



FATEC-SP

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

ANDRÉ LUIS MARTIN

RONALDO ALMEIDA COSTA

**BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO PARA CAMADAS DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTO VIÁRIO**

SÃO PAULO

2013

ANDRÉ LUIS MARTIN
RONALDO ALMEIDA COSTA

**BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO PARA CAMADAS DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTO VIÁRIO**

Projeto de Monografia apresentada à
Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Tecnólogo em Movimento de Terra e
Pavimentação.

Orientador: Prof. Mestre Josué Alves Roso

SÃO PAULO

2013



FATEC-SP

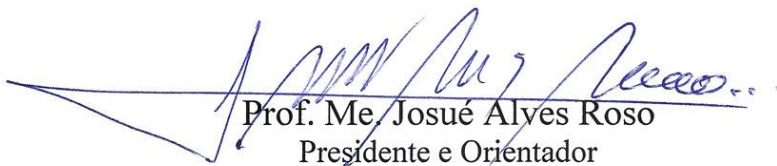
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transporte e Obras de Terra

**Beneficiamento de Resíduos de Construção e Demolição para Camadas de
Base e Sub-base de Pavimento Viário.**

André Luis Martin & Ronaldo Almeida da Costa

Monografia aprovada pela Banca Avaliadora constituída por:



Prof. Me. Josué Alves Roso
Presidente e Orientador



Prof.ª Me. Rosana Maria Siqueira



Prof. Jose Angelo Ricardo

São Paulo, 15 de junho de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho as nossas esposas Jussara e Viviane que por um longo tempo abriram mão do convívio social e nos apoiaram durante essa jornada sempre nos incentivando a seguir em frente.

Também a minha filha Ariane e ao futuro membro da família Costa ainda por nascer que o mundo deles possa ser melhor com uma vida repleta de felicidades e alegrias.

Aos nossos familiares presentes e aqueles que já partiram, e a todos que sempre nos apoiaram a seguir no caminho certo.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador, Professor Mestre Josué Alves Roso, pelo apoio, conselhos, críticas, elogios, e pelo direcionamento ao longo de toda a pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Edson de Moura, que sem os conselhos e contatos jamais teríamos encontrado o caminho correto para a execução desta monografia.

As Professoras Arisol Simone Sayuri Tsuda Yamamoto e Lis Cabrini, que pacientemente corrigiram por mais de um ano nossos erros de diagramação, e imperfeições neste trabalho.

Ao Diretor Técnico das empresas do Grupo ANE Eng. Valmir Bonfim e o Laboratorista da Empresa Fremix Eder Monteiro, que sem o apoio, o convite às obras e o material que nos foi fornecido, este trabalho jamais teria passado de uma ideia.

E também aos demais professores do Depto de Transportes e Obras de Terra que de alguma forma contribuíram para a elaboração e desenvolvimento do nosso trabalho.

EPÍGRAFE

1. O vós, todos os que tendes sede, vinde às águas, e os que não tendes dinheiro, vinde, comprai, e comei; sim, vinde, comprai, sem dinheiro e sem preço, vinho e leite.

2. Por que gastais o dinheiro naquilo que não é pão? E o produto do vosso trabalho naquilo que não pode satisfazer? Ouvi-me atentamente, e comei o que é bom, e a vossa alma se deleite com a gordura.

3. Inclinaí os vossos ouvidos, e vinde a mim; ouvi, e a vossa alma viverá; porque convosco farei uma aliança perpétua, dando-vos as firmes beneficências de Davi.

4. Eis que eu o dei por testemunha aos povos, como líder e governador dos povos.

5. Eis que chamarás a uma nação que não conheces, e uma nação que nunca te conheceu correrá para ti, por amor do Senhor teu Deus, e do Santo de Israel; porque ele te glorificou.

6. Buscai ao Senhor enquanto se pode achar, invocai-o enquanto está perto.

7. Deixe o ímpio o seu caminho, e o homem maligno os seus pensamentos, e se converta ao Senhor, que se compadecerá dele; torne para o nosso Deus, porque grandioso é em perdoar.

8. Porque os meus pensamentos não são os vossos pensamentos, nem os vossos caminhos os meus caminhos, diz o Senhor.

9. Porque assim como os céus são mais altos do que a terra, assim são os meus caminhos mais altos do que os vossos caminhos, e os meus pensamentos mais altos do que os vossos pensamentos.

10. Porque, assim como desce a chuva e a neve dos céus, a para lá não tornam, mas regam a terra, e a fazem produzir, e brotar, e dar semente ao semeador, e pão ao que come.

11. Assim será a minha palavra, que sair da minha boca; ela não voltará para mim vazia, antes fará o que me apraz, e prosperará naquilo para que a envieí.

