfalto líquido ao processo, completando a mistura (ARRA, 1997).

É importante destacar o principal fator de distinção entre as centrais TSM que são referentes aos sentidos de fluxo de materiais no interior do tambor. As centrais podem funcionar com fluxo paralelo (Figura 28), o que significa que o sentido de deslocamento dos gases quentes da combustão e dos agregados é o mesmo. Há, também, as centrais de fluxo contracorrente (Figura 29), cujo sentido de fluxo dos gases de combustão é oposto ao sentido do deslocamento dos agregados (BAPTISTA, 2006).

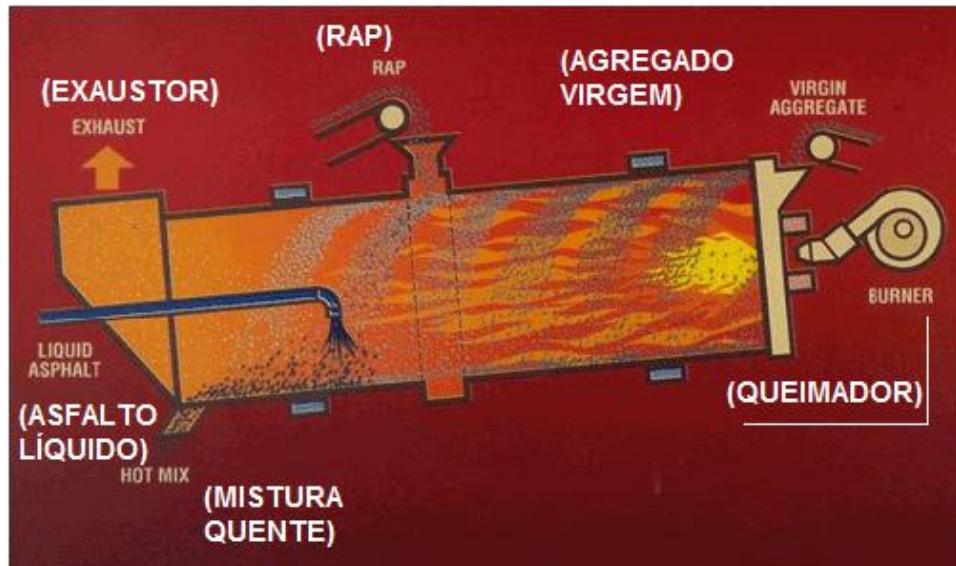


Figura 28: Tambor secador misturador com entrada central de RAP

Fonte: Adaptado de ARRA (1997)

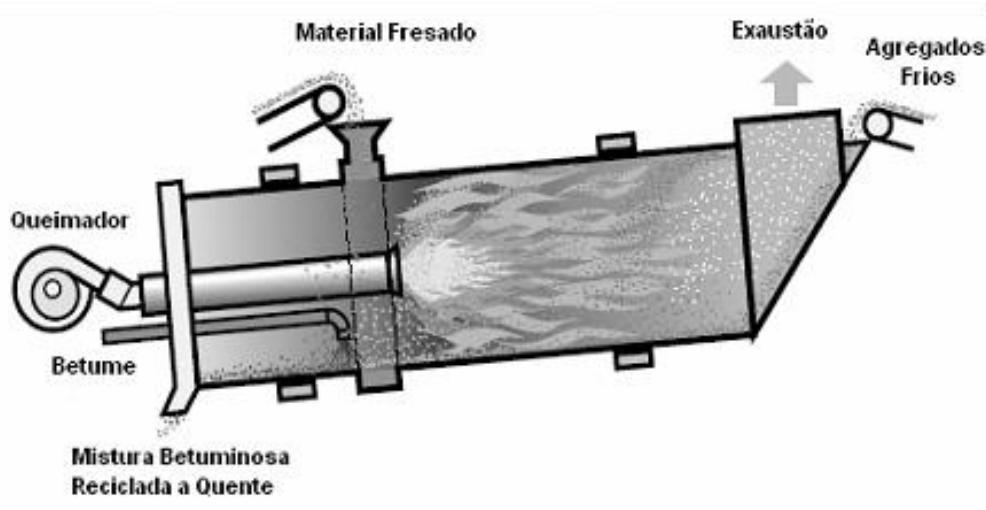


Figura 29: TSM com entrada central de RAP e fluxo contracorrente

Fonte: Baptista (2006)

As centrais volumétricas evoluíram com o passar do tempo, devido à necessidade de adaptá-las às exigências normativas cada vez mais rigorosas. Sendo assim, alguns modelos distintos de plantas foram desenvolvidos:

- Fluxo paralelo com área de mistura isolada;

- Fluxo paralelo com tubo de secagem do RAP em contra fluxo;
- Fluxo paralelo com misturador contínuo externo;
- Contra fluxo com adição de RAP no misturador externo;
- Contra fluxo com misturador externo e entrada central de RAP;
- Contra fluxo com mistura interna e entrada central de RAP.

2.4.3. Vantagens e Desvantagens

Existem algumas vantagens importantes no emprego da reciclagem a quente em usina estacionária com relação a reciclagem *in situ*. São elas: melhor homogeneidade do processo de termo-regeneração; não está restrita a pequenas espessuras de fresagem para uma reciclagem eficiente; emprego de equipamentos convencionais para transporte, entre outras (BALBO e BODI, 2004).

Porém, a grande desvantagem ligada ao processo de reciclagem a quente em usina estacionária, está associada ao transporte requerido, tanto para levar o RAP até a usina onde será processado, quanto para retorná-lo ao local da obra para posterior aplicação. Esse fator é decisivo no momento da opção pelo método de reabilitação aplicada em um pavimento, pois agrupa muitos custos de transporte e contratempos na obra.

É necessário constatar que o pequeno número de relatos de intervenções existentes dessa natureza, se deve a este inconveniente, já que estas misturas asfálticas, segundo Balbo e Bodi (2004), mostraram em laboratório valores bastante acima dos frequentemente desejados para concretos asfálticos na estabilidade

Marshall, para MR e para resistência a tração medida por compressão diametral, com valores de fluência mostrando-se dentro dos padrões aceitáveis convencionalmente. O que prova seu potencial para ser aplicado como recurso de sustentabilidade no país.

3. COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O material fresado utilizado na etapa laboratorial foi coletado na BR 290, pista Norte, durante o processo de manutenção do pavimento asfáltico em julho de 2012 nas proximidades do acesso a cidade de Cachoeirinha. Foram feitas 06 coletas, em pares, diretamente da esteira da máquina fresadora, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Dados da coleta das amostras de fresado

Amostra	Trecho / Faixa	Espessura de Corte (cm)	Temperatura do Ar (°C)
1A	81km+575 Externa	6	14
1B	81km+610 Externa	6	14
2A	81km+935 Externa	8	13
2B	81km+960 Externa	8	12
3A	81km+975 Externa	7	13
3B	81km+980 Externa	8	12

A máquina fresadora utilizada foi uma Caterpillar PM102 com largura de corte de 1,00m e espessura de corte de até 35cm e considerada uma máquina de médio porte. A durabilidade dos dentes de corte (bits) é de 100 a 150 horas de trabalho e no caso desta pesquisa encontrava-se com aproximadamente 50 horas de uso. O cilindro de corte utiliza 100 dentes de corte. A velocidade de corte utilizada foi de 9,5m/min, aproximadamente. As Figuras 30 e 31 mostram imagens do equipamento utilizado no processo de coleta de amostras.



Figura 30: Máquina fresadora Caterpillar PM102



Figura 31: Detalhe do cilindro de corte da fresadora Caterpillar PM102

Cada uma das seis amostras coletadas foi seca ao ar, quarteada e preparada para ensaios de caracterização: análise granulométrica, determinação do teor de ligante e análise granulométrica pós-extracção de ligante. As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de análise granulométrica do material fresado antes e após a extração de betume.

Tabela 3: Distribuição granulométrica das amostras de material fresado

Peneira	Abertura (mm)	Amostra 01 A	Amostra 01 B	Amostra 02 A	Amostra 02 B	Amostra 03 A	Amostra 03 B
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	96,29	96,85	92,78	93,78	96,09	96,34
3/4"	19,1	91,83	93,58	87,88	90,07	92,59	92,98
1/2"	12,7	79,40	82,09	73,95	76,55	84,17	83,54
3/8"	9,5	64,63	66,84	60,32	62,57	73,89	71,99
n 4	4,8	42,45	43,02	36,00	39,59	52,01	50,16
n 10	2,0	22,07	23,25	16,22	17,77	30,58	29,16
n 40	0,42	6,38	6,64	3,03	3,58	9,88	8,80
n 80	0,18	2,56	2,82	1,01	1,89	3,80	3,28
n 200	0,075	0,93	0,96	0,29	0,47	1,38	0,83

Tabela 4: Distribuição granulométrica das amostras de material fresado após extração de betume

Peneira	Abertura (mm)	Amostra 01 A	Amostra 01 B	Amostra 02 A	Amostra 02 B	Amostra 03 A	Amostra 03 B
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,7	95,60	85,80	94,80	92,70	96,3	98
3/8"	9,5	82,20	75,20	79,00	81,20	80,3	86,4
n 4	4,8	59,90	51,70	55,10	57,10	59,2	61,8
n 10	2,0	38,40	32,10	35,10	36,60	40,5	40,9
n 40	0,42	15,80	13,20	16,70	17,50	19,7	19,6
n 80	0,18	8,10	7,00	9,20	9,90	10,2	10,3
n 200	0,075	4,00	3,00	4,60	4,60	5,1	6

Os teores de ligante encontrado nas amostras estudadas estão apresentados na Tabela 5. O valor médio é de 5,00%, bastante coerente com projetos de concreto asfáltico; o desvio padrão dos resultados foi de 0,33%.

Tabela 5: Resultados do teor de ligante

Amostra	Teor de Ligante (%)
Amostra 01 A	4,81
Amostra 01 B	4,73
Amostra 02 A	4,98
Amostra 02 B	5,01
Amostra 03 A	4,85
Amostra 03 B	5,64

Os agregados virgens utilizados são provenientes da Pedreira do Consórcio Construtor TRS localizado as margens da rodovia BR 290 em Santo Antônio da Patrulha; trata-se de um agregado de origem vulcânica (basáltica), largamente utilizado para execução de Macadame Seco, Brita Graduada Simples e Concreto Asfáltico.

A Tabela 6 apresenta algumas características tecnológicas dos agregados utilizados e a Tabela 6 e a Tabela 7 e a Figura 32 as características granulométricas do material.

Tabela 6: Características tecnológicas dos agregados utilizados

Propriedade	Método	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Absorção (%)	DNER ME 195/97	0,70	0,80	-
Massa Específica (t/m^3) ¹	DNER ME 195/97	2,831	2,767	2,810 ²
Índice de Lamelaridade	DAER/RS – EL 108/01	14,9	29,0	-
Índice de Forma	DNER ME 86/94	2,19		-
Sanidade (%)	DNER ME 89/94	3,47		-
Equivalente de Areia (%)	DNER ME 54/97	-		62,08
Perda à Abrasão LA	DNER ME 35/98	12		-

Nota: ¹ média aritmética da densidade real e aparente dos grãos;² utilizada a técnica do picnômetro.

Tabela 7: Distribuição granulométrica dos agregados

Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
2"	50,8	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	58,35	98,90	100,00
3/8"	9,5	11,40	95,25	100,00
n 4	4,8	2,30	45,85	100,00
n 10	2,0	1,70	1,80	73,35
n 40	0,42	1,60	1,60	29,70
n 80	0,18	1,45	1,30	19,95
n 200	0,075	1,00	0,90	13,75

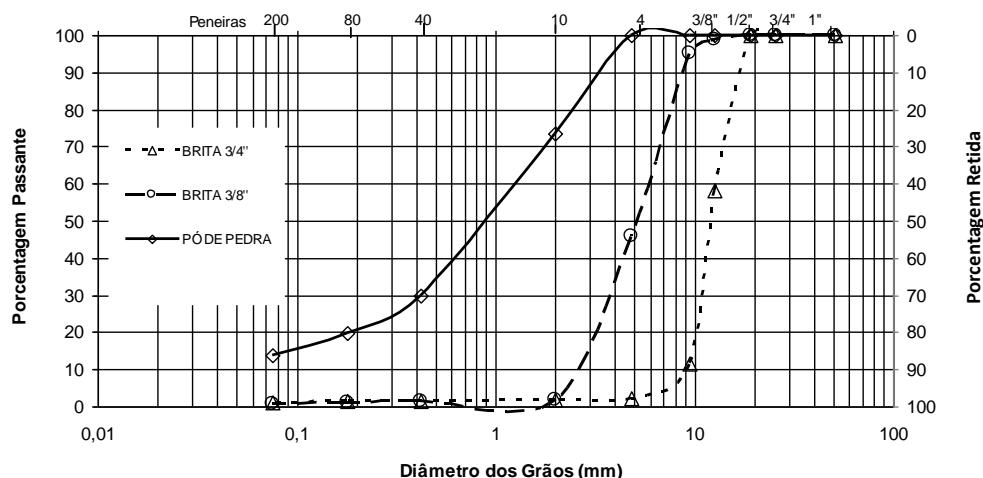


Figura 32: Distribuição granulométrica dos agregados minerais

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP IV-32 - Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736) produzido pela CCP – Cimpor Cimentos do Brasil na unidade de Candiota/RS. Sua composição é de Silicatos de Cálcio, Aluminatos e Ferro Aluminatos, Sulfato de Cálcio, material carbonático e pozolana.