12. Porque com alegria saireis, e em paz sereis guiados; os montes e os outeiros romperão em cântico diante de vós, e todas as árvores do campo baterão palmas.

13. Em lugar do espinheiro crescerá a faia, e em lugar da sarça crescerá a murta; o que será para o Senhor por nome, e por sinal eterno, que nunca se apagará.

RESUMO

Com o crescimento da indústria da construção civil no Brasil e no mundo, o resíduo de construção e demolição (RCD) vem sendo o principal elemento que contribui para a geração de impactos ambientais notórios. Com o intuito de se amenizar tais impactos, governos estaduais em conjunto com os municípios, vêm desenvolvendo programas que incentivem o uso do RCD bem como o do resíduo asfáltico de petróleo (RAP), material resultante da fresagem da malha viária, em vias que haja viabilidade técnica. Esse trabalho ensaiou materiais oriundos da demolição/desconstrução dos edifícios São Vito e Mercúrio, e o RAP resultante da fresagem da malha viária da cidade de São Paulo. Esses materiais foram submetidos a processos e ensaios na usina recicladora Júlio de Mesquita Neto - Fremix. No que diz respeito aos materiais utilizados nessa pesquisa e ao ensaio de análise granulométrica, foram submetidas às seguintes misturas: (RAP/RCD/CAL; RAP/BGS/CIM; RCD; RCD/CIM), sendo que as mesmas atenderam os limites superiores e inferiores, não havendo grandes variações significativas. Após verificar e experimentar, por meio de ensaios laboratoriais, Proctor, Marshall, resistência à tração por compressão diametral, e o ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC) pode-se comprovar a viabilidade técnica e econômica desses materiais. Os resultados demonstraram que as propriedades físicas e comportamento mecânicos de ambos, apresentam condições para aplicação desses materiais em pavimentação.

Palavras-Chave: Resíduo de construção e demolição. Impactos ambientais. Resíduo asfáltico de petróleo. Propriedades físicas. Comportamento mecânico. Ensaio de Proctor. Ensaio de compactação método Marshal. Resistência à tração por compressão diametral. Índice de suporte Califórnia. Análise granulométrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes – SP.....	11
Figura 2.2 – Reciclagem dos RDC no próprio canteiro de obras.....	13
Figura 2.3 – Composição média dos RDC de Salvador – BA.....	14
Figura 2.4 – Cidade alemã após bombardeio.....	17
Figura 2.5 – Usina de RCD do Estoril em Belo Horizonte – MG.....	22
Figura 2.6 – Usina de RCD CTRS em Belo Horizonte – MG.....	22
Figura 2.7 – Usina de reciclagem do RCD de Caçapava – SP.....	22
Figura 2.8 – Usina de reciclagem Julio de Mesquita da Fremix em São Paulo - SP.....	22
Figura 2.9 – Blocos pré-moldados de concreto Caçapava – SP.....	23
Figura 2.10 – Tubulação de águas pluviais Caçapava – SP.....	23
Figura 2.11 – Camadas de base e reforço para passeios guias e sarjetas Av. Brig. Faria Lima, São Paulo – SP.....	23
Figura 2.12– Usina de reciclagem móvel de RCD, Av. Sapopemba – SP.....	26
Figura 2.13 – Pavimentação ecológica, Av. Sapopemba – SP.....	26
Figura 2.14 – Camadas de base em material reciclado, Av. Sapopemba – SP.....	26
Figura 2.15 – Compactação do RAP espumado, Av. Sapopemba – SP.....	26
Figura 2.16 – Etapas de execução de obras de pavimentação viária com utilização de RAP e RCD, na R. Maria do Carmo Marialva Aranha em Pirituba – SP.....	27
Figura 2.17 – Seção transversal de pavimento para vias de tráfego leve.....	28
Figura 2.18 – Seção transversal de pavimento para vias de tráfego pesado.....	28
Figura 2.19 – Etapas de execução de obras de pavimentação viária com utilização de RAP, na Rodovia Ayrton Senna – Guarulhos, SP.....	30
Figura 2.20 – Obra em via com pavimento reciclado Belo Horizonte – MG.....	31
Figura 2.21 – Base com agregado reciclado, Goiânia – GO.....	32
Figura 2.22 – Meio fio com agregado composto de RCD, Goiânia – GO.....	32
Figura 2.23 – Pista com agregado reciclado de RCD, Goiânia – GO.....	33
Figura 2.24 – Guias e sarjetas com agregado de RCD, Goiânia – GO.....	33

Figura 3.1 – Faixa granulométrica RAP / RCD / CAL.....	38
Figura 3.2 – Faixa granulométrica RAP / BGS / CIM.....	39
Figura 3.3 – Faixa granulométrica RCD.....	40
Figura 3.4 – Faixa granulométrica RCD / CIM.....	41
Figura 3.5 – Ensaio de Proctor RAP / RCD / CAL.....	44
Figura 3.6 – Ensaio de Proctor RAP / BGS / CIM.....	45
Figura 3.7 – Ensaio de Proctor RCD / CIM.....	46
Figura 3.8 – Ensaio de compactação Marshall RAP / RCD / CAL.....	49
Figura 3.9 – Ensaio de compactação Marshall RAP / BGS / CIM.....	50
Figura 3.10 – Ensaio de compactação Marshall RCD / CIM.....	51
Figura 3.11a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / RCD / CAL.....	55
Figura 3.12a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / BGS / CIM.....	58
Figura 3.13a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / BGS / CIM.....	61
Figura 3.14a / b / c – Ensaio de I.S.C. RAP / RCD / CAL.....	67
Figura 3.15a / b / c – Ensaio de I.S.C. RCD.....	69
Figura 4.1 – Câmara de expansão onde é produzida a espuma de asfalto.....	73
Figura 4.2 – Ensaio de I.S.C. RCD.....	76
Figura 5.1 – Rod. Ayrton Senna Km 15 Guarulhos – SP.....	77
Figura 5.2 – Rod. Ayrton Senna Km 15 Guarulhos – SP.....	77
Figura 5.3 – Av. Sapopemba São Paulo – SP.....	77
Figura 5.4 – Av. Sapopemba São Paulo – SP.....	77
Figura 5.5 – Corpos de prova da Rod Ayrton Senna, Guarulhos – SP.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Geração de RCD em países membros da União Européia.....	8
Tabela 2.2 – Estimativa da geração de RCD em alguns municípios paulistas.....	9
Tabela 2.3 – Composição, em %, do RCD de diversas cidades brasileiras.....	13
Tabela 2.4 – Participação (%) dos RCD.....	15
Tabela 2.5 – (%) Reutilizada dos RCD em alguns países da União Europeia.....	18
Tabela 2.6 – Comparativo de preços por m ³ de agregado de RCD.....	25
Tabela 3.1a / b – Análise granulométrica RAP/RCD/CAL HIDRATADA.....	38
Tabela 3.2a / b – Análise granulométrica RAP/BGS/CIMENTO PORTLAND.....	39
Tabela 3.3a / b – Análise granulométrica RCD.....	40
Tabela 3.4a / b – Análise granulométrica RCD/CIMENTO PORTLAND.....	41
Tabela 3.5a / b – Ensaio de Proctor RAP/RCD/CAL HIDRATADA.....	44
Tabela 3.6a / b – Ensaio de Proctor RAP/BGS/CIMENTO PORTLAND.....	45
Tabela 3.7a / b – Ensaio de Proctor RCD/CIMENTO PORTLAND.....	46
Tabela 3.8a / b / c – Ensaio de Compactação Marshall RAP/RCD/CAL.....	49
Tabela 3.9a / b / c – Ensaio de Compactação Marshall RAP/BGS/CIMENTO.....	50
Tabela 3.10a / b / c – Ensaio de Compactação Marshall RCD/CIMENTO.....	51
Tabela 3.11a / b / c / d / e / f / g / h / i – Ensaio de ITS RAP/RCD/CAL.....	54
Tabela 3.12a / b / c – Ensaio de Compressão Diametral RAP/RCD/CAL.....	56
Tabela 3.13a / b / c / d / e / f / g / h / i – Ensaio de ITS RAP/BGS/CIMENTO.....	57
Tabela 3.14a / b / c – Ensaio de Compressão Diametral RAP/BGS/CIMENTO.....	59
Tabela 3.15a / b / c / d / e / f / g / h – Ensaio de ITS RCD/CIMENTO.....	60
Tabela 3.16a / b / c – Ensaio de Compressão Diametral RCD/CIMENTO.....	62
Tabela 3.17 – Padronização de pressões para ensaio do ISC.....	65
Tabela 3.18a / b / c / d / e – Índice de suporte Califórnia RAP/RCD/CAL.....	66
Tabela 3.19a / b / c / d / e – Índice de suporte Califórnia RCD.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Cimento asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEASA	Centro de Abastecimento S. A.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTRS	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (EXTINTO)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EC	<i>European Commission</i>
EPA	<i>Environment Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	<i>Federal Highway administration U.S. Departament of Transportation</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
ITS	<i>Indirect Tensile Strength</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
PMBH	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
RAP	Resíduo Asfáltico de Petróleo
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.1.1 Geral	3
1.1.2 Específico	3
2 O RESIDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	4
2.1 ASPECTOS GERAIS	4
2.2 DEFINIÇÃO	5
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS	6
2.3.1 Classificação segundo suas normas características	6
2.3.2 Classificação segundo a Reciclagem	6
2.3.3 Classificação segundo a cor	7
2.4 A GERAÇÃO DE RCD	8
2.5 IMPACTO AMBIENTAL	10
2.6 COMPOSIÇÃO DOS RCD – BRASIL E MUNDO	12
2.7 RECICLAGEM DOS RCD	15
2.7.1 Reciclagem de RCD no Mundo	16
2.7.2 Reciclagem de RCD no Brasil	19
2.8 APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD	23
2.9 EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD EM PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL	24
2.9.1 Utilização de agregados de RCD em São Paulo – SP	24
2.9.2 Utilização de agregados de RCD em Belo Horizonte – MG	31
2.9.3 Utilização de agregados de RCD em Goiânia – GO	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 TRIAGEM DO RCD/RAP	34
3.2 ENSAIOS	35
3.2.1 Composição granulométrica simples	35
3.2.2 Ensaio de proctor	42
3.2.3 Ensaio de compactação método Marshall modificado	47
3.2.4 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral	52
3.2.5 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) – <i>Califórnia Bearing Ratio</i> (CBR)	63
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS	70
4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	71
4.3.1 Ensaio de compactação Proctor	71