Os materiais pozolânicos, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com

propriedades aglomerantes. Uma vantagem do uso de deste cimento é a redução do calor de hidratação e o aumento da resistência à compressão em idades avançadas.

O cimento Portland pozolânico tem baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Além disso, o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento. As Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa estão na Tabela 8.

Tabela 8: Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa

<i>Grandeza Física</i>	<i>Resultado</i>	<i>Limites NBR 5736</i>
Finura #200 (%)	2,42	< 8,0
Finura Blaine (cm ² /g)	3599 ± 36	
Massa específica (g/cm ³)	2,74	
Início de pega (min)	90	> 60
Fim de pega (min)	180	
Resistência Argamassa (MPa)	3 dias 7 dias 28 dias	21,49 25,82 33,57 > 10,0 > 20,0 32,0 - 49,0
Dimensões características (μm)	Diâmetro médio Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas Diâmetro correspondente a 63,2% de partículas passantes	7,27 0,93 21,56 9,90

A água utilizada na pesquisa foi oriunda da rede hidráulica do LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM e é considerada potável.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1 Dosagem – Estabilização Granulométrica

A dosagem da mistura ou estabilização granulométrica consiste em fracionar os agregados disponíveis de maneira a atender alguma especificação, neste caso a especificação de base estabilizada granulometricamente do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT 141/2010 – ES.

A referida especificação de serviço recomenda o uso de seis faixas granulométricas (A, B, C, D, E e F), sendo que as duas últimas não indicadas para tráfego acima de 5.10^6 , conforme a Figura 33.

Faixas de Projeto	Para $N \leq 5 \times 10^6$						Tolerância da Faixa de Projeto
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	-	-	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	100	100	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Figura 33: Especificação granulométrica - DNIT 141/2010

A partir da especificação e dos materiais disponíveis (fresado, brita $3/4''$, brita $3/8''$ e pó de pedra) inúmeras tentativas foram feitas para enquadrar a mistura em uma das faixas do DNIT. Vale a pena lembrar que as faixas E e F toleram materiais mais finos e pressupõe um desempenho inferior, tendendo-se a serem evitadas. Outro aspecto é a quantidade de material virgem a ser adicionada, quantidades muito elevadas de brita e pó de pedra tendem a elevar o custo da mistura (pelo custo do

insumo e distância de transporte) além de serem desinteressantes do ponto de vista ambiental.

A Tabela 9 e a Figura 34 apresentam os resultados obtidos com a mistura 70% de material fresado, 15% de brita $\frac{3}{4}$ " e 15% de pó de pedra, bem como a faixa A do DNIT. Neste caso a proporção de 70/30 (fresado/material virgem) conjuga de maneira satisfatória a questão técnica e econômica.

Tabela 9: Projeto de estabilização do fresado com adição de agregado virgem

Peneira	Abertura (mm)	Limites Faixa A		Centro faixa	Faixa trabalho		Mistura
2"	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	30,0	65,0	47,5	55,5	65,0	62,5
n 4	4,8	25,0	55,0	40,0	40,8	50,8	45,8
n 10	2,0	15,0	40,0	27,5	23,5	33,5	28,5
n 40	0,42	8,0	20,0	14,0	8,0	11,2	9,2
n 200	0,075	100,0	100,0	5,0	2,0	3,5	1,5

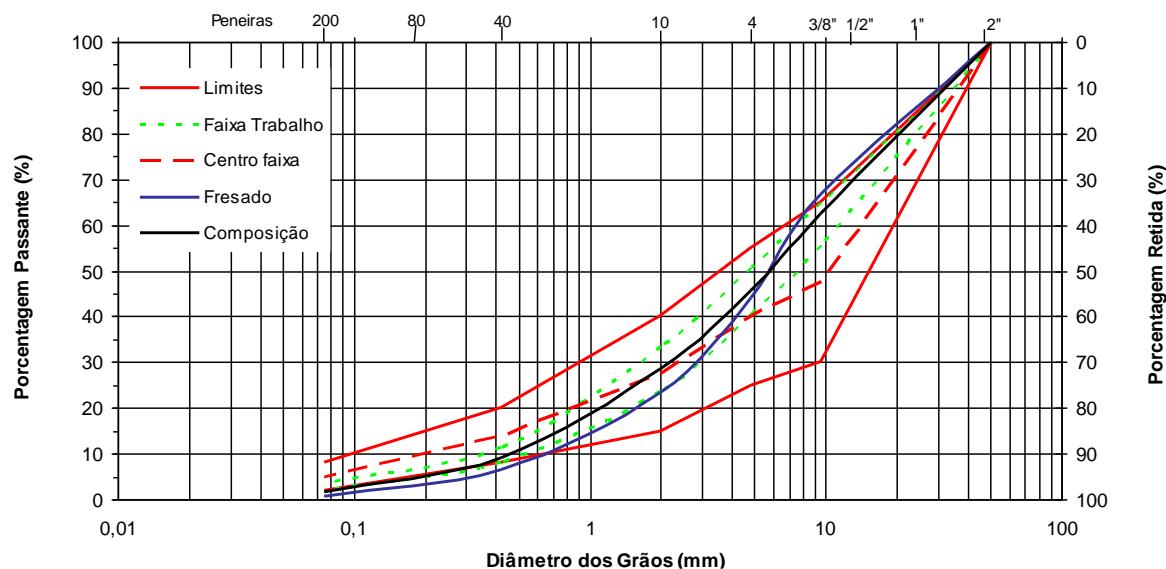


Figura 34: Projeto de estabilização do fresado com adição de agregado virgem

3.2 Compactação

Através do ensaio de compactação é possível obter a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de um solo quando compactado com determinada energia. O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra. No caso desta pesquisa foi utilizada a Energia Modificada, conforme é prática para materiais granulares, e seguiu os preceitos da norma DNER ME 162/94.