4.3.2 Ensaio de compactação Marshall	72
4.4 ESPUMA DE ASFALTO	72
4.5 ENSAIOS MECÂNICOS	74
4.5.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	74
4.5.2 Ensaio do índice de suporte Califórnia (ISC).....	75

5 CONCLUSÕES 77

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	77
5.2 CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO	78
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79

REFERÊNCIAS

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um setor da economia que vem apresentando um elevado crescimento não só para o Brasil, mas a todos os países em processo de desenvolvimento. Caracteriza-se por absorver, direta ou indiretamente, grande número de mão de obra. Em contrapartida observa-se que esse setor provoca impactos ambientais de consideráveis, pois, é um consumidor em potencial de recursos naturais e um grande gerador de resíduos.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são popularmente chamados de entulhos. Segundo Ferreira (1999),

[...] entulho significa calça, pedregulho, areia, terra, tudo quanto sirva para entupir, aterrar, nivelar depressão de terreno, escavação, fossa, vala, etc.; conjunto de fragmentos ou restos de tijolo, argamassa, madeira, etc., provenientes da construção de um prédio; materiais inúteis resultantes de demolição; escombros, ruínas.

Os resíduos de construção e demolição representam 50% dos resíduos sólidos urbanos (RSU). No Brasil, a geração de RCD per capita pode ser estimada em 500 kg/hab. ano pela média de algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999), entre 0,7 e 1,0 tonelada/hab. ano na Europa (PERA, 1996). O descarte irregular dessa elevada quantidade de resíduos sobre o meio ambiente tem ocasionado problemas de diversas ordens na sociedade.

As áreas irregulares de descarte, vistas como solução para o destino de pequenos volumes de RCD e o esgotamento de lugares para deposição de resíduos, decorrente do incessante descarte de grandes volumes, geram inevitáveis impactos em todo o espaço urbano. Estes passivos ambientais são plenamente visíveis e revelam comprometimento da qualidade do ambiente e da paisagem local. É o caso dos prejuízos nas condições de tráfego de pedestres e veículos, drenagem superficial e assoreamento/obstrução de córregos, multiplicação de vetores de doenças e outros efeitos (NETO, 2004).

Verifica-se que os frequentes alagamentos ocorridos nas estações chuvosas em cidades como São Paulo, são ocasionados pela obstrução dos sistemas de drenagem pelos resíduos sólidos urbanos. A água sem ter por onde escoar alaga as vias públicas, e consequentemente deteriora o pavimento urbano.

Outro aspecto analisado é a destinação dada aos RCD. Pelo fato de representarem uma parcela considerável dos resíduos sólidos urbanos (ANGULO *et al.*, 2003), conclui que

esse resíduo contribui de forma significativa para o esgotamento dos aterros sanitários, sendo necessária a criação de novos locais para destinação dos mesmos. Como consequência os novos aterros estão localizados cada vez mais distantes dos centros urbanos devido à dificuldade de se encontrar novas áreas, e pelo fato das áreas existentes serem ambientalmente protegidas, o que gera um custo adicional com transporte/logística destes resíduos, pelo fato dos mesmos percorrerem distâncias cada vez maiores para despejo.

Com o intuito de se minimizar os impactos ambientais pela construção civil, vários países já atentaram para a necessidade de reciclar o RCD, o que deve ser realizado por meio de pesquisas para obtenção de materiais que atendam aos padrões de qualidade e normas técnicas vigentes (LEVY, 1997).