Nesta pesquisa três possibilidades de estabilização estão sendo testadas, apenas compactando o material (estabilização mecânica), corrigindo a granulometria com material virgem e compactando (estabilização granulométrica e mecânica) e corrigindo a granulometria com material virgem, adicionando cimento e compactando (estabilização granulométrica, química e mecânica). Para tanto duas curvas de compactação foram realizadas, uma do fresado e outra 70/30 (fresado + agregado). Para o caso da adição de cimento foram utilizados os mesmos parâmetros de compactação da curva 70/30.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados do ensaio de compactação do material fresado e da mistura 70/30, respectivamente. A Figura 35 apresenta ambas as curvas de compactação.

Tabela 10: Resultados do ensaio de compactação do fresado

Ponto	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)
1	3,03	1,938
2	5,31	1,963
3	6,37	2,018
4	9,16	1,992
5	10,04	1,972

Tabela 11: Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30 (fresado / agregado)

Ponto	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm ³)
1	3,31	2,007
2	5,37	2,024
3	7,15	2,076
4	8,67	2,088
5	13,82	1,985

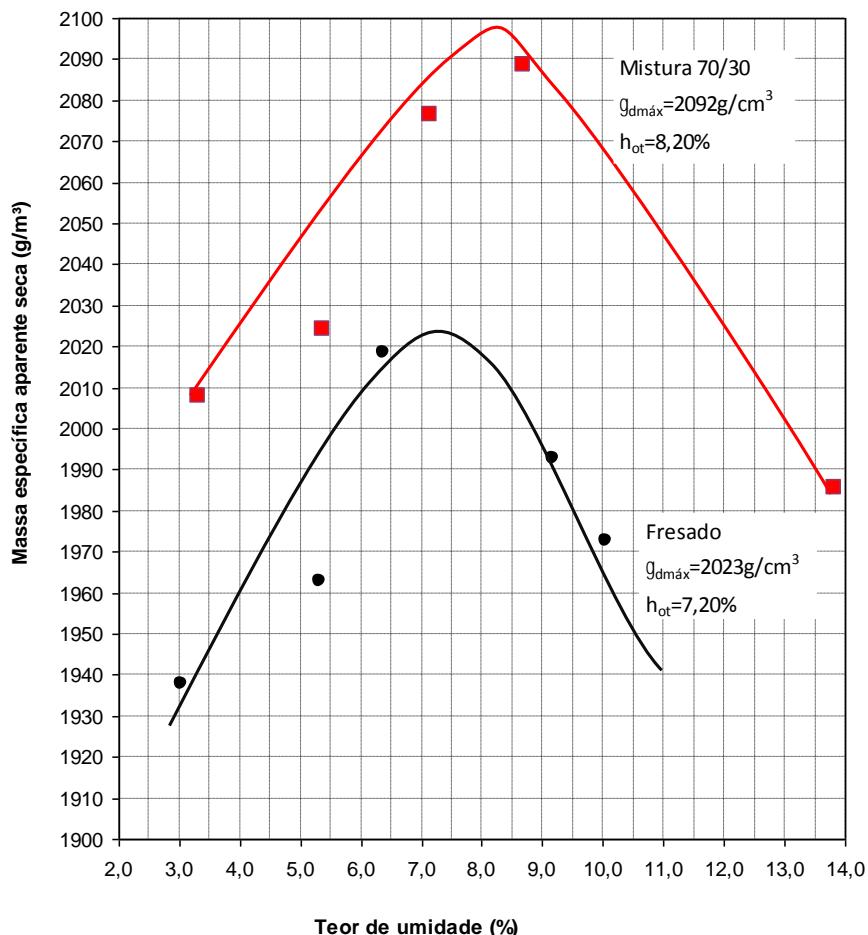


Figura 35: Curva de compactação do material fresado e da mistura 70/30

A partir da curva de compactação é possível determinar-se os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, conforme apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de compactação dos materiais em estudo

Material	Umidade ótima - h_{ot} (%)	Massa específica aparente seca - $\gamma_{dmáx}$ (g/cm ³)
Fresado	7,2	2,023
Mistura 70/30	8,2	2,092

A análise dos resultados das curvas e dos parâmetros de compactação dos materiais em estudo permite afirmar que a adição do material virgem preenche os vazios do fresado, o que é demonstrado pelo aumento do valor de $\gamma_{dmáx}$ e é extremamente benéfico, uma vez que materiais com menores índices de vazios tendem a ter uma maior resistência ao cisalhamento e uma maior rigidez, propriedades estas, desejáveis no caso da aplicação em camadas granulares de pavimentos.

A comparação dos valores encontrados para o fresado com dados da literatura indica variações nos valores, no caso do $\gamma_{dmáx}$ do fresado da BR-290, 2,023 g/cm³ se aproxima de 2,100 g/cm³ encontrado por Silva (2012) e fica um pouco mais distante de 1,798 g/cm³ do trabalho de Pinto, Cervo e Pereira (2012). Tais variações são bastante comuns, visto se tratarem de materiais de fontes distintas, e também pelo fato do fresado estar envolto pelo ligante asfáltico, sendo este um material hidrofóbico que dificulta o contato da água com os grãos.

Silva (2012) ao estabilizar o material fresado com pó de pedra, nas mesmas proporções de 70% de fresado e 30% material virgem, encontrou $\gamma_{dmáx}$ com variações em dois picos na curva de compactação. O primeiro pico com hot de 3,5% e $\gamma_{dmáx}$ aproximadamente de 2,175 g/cm³, já no segundo pico hot de 7,1% e $\gamma_{dmáx}$ aproximadamente de 2,250 g/cm³. Os valores encontrados por Silva mostram que pode haver indefinições de curvas em um mesmo material, mas resultados estes que não fogem dos valores encontrados nesta pesquisa.

3.3 Califórnia Bearing Ratio (CBR)

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida através do método do índice de suporte, que fornece o “Índice de Suporte Califórnia - ISC” (California Bearing Ratio - CBR), idealizado pelo engenheiro O. J. Porter, em 1939, no estado da California – USA.

Trata-se de um método de ensaio empírico, adotado por grande parcela de órgãos rodoviários no Brasil e no mundo. O objetivo do ensaio é determinar a força de um pistão para penetrar, sob condições controladas, em uma amostra que foi submetida a um processo de imersão por 96 horas. O valor obtido é normalizado em função do ISC ou CBR de uma brita de referência cujo valor é 100%.

O ensaio segue os preceitos da norma DNER ME 49/94 e é base do método de dimensionamento de pavimentos vigente no Brasil.

Os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, apresentados na Tabela 13 indicam para o material fresado um CBR de 56%. Para o caso do material fresado estabilizado granulometricamente (com 30% de material virgem) os valores de CBR ficaram entre 85 e 104%, em média 95%.

Tabela 13: Resultados do ensaio de CBR

Material	Amostra 01	Amostra 02	Média
	CBR (%) / Expansão	CBR (%) / Expansão	CBR (%) / Expansão
Fresado	45 / 0,00	67 / -0,44	56 / -0,22
Mistura 70/30	85 / -0,18	104 / -0,44	95 / -0,31

Pinto, Cervo e Pereira (2012), em condições similares, encontraram o valor de CBR de 38% para o material fresado enquanto Silva (2012) obteve 30%. Todos valores compatíveis com camadas de reforço e sub base.

Estes valores são típicos de solos grossos, pedregulhosos, do grupo G do Sistema Unificado de Classificação de Solos ou ainda dos grupos A1 e A2 da classificação do TRB (Transportation Research Board) (DNER, 1996). Materiais com ISC nesta ordem de grandeza são tipicamente utilizados como sub-base, onde a exigência vigente é que o ISC seja maior que 20% e expansão inferior a 1%, valores estes encontrados em todas as amostras ensaiadas.

Silva (2012) encontrou ISC de 45% para uma mistura estabilizada, abaixo dos valores encontrados na mistura com materiais da BR-290 (95%). Fica patente a eficiência da técnica de estabilização, abrindo inúmeras possibilidades de utilização como camada de pavimento. Conforme preconizado pelo método de projetos do DNER de 1981, para utilização como base granular de pavimentos o valor de ISC deve ser maior que 80% e expansão menor que 0,5%. Para o caso de rodovias com tráfego menor que 10^6 repetições do eixo padrão, para o período de projeto considerado, há a possibilidade de utilizar materiais com ISC maior ou igual a 60%.

A análise dos resultados é sempre realizada a partir do material tradicional, neste caso a BGS – Brita graduada simples. Ao reproduzirmos este material com a mistura contendo material fresado, algumas peculiaridades podem ser discutidas. A temperatura pode influenciar diretamente no desempenho das misturas, assim podemos também questionar o potencial de cicatrização da mistura. Na compactação das amostras, esse processo de cicatrização pode ser estabelecido devido às propriedades do ligante asfáltico presente no material fresado. A partir disso, temos que o material fresado tende a ganhar rigidez com o tempo quando puro, o que pode não ocorrer quando estabilizado com outros materiais. Nessa premissa, a utilização do pó de pedra, por exemplo, pode vir a anular essa cicatrização do material fresado, podendo inibir o aumento da rigidez em idades avançadas. Evidentemente que este fenômeno é potencializado quando se compacta em temperaturas mais elevada.

3.4 Resistência à compressão Simples (RCS)

A resistência à compressão Simples (RCS) ou resistência à compressão não-confinada é largamente utilizada para dosagem e controle de qualidade de concreto de cimento Portland e de solo-cimento. Após um determinado tempo de cura as amostras de 10x20cm são submetidas a um esforço de compressão até sua ruptura, anota-se a carga e dividindo pela área das amostras tem-se a RCS.

Nesta pesquisa as amostras foram submetidas a um processo de cura úmida por 7 e 28 e a velocidade de ruptura foi de 0,43mm/s. Os teores de cimento utilizados variaram de 2 a 5% e foram calculados a partir da massa seca do material.

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os resultados de RCS da mistura com 70% fresado e 30% de material virgem (15% de brita 3/4'' e 15% de pó de pedra) e cimento com 3, 7 e 28 dias de cura, respectivamente.

As amostras foram preparadas uma a uma e muitas daquelas desmoldadas com 2 dias de cura para ruptura com idade de 3 dias e com 2% de cimento (desmoldadas a 6 dias de cura) romperam-se no processo de desmoldagem. Na Figura 36 é possível observar o aspecto visual das amostras; observa-se a homogeneidade dos corpos de prova, corroborando com o baixo desvio padrão observado nos resultados de RCS (aos 7 e 28 dias com teores acima de 1%).

Os resultados aos 3 dias de cura não puderam ser aproveitados por insucesso na desmoldagem das amostras, então com 2 dias de cura. Vale lembrar que o cimento utilizado, com reação lenta e indicado para pavimentação, contribuiu para este processo. De forma semelhante, quando empregado teor de apenas 1% de cimento, independentemente da idade, não se consegue desmoldar e manipular a amostra sem confinamento, impossibilitando o ensaio de resistência.

Tabela 14: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 3 dias de cura

Corpo de Prova	Teor de Cimento (%)	RCS (MPa)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	1	-- ¹	--	--
2	1	-- ¹		
3	1	-- ¹		
4	2	-- ¹	--	--
5	2	-- ¹		
6	2	-- ¹		
7	3	0,01	0,01	--
8	3	-- ¹		
9	3	-- ¹		
10	4	0,01	0,01	--
11	4	-- ¹		
12	4	-- ¹		
13	5	0,02	0,015	0,007
14	5	0,01		
15	5	-- ¹		

Nota: ¹ amostra rompeu ao desmoldar

Tabela 15: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura

Corpo de Prova	Teor de Cimento (%)	RCS (MPa)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	1	-- ¹	--	--
2	1	-- ¹		
3	1	-- ¹		
4	2	0,37	0,38	0,01
5	2	0,38		
6	2	-- ¹		
7	3	0,64	0,61	0,03
8	3	0,58		
9	3	0,61		
10	4	1,19	1,09	0,11
11	4	1,11		
12	4	0,97		
13	5	1,79	1,83	0,03
14	5	1,84		
15	5	1,85		