O processo de reciclagem do RCD é realizado nas usinas recicladoras. A primeira usina de reciclagem de entulho instalada no Hemisfério Sul foi a de Itatinga, SP. Com capacidade inicial para reciclar 700 m³/dia de resíduos, destina sua produção para as administrações regionais situadas na zona sul do estado de São Paulo. A usina opera com 50% de sua capacidade, em decorrência de sua localização na periferia da cidade, o que atrapalha o recebimento dos resíduos (BIDONE, 2001).

Com a chegada dos resíduos, a primeira etapa do processo é a separação manual e visual NBR 15116, (ABNT, 2004h) separando o RCD dos materiais recicláveis para outra finalidade como plástico, metais, papel, papelão, trapos entre outros. Na sequência os britadores são abastecidos para a obtenção de frações menores. Após britagem o material é submetido a ensaios para caracterização física e mecânica, como granulometria, absorção, índice de suporte califórnia (ISC), módulo de resiliência entre outros. Comumente os resultados de comportamento mecânico e físico obtidos, se mantêm dentro dos padrões estipulados pelas normas que regem os devidos ensaios, sendo o seu uso indicado no caso para pavimentação de vias com volume de tráfego leve com $N \leq 10^6$ de repetições de eixo-padrão de 80 KN (MOTTA *et al.*, 2004).

Além de sua utilização para pavimentação, o agregado reciclado de RCD é utilizado como agregado para concreto pela possibilidade de melhoria no desempenho do concreto pelo baixo consumo de cimento (ZORDAN, 2002), como agregado para argamassas reduzindo o consumo de cimento e cal e pelo ganho na resistência à compressão do material reciclado em relação às argamassas convencionais (ZORDAN, 1997) e por fim na confecção de materiais de construção.

Por ser um material existente em grande quantidade, que pode apresentar características funcionais e estruturais para aplicação em vários setores da construção, verifica-se que esse material pode ser alternativa viável para utilização em pavimentação, pois pode apresentar características técnicas perfeitamente aplicáveis, menores custos e também a preservação dos recursos naturais jazidas minerais que se encontram cada vez mais escassas.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Geral

O objetivo da pesquisa consiste em estudar a viabilidade técnica/econômica do agregado de RCD e do agregado de RAP proveniente da Usina Recicladora Julio de Mesquita da Fremix (Barra Funda-São Paulo), em misturas para camadas de base e sub-base de pavimentos da região metropolitana de São Paulo, por meio de ensaios para caracterização de propriedades de natureza física e mecânica em amostras devidamente dosadas.

1.1.2 Específico

Caracterização do agregado de RCD e RAP e sua conformidade com os padrões exigidos para camadas de base e sub-base por meio dos seguintes ensaios:

Grandeza física: análise granulométrica e faixa de dosagem, baseado nos padrões normatizados exigidos para camadas de reforço e base de pavimentos flexíveis;

Grandeza mecânica: ensaio de resistência à tração por compressão diametral, compactação e índice de suporte Califórnia.

Comparação dos resultados obtidos em ambos os ensaios do agregado RCD com o de um agregado natural, geralmente BGS (brita graduada simples), usualmente empregada em serviços de pavimentação.

2 O RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 ASPECTOS GERAIS

O crescente processo de urbanização tem contribuído para o desenvolvimento da indústria da construção civil no Brasil e no mundo. A cadeia produtiva da construção civil consome entre 14 e 50% dos recursos naturais extraídos do planeta. No Japão corresponde à cerca de 50% dos materiais que circulam na economia, nos EUA o consumo de mais de dois bilhões de toneladas representa cerca de 75% dos materiais circulantes (JOHN, 2000). Estes números são decorrentes da importância desta cadeia produtiva na economia. No Brasil em 2002, o setor foi responsável por 8% do Produto Interno Bruto (CBIC, 2003 apud SCHNEIDER, 2004). Estima-se que os RCD representem de 41 a 70% do total dos resíduos sólidos gerados em áreas urbanas (PINTO, 1999).

A produção de grandes volumes de materiais de construção, atividade de canteiro de obras, construção, manutenção e demolição, são responsáveis por cerca de 20 a 30% dos resíduos gerados pelos países membros da União Europeia (MURAKAMI *et al.*, 2002). Este percentual corresponde a um valor compreendido entre 221 e 334 milhões de toneladas por ano (VAZQUEZ, 2001). Nos EUA, segundo a agência ambiental americana, são gerados aproximadamente 136 milhões de toneladas de RCD por ano (EPA, 1998).

Nos anos 80, em virtude da escassez de áreas para a disposição final de RCD na Europa e Estados Unidos, a reciclagem e a minimização de resíduos passaram a ser objeto de atenção especial do setor da construção civil e diversas políticas públicas foram implementadas com este objetivo. Nos Estados Unidos há cerca de 3.500 unidades de reciclagem de RCD que respondem pela reciclagem de aproximadamente 25% do total de RCD gerado (EPA 1998). Na Europa, a média de reciclagem dos RCD é de 28%. Nos Países Baixos esta taxa é bem mais alta: em 2000, foram aproveitados 90% dos resíduos da construção, ou seja, 16,5 milhões de toneladas (PUT, 2001 apud SCHNEIDER, 2003).

A reciclagem dos RCD diminui o volume de resíduos que necessitam de disposição final e a pressão sobre recursos naturais. A maioria das ferramentas usadas nas políticas públicas de minimização dos RCD pode ser implantada em vários estágios do processo de construção, projeto, demolição e manejo dos resíduos.

O Brasil, até 2002 não tinha políticas públicas para os resíduos gerados pelo setor da construção civil. Na cidade de São Paulo, até aquele ano a legislação municipal limitava-se a proibir a deposição de RCD em vias e logradouros públicos, atribuindo ao gerador a responsabilidade pela sua remoção e destinação.

No início do século XXI milhares de toneladas de RCD são depositados diária e sistematicamente em centenas de vias e logradouros públicos do município (SCHNEIDER *et al.*, 1999) e “comprometem a paisagem urbana, o tráfego de pedestres e de veículos e a drenagem urbana, além da atração de resíduos não inertes, multiplicação de vetores de doenças e outros efeitos”, conforme observado em diversas cidades brasileiras (PINTO, 1999).

Baseado nos dados expostos acima, conclui-se que com o acréscimo no poder aquisitivo da população maior será a aquisição de bens imóveis, por exemplo, e por consequência, haverá um aumento na execução de moradias e na geração de resíduos de construção civil. Portanto, o maior volume gerado de resíduos concentra-se nas regiões metropolitanas, que aglomeram um maior número de habitantes, correspondente a 36% da população brasileira, segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (IBGE, 2010; SANTOS, 2007).

2.2 DEFINIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha, Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2002).

A seguir são apresentadas as classificações dos resíduos sólidos, bem como suas características.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As mais comuns são quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem. São apresentadas aqui as classificações propostas segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), E a Resolução do Conama nº 307 (BRASIL, 2002, p. 2).

2.3.1 Classificação segundo suas normas características

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), determina a classificação dos resíduos sólidos em:

a) **Classe I ou perigosos:** São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;

b) **Classe II ou não inertes:** São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos classe perigosos – ou classe III – inertes;

c) **Classe III ou inertes:** São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10007 (ABNT, 2004c), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10006 (ABNT, 2004b), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme listagem nº 8 Anexo H da NBR 10004 (ABNT, 2004a), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

2.3.2 Classificação segundo a Reciclagem

Segundo a Resolução Conama nº 307 (BRASIL, 2002), os resíduos provenientes da indústria da construção civil, deverão obedecer alguns critérios da seguinte forma:

- a) **Classe A:** composta pelos seguintes resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados:
- de construção, demolição, reformas e reparo de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto;
 - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.), produzidas nos canteiros de obras;
- b) **Classe B:** é composta por resíduos que tem a possibilidade de reciclagem como plásticos, papéis, papelões, metais, vidros, madeiras e outros;
- c) **Classe C:** é composta por resíduos ainda sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para a sua reciclagem/recuperação, tais como os oriundos do gesso (tratamento pelo gerador);
- d) **Classe D:** é composta pelos resíduos que são gerados no processo construtivo das edificações, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou ainda pelos resíduos gerados através de demolições e reformas de clínicas radiológicas e instalações industriais.

De acordo com a resolução nº 307 citada acima, os Resíduos CD estão incluídos na **Classe A**.

2.3.3 Classificação segundo a cor

Os RCD podem ainda ser classificados segundo sua cor predominante, por exemplo,

- a) **Cinza:** visualmente predominante de componentes de construção de natureza cimentícia
- b) **Vermelha:** visualmente predominante de componentes de construção de natureza cerâmica (BALBO, 2007, p. 207).

2.4 A GERAÇÃO DE RCD

Os resíduos de construção e demolição constituem a maior porção em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no mundo (RAO *et al.*, 2007). As estimativas em 1994 apontavam para uma geração de resíduos da ordem de 2 a 3 bilhões de toneladas (LAURITZEN, 1994).