Nota: ¹ amostra rompeu ao desmoldar

Tabela 16: Resultados ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura

Corpo de Prova	Teor de Cimento (%)	RCS (MPa)	RCS Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	1	-- ¹	--	--
2	1	-- ¹		
3	1	-- ¹		
4	2	0,38	0,40	0,03
5	2	-- ¹		
6	2	0,42		
7	3	0,75	0,94	0,17
8	3	1,08		
9	3	1,00		
10	4	1,25	1,38	0,13
11	4	1,40		
12	4	1,50		
13	5	2,20	2,07	0,23
14	5	1,80		
15	5	2,21		

Nota: ¹ amostra rompeu ao desmoldar



Figura 36: Aspecto visual da mistura 70/30 com cimento (a) após desmoldagem e (b) preparada com capeamento de enxofre para ruptura

Segundo a NBR 12253 - Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento e DNIT ES 301/2010 - Pavimentação – base de solo-cimento o teor de cimento adotado deve ser aquele cuja resistência média à compressão simples seja igual ou superior a 2,1 MPa aos sete dias de idade. Segundo tal prescrição o teor de

cimento que deveria ser empregado, sem margem operacional, seria de 5,26%, conforme Figura 37.

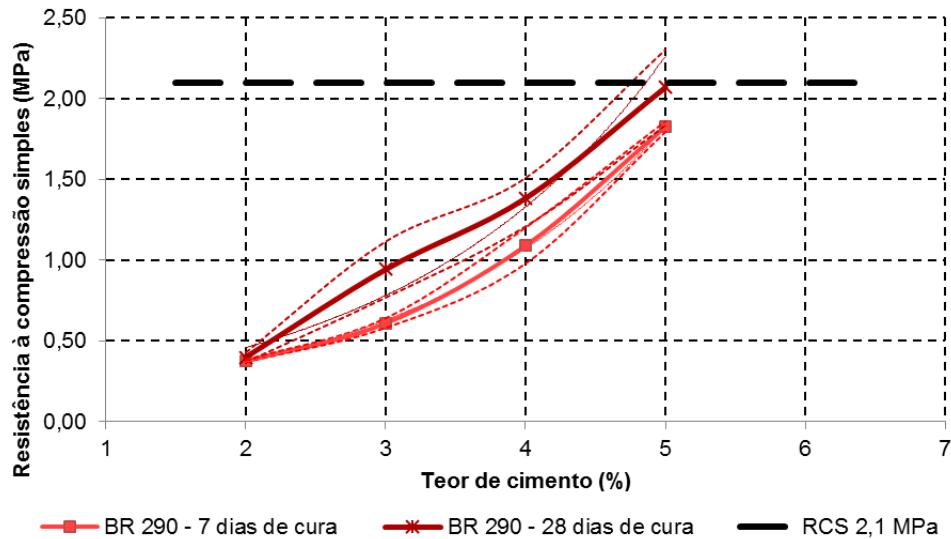


Figura 37: Resultados ensaios de resistência à compressão simples versus teor de cimento

No caso de implantação de rodovia e dependendo das condições, é aceitável que ao invés de 7 dias de cura seja considerado 28 dias, quando as reações de cimentação estariam chegando a um patamar de estabilização e, neste caso, o teor de cimento seria de 4,86%, valor este, utilizado para os ensaios de resistência à tração (R_t) e módulo de resiliência (M_r).

O teor de cimento pode ser considerado elevado e, lembrando que está sendo trabalhado com 30% de material virgem proveniente de britagem, o aspecto econômico deve ser cuidadosamente avaliado. Vale lembrar que o cimento utilizado foi o CP IV-32, cuja cura é lenta e benéfica no caso de grandes volumes de material, evitando ou minimizando a retração térmica e consequentemente, o trincamento advindo deste processo. Evidentemente que o processo de cura em campo deve ser acompanhado com muito cuidado.

Alguns trabalhos encontrados na literatura nacional apresentam valores abaixo dos encontrados nesta pesquisa, com algumas ressalvas. Trichês e Santos (2013) encontraram o valor de 3,0% ao estabilizar mistura com 30% de material fresado e

70% de agregado virgem, valores inversos ao desta pesquisa, justificando o baixo teor de cimento. Silva e Miranda Júnior (2000) obtiveram o teor de 3,0% para resistências superiores, os autores moldaram corpos de prova de camada de pavimento reciclado, sem definição do teor de material fresado e outros materiais da mistura.

3.5 Resistência à Tração (R_t)

A norma utilizada como base para execução deste ensaio foi a DNIT – ME 136/2010 - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Esta norma determina que o molde cilíndrico a ser utilizado tenha 10 cm de diâmetro interno do cilindro e 6,3 cm de altura, com altura mínima da amostra de 3,5 cm. O corpo de prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente na pista ou moldado em laboratório na prensa Marshall, sendo esta última utilizada nesta pesquisa. A Figura 38 apresenta um corpo de prova sendo ensaiado em prensa mecânica. Os resultados da ruptura dos corpos de prova passam pela equação 1 para determinar a resistência à tração:

$$R_{tcd} = \frac{2.F}{100.\pi.d.h} \quad (1)$$

Onde: R_{tcd} : Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

F : carga de ruptura (N);

d : diâmetro do corpo de prova (cm);

h : altura do corpo de prova (cm).



Figura 38: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Para o teor de 4,86% de cimento, conforme dosagem baseada na RCS, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 17. Nota-se que de 7 para 28 dias o incremento de resistência foi 27%, aproximadamente; ou seja é importante que a logística da obra permita uma cura pelo maior tempo possível, e que até os 28 dias as reações cimentantes são importantes no acréscimo de R_{tcd}.

Tabela 17: Resultados ensaios de resistência à tração com 4,86% de cimento

Corpo de Prova	Tempo de Cura (dias)	RT (MPa)	RT Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	0,21	0,22	0,013
2	7	0,23		
3	7	0,24		
4	28	0,22	0,28	0,051
5	28	0,28		
6	28	0,32		

Quando se utilizam camadas cimentadas em pavimento, elas tendem, pela sua elevada rigidez, concentrar tensões, o que geram esforços de tração em sua fibra inferior. O conhecimento da resistência é importante nestes casos. A relação tensão atuante / tensão resistiva pode, também, ser um indicador da resistência a fadiga do material.

3.6 Módulo de resiliência (MR)

O MR é a relação entre a tensão de tração aplicada (σ) repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica ou cimentada e a deformação específica recuperável (ε) correspondente à tensão aplicada, conforme Figura 39.