Nos Estados Unidos, dados apontam para uma geração de RCD da ordem de 136 milhões de toneladas referentes ao ano de 1996, excluindo-se destes cálculos materiais provenientes de obras rodoviárias e escavações (EPA, 1998). Neste país a maior fração dos RCD gerada, em torno de 50% é oriunda do setor de demolições, seguida pelo setor de manutenção e reformas que respondem por cerca de 40% e por fim o setor de novas construções que representa a menor parcela deste total aproximadamente 10% (SANDLER, 2003).

Nos países da União Europeia de acordo com o relatório *Management of Construction and Demolition Waste* em 2000 calculava-se que eram produzidas 180 milhões de toneladas/ano de RCD (EC, 2000) A tabela 2.1 mostra a geração de RCD em alguns países membros.

Tabela 2.1 - Geração de RCD em países membros da União Europeia

PAÍS	GERAÇÃO DE RCD (MILHÕES DE TON./ANO)
Alemanha	59
Reino Unido	30
França	24
Itália	20
Espanha	13
Holanda	11
Belgica	7
Áustria	5
Portugal	3
Dinamarca	3
Grécia	2
Suécia	2
Finlândia	1
Irlanda	1

Fonte: Grubba (2009)

Analizando a Tabela 2.1, conclui-se que há uma grande variação na geração de resíduos nos países acima citados. A Alemanha é responsável por quase 1/3 do total de RCD produzido pela União Européia, já a Irlanda gera apenas um milhão de tonelada/ano. Essas diferenças são decorrentes de fatores como: técnicas construtivas, tamanho do país e população.

Já no continente Asiático cidades como Tóquio e Hong Kong, tem uma elevada produção de RCD devido ao fenômeno da verticalização ocorrido nos últimos anos. Esse fato é comum em grandes cidades nas quais faltam terrenos livres o que acarreta a demolição de antigas edificações para a construção de edifícios mais altos (POON *et al*, 2006).

No Brasil, não se tem registros oficiais sobre a quantidade de resíduos gerados pelos setores de construção e demolição. Segundo (PINTO, 2001), existe um profundo desconhecimento por parte da administração pública quanto ao volume de RCD gerado, dos impactos ambientais, custos materiais e sociais causados pelos mesmos. Estima-se uma produção aproximada de 68,5 toneladas/ano (ÂNGULO, 2005).

No Estado de São Paulo, o setor da construção civil é considerado o maior gerador de RSU. A tabela 2.2 apresenta a quantidade de RCD gerada diariamente em alguns municípios paulistas em relação ao total de resíduos sólidos urbanos. Estudando esta tabela, podemos constatar que somente o município de São Paulo produz em torno de 17 mil toneladas/dia de RCD, o que representa mais de 5,3 milhões de toneladas/ano. Ainda é possível verificar que todos os municípios citados a proporção de RCD ultrapassa os 50% do total de RSU gerado.

Tabela 2.2 – Estimativa da geração de RCD em alguns municípios paulistas

MUNICÍPIO	ANO DE REFERÊNCIA	GERAÇÃO DIÁRIA (Ton.)	RCD/RSU (%)
São Paulo	2003	17240	55
Campinas	1996	1800	64
Guarulhos	2001	1308	50
Ribeirão Preto	1995	1023	70
Santo André	1997	1013	54
São José dos Campos	1995	733	67
São Jose do Rio Preto	1997	687	58

Fonte: Sinduscon SP (2005)

2.5 IMPACTO AMBIENTAL

Define-se impacto ambiental, segundo a Resolução do Conama nº 001 (BRASIL, 1986), qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, ocasionada por qualquer forma de matéria ou energia das atividades humanas, que direta ou indiretamente, afetam:

- a) A saúde, segurança e o bem estar da população;
- b) As atividades sociais e econômicas;
- c) A biota;
- d) As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- e) A qualidade dos recursos ambientais.

Segundo Roso (2012), atualmente a questão ambiental está em pauta em todos os setores da sociedade, governo, entidades de classe e organizações não governamentais. A integração entre a engenharia e tecnologia, como agentes transformadores do meio ambiente, estão inseridos nesta discussão, contribuindo através de diversas pesquisas, entre as quais, podemos citar o aproveitamento de resíduos sólidos da construção civil (RIBEIRO, 2004).

Os danos ao meio ambiente causados pela indústria da construção civil ocorrem ao longo de toda a cadeia produtiva, vão desde a ocupação de terras, a extração de matéria-prima, o transporte, os processos construtivos, os produtos em si, a geração e a disposição final de resíduos sólidos. Do montante total de resíduos sólidos da construção civil produzidos nos grandes centros metropolitanos, uma porcentagem variando entre 65% e 80% é gerada por pequenas obras de construção e reforma (SILVA, 2004).