Figura 39: Ensaio para determinação do módulo de resiliência

A norma da *American Society For Testing and Materials*, ASTM D4123: *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*, é a utilizada na configuração do equipamento de laboratório, que consiste em uma prensa hidráulica IPC UTM25.

Antes de iniciar a medição do deslocamento, aplica-se uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do MR. A aplicação da carga é semi-senoidal para se aproximar da forma de carregamento da passagem de um pneu. A frequência

das cargas repetidas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) e a duração é de cerca de 0,10 segundo, com 0,9 segundo em repouso. Como a carga aplicada é geralmente pequena, o ensaio de MR é um ensaio não destrutivo e as mesmas amostras podem ser usadas para muitos testes de carga sob diferentes condições ambientais.

A Tabela 18 apresenta os resultados de ensaios de Mr com 4,86% de cimento, conforme dosagem realizada a partir do ensaio de RCS.

Tabela 18: Resultados ensaios de Mr com 4,86% de cimento

Corpo de Prova	Tempo de Cura (dias)	Mr (MPa)	Mr Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	5835	6122	405
2	7	-- ¹		
3	7	6409		
4	28	6249	7154	784
5	28	7585		
6	28	7629		

Nota: ¹ amostra rompeu no ensaio

Nota-se que, dos 7 para os 28 dias houve um acréscimo de rigidez de 16%, ou seja amostra elevou sua resistência em 27% e a rigidez em 16. É possível inferir que o material melhora seu comportamento se analisado aos 28 dias de cura, sua relação MR/Rtcd é reduzida de 27.827 para 25.550, indicando um melhor comportamento a fadiga.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A questão ambiental e da sustentabilidade, está sendo amplamente discutida e ganha cada vez mais atenção mundial devido à necessidade de preservação dos recursos disponíveis no planeta, deverá tornar-se o fator mais importante na elaboração de projetos de engenharia, cuja prática acaba, geralmente, interferindo e agredindo o meio ambiente.

Assim, é observada uma tendência clara de que os países de primeiro mundo estão buscando incansavelmente ampliar a utilização de técnicas e práticas sustentáveis, dentre elas o uso de subprodutos industriais, misturas mornas e a reciclagem de pavimentos, com pesquisas e estudos mas, principalmente, com políticas públicas que incentivem tais práticas.

O fresado é um material de grande disponibilidade sempre que se faz necessária a conservação/manutenção de uma rodovia, e sua correta aplicação, pode afirmar ainda mais sua capacidade técnica e econômica. As técnicas de reciclagem aliadas à necessidade de incorporar aspectos ambientais e econômicos aos projetos rodoviários, incentivam e motivam iniciativas de utilização do material fresado como um material de construção nobre e capaz de substituir os materiais tradicionais em diversas camadas do pavimento asfáltico.

A utilização como base flexível ou cimentada tem vantagem de não necessitar equipamentos especiais (a não ser os já usuais de obra) enquanto que para utilização do fresado em revestimento (com reciclagem à quente) necessita de usinas especiais, as quais já estão disponíveis em grande escala no exterior. No Brasil há poucos exemplares.

Nesta pesquisa, a avaliação mecânica apresentou resultados positivos ao desenvolver uma mistura com agregados virgens, de modo que a capacidade de suporte do material fosse aumentada. Ensaios de compactação e ISC realizados no fresado puro e na mistura elaborada (70% fresado + 30% agregado virgem),

mostraram que a estabilização granulométrica teve melhoria de propriedades em relação ao material fresado puro estabilizado mecanicamente. O CBR da mistura passou de 56 para 95%, afirmando que uma quantidade baixa de material adicionado eleva consideravelmente a capacidade de desempenho do material final. Ambos os materiais podem ser utilizados como camada portante de pavimentos flexíveis, um como sub-base e outro como base.

Os resultados da estabilização granulométrica guiaram o trabalho para a estabilização química com utilização de cimento Portland pozolânico. Os objetivos eram atingir resultados positivos de resistências à compressão e tração, e para que estas fossem maximizadas com o poder aglutinante do cimento. O cimento também proporcionou que pudesse ser moldados os corpos de prova com tempo maior que 6 dias e teores maiores que 2% de cimento, uma vez que não era possível a compactação e desmoldagem somente com os materiais da mistura.

O teor encontrado de cimento Portland na mistura ficou em 4,86%, tendo como alvo a resistência à compressão axial de 2,1 MPa aos 28 dias. Valores compatíveis com resultados encontrados na literatura, mas que ainda necessita de uma avaliação econômica para afirmar sua viabilidade juntamente com a eficácia técnica.

Os valores de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral também foram determinados e podem auxiliar a análise mecanicista de pavimentos.

Um comparativo entre os tempos de cura de 7 e 28 dias confirmam a necessidade de cura à idades mais avançadas, mesmo quando, por conservadorismo, se adote 7 dias de cura como critério de dosagem. A relação do MR/RT encontrada mostrou evolução positiva nos valores na idades maior de cura, aumentando a tenacidade das misturas. Isso ocorre devido ao crescimento acentuado da resistência à tração, superior ao crescimento do módulo de resiliência com o tempo.

Desta forma, e suportado pelos resultados laboratoriais apresentados, torna-se evidente o futuro promissor para utilização do material fresado, principalmente com o material fresado estabilizado mecânicamente e granulometricamente, que aliam de maneira

inquestionável o quesito técnico e econômico, com a realização de ensaios mais simples e de resultados imediatos. O reaproveitamento destes materiais se torna de extrema importância pela constante intervenção nas rodovias brasileiras para qualquer tipo de conservação, que proporcionam toneladas de agregados com potencial de utilização desde que aplicados de forma correta.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Sempre buscando o aperfeiçoamento da técnica e para dar continuidade ao presente trabalho propõem-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

Estabilização do material fresado em outras proporções, focando o máximo de utilização deste material;

A execução de segmentos experimentais, aliados aos ensaios em laboratório, para afirmar ainda mais o potencial de utilização do material;

Analizar a estabilização química com outros tipos de cimento, como o CP II, por apresentar menor quantidade de pozolona na sua composição;

Realizar ensaios triaxiais, a fim de obter resultados de módulo de resiliência da mistura estabilizada granulometricamente e do material fresado puro;

Analizar em laboratório a influência da temperatura. Seja está na compactação como já foi citado durante o trabalho, ou para a execução dos ensaios como os triaxiais, de resistência à tração e determinação dos módulos resilientes nos materiais cimentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15619**: Misturas asfálticas – Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2008. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ALHASSAN, Musa. **Potential of Rice Husk Ash for soil stabilization**. Assumption University of Thailand, AU J. T. 11(4): 246-250, 2008. Bangkok, Tailândia, 2008.

ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia with Rice Husk Ash as an Additive**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 10, n. 2, p. 117–134, Amsterdam, Holanda, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4123**: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. Philadelphia, 1982. 4p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State-of-the-Art Report on Soil Cement**. ACI 230.1 R-90, Farmington Hills, 1997.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. U.S. Department of Transportation, **FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1997**.

BALBO, J.T.; BODI, J. Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: Alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade. In: XVIII ANPET – CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004.

BAPTISTA, A. M. C. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para seu estudo e aplicação.** 2006. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2006.

BEHAK, L. **Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. 504 p. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.

BESSA, I. S. et al. Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à frio. In: 21^a ENCONTRO DO ASFALTO, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2014.

BONFIM, V.; DOMINGUES A. A. Utilização de fresagem e reciclagem *in situ* à frio: alternativas na recuperação de pavimentos asfálticos. In: 29^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1995, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, p. 603-621, 1995.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

BROSSEAUD, Yves. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011.

CASTRO, L. N. **Reciclagem à frio “in situ” com espuma de asfalto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa Confederação Nacional dos Transportes de rodovias 2012.** Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Documents/Arquivos%202012/resumo_pd_2410.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2013.

DALLA ROSA, F.; JORGE, F.; MULLER, E. R. Estudo da adição de diferentes agentes estabilizadores na reciclagem de um pavimento na rodovia BR-116. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado, 2013.

DAVID, D. **Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2006.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos.** 2004, 110p. Tese de Doutorado - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER/RS – EL 108/01:** Determinação do Índice de Lamelaridade. Porto Alegre, 2001, 4 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER/RS – ES – P 16/1991:** Concreto Asfáltico. Porto Alegre, 1998, 21 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ES 180/94:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ES 301/97:** Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ES 303/97:** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 035/98:** Agregados – determinação de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 049/94:** Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 053/94:** Misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 054/97:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997, 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 083/98**: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 084/95**: Agregado miúdo – determinação da densidade real. [S.I.], 1995, 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 086/94**: Agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 089/94**: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 162/94**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 181/94**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 195/97**: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro. 1996, 327p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT-ES 141/2010**: Pavimentação asfáltica – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT-ES 405/2013: Pavimentação – reciclagem de pavimento à frio “*in situ*” com adição de espuma de asfalto. Rio de Janeiro, 2013, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT-ME 135/2010: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Origem: DNER-ME 133/1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT-ME 136/2010: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
Manual de Pavimentação. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2º Ed. Rio de Janeiro, 2006, 314 p.

EDEH, J. E.; ONCHE; OSINUBI, K. J. Rice husk ash stabilization of reclaimed asphalt pavement using cement as additive. In: STATE OF THE ART AND PRACTICE IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, GEO-CONGRESS 2012, Oakland. **Anais...** American Society of Civil Engineers, ASCE, Oakland, Estados Unidos, 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report.** U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.

FONSECA, P. **Reciclagem de pavimentos rodoviários.** Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. 2002. Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>. Acesso em 27 de Outubro de 2014.

GENCER, S. E. et al. **A new method for hot recycling of asphalt.** In: 5TH EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 2012, Istanbul. **Anais...** Istambul, Turquia, 2012.

GUYER, J. P. et al. **Introduction to soil stabilization in pavements**. 2011. 28f. Continuing Education and Development, New York. Nova Iorque, Estados Unidos, 2011. Notas de aula.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Butterworths, Melbourne, 1972. 374p.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S.; TUCHUMANTEL JR, O. **Cold In Situ Recycling – ReciFlex – at SP-147**. In: 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2005.

MEDINA, J. ; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574 p. 2005.

MOTA, E. P. F.; BUENO, B. S. Panorama da melhoria de solos no Brasil. In: IV Congresso Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S.. Reciclagem de pavimento para restauração da BR 282 em Santa Catarina – estudo de caso. In: 40^a RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010.

PAIVA, C. E. L. de; OLIVEIRA, P. C. A. de. Impacto da atividade do CAP e do percentual de asfalto fresado na resistência à fadiga de uma base reciclada com cimento. In: 21^a ENCONTRO DO ASFALTO, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2014.

PCA (2013). Portland Cement Association. Disponível em: <http://www.cement.org/pavements/pv_sc_fdr.asp>. Acesso em: 21 nov. 2014.

PINTO, M. M.; CERVO T. C.; PEREIRA, D. S. **Reutilização de material fresado em acostamentos como agente regularizador e nivelador**. Revista Pavimentação. v.6, p.18-25, 2012.

PRIETTO, Pedro Domingues Marques; et al. Avaliação experimental de solos quimicamente estabilizados para utilização em bases de estradas de baixo volume de tráfego. In: 15º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E

ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. **Anais...** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS, Gramado, 2010.

SACHET, T. GONÇALVES, F. P. Reciclagem de bases granulares para pavimentos asfálticos. In: 39^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2008, Recife. **Anais...** Recife, 2008.

SCHENDEL, C. et al. Novas alternativas de materiais em vias de pavimentação. In: IV SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 2012, Bagé. **Anais...** Unipampa, Bagé, 2012.

SILVA, C. A. R. da; MIRANDA JÚNIOR, C. Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-Base Estabilizada com Cimento na BR-381: Uma Experiência. In: 32^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília. **Anais...** Brasília, Volume II, p. 488-497, 2000.

SILVA, C. F. S. C. **Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis.** 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

TAHA, R. et al. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavements aggregate for road bases and subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering.** Miami, Maio/Junho, p. 239-245, 2002.

TEREX ROADBUILDING (2007). **Histórico da evolução das usinas de asfalto.** Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/3encontroTecnico/Historico eCalibragemdeUsinasTEREX.pdf>. Acesso em 12 de Novembro de 2014.

TRICHÊS, G.; LORENA, M.; SANTOS, A. Reciclagem de pavimento com adição de cimento: estudo do desempenho da rodovia SC 303, trecho BR 282 - Capinzal (SC). 40^a RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Desempenho da reciclagem com adição de cimento da rodovia SC 150. 42^a RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado, 2013.

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement:** Techniques and their Evolution. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1989. 125 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** 1 Ed. São Paulo: Mcgraw – Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975. 711p.