Ainda citando Roso (2012), a parcela que o entulho representa no total de RSU gerados diariamente nas áreas urbanas em todo o planeta torna necessário o estabelecimento de um modelo de gerenciamento sustentável para esses resíduos. (GONÇALVES *et al.*, 2000). O agravante para este caso é que, estatisticamente, somente metade do total de resíduos da construção civil é recolhida, sendo o restante disposto irregularmente.

Ribeiro (2004) descreve que a disposição de resíduos sólidos da construção civil causa sérios problemas à gestão ambiental urbana, entre eles, o esgotamento prematuro de

áreas de disposição final de resíduos, a obstrução de elementos de drenagem urbana, a degradação de mananciais, a sujeira nas vias públicas.

Quanto à coleta dos resíduos, afirma Roso (2012).

[...] Não havendo soluções qualificadas para a coleta destes resíduos, tanto os geradores destas atividades construtivas quanto os pequenos coletores procurarão, inevitavelmente, áreas livres nas proximidades para a deposição dos resíduos e consequentemente estas áreas passarão a ser atrativos de deposição de todo e qualquer tipo de entulho. As áreas, que são utilizadas para a deposição de lixo urbano de forma clandestina posteriormente são corrigidas pela administração municipal, onde os custos são bem altos impondo um ciclo vicioso já que o lixo novamente será depositado nestas áreas.

Mesmo quando o entulho é depositado adequadamente, os mesmos provocam um impacto negativo à paisagem e ainda, o desperdício de espaços físicos urbanos. Silva (2004). A Figura 2.1 mostra o aterro sanitário Bandeirantes, em São Paulo, onde a deposição de materiais com potenciais de reciclagem provocou o seu parcial esgotamento.



Figura 2.1 – Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes - SP
Fonte: Energia ambiental S.A. (2012)

Considerando o alto potencial existente em termos de reciclagem do RCD, bem como o provável esgotamento dos recursos naturais e matérias primas em um futuro próximo, fator que aliado à necessidade de redução de custos na construção, faz com que o reaproveitamento dos recursos disponíveis seja essencial à sobrevivência futura do planeta.

De acordo com Ribeiro (2004), os principais resultados obtidos com a reciclagem do RCD, são os benefícios socioambientais, com a melhoria da qualidade de vida e a utilização racional dos recursos naturais. A reciclagem introduz valor ao agregado produzido, não só por diminuir a deposição em locais inadequados, mas também por minimizar a necessidade de extração de matérias-primas em jazidas e por diminuir a necessidade de destinação de áreas públicas para a criação de novos aterros sanitários. Sabe-se que a redução do impacto ambiental da construção civil é complexa sendo necessária a combinação de varias tarefas simultâneas (SILVA, 2004).

2.6 COMPOSIÇÃO DOS RCD – BRASIL E MUNDO

Sua composição está intimamente ligada às diversas características de sua fonte geradora e do momento em que a amostra foi coletada. Consequentemente, há uma gama elevada de aspectos que interferem na quantidade, composição e características desse resíduo. Entre esses aspectos, destacam-se:

- a) O nível de desenvolvimento da indústria da construção local;
 - treinamento e qualificação da mão de obra disponível;
 - técnicas construtivas e demolição empregada;
 - programas de qualidade adotados, e de redução de perdas;
 - processos de reciclagem utilizados, e reutilização no canteiro;
- b) Os tipos de materiais predominantes e/ou disponíveis na região;
- c) A ocorrência de obras especiais na região (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros);
- d) O desenvolvimento econômico da região;
- e) A demanda por novas construções.

Essa variação em sua composição faz com que os RCD possuam características que diferem para cada país, estado, cidade, e em alguns casos específicos, até para bairros de uma mesma cidade, o que justifica seu caráter extremamente heterogêneo. Segundo Zordan (2000), é importante ressaltar que o resíduo de construção e demolição provavelmente seja o mais heterogêneo de todos os resíduos industriais, ainda que a sua composição química esteja relacionada com a composição dos materiais que o compõe.

Durante a construção de edifícios nos países desenvolvidos, altos percentuais de papel e plástico são gerados, provindos das embalagens dos materiais. Nos países em desenvolvimento, no mesmo tipo de obra, é maior a quantidade de resíduos de concreto, argamassa e blocos, entre outros, devido às elevadas perdas do processo (CASSA *et al.*, 2001).



Figura 2.2 – Reciclagem dos RCD no próprio canteiro de obras

Fonte: MCA Imprensa (2008)

Através de pesquisas, muito têm se estudado a composição dos RCD no Brasil e também em outros países, comprovando através desta sua alta variabilidade. A Tabela 2.3 apresenta os resultados encontrados por diversas pesquisas para algumas cidades brasileiras.

Em todas as cidades que participaram da pesquisa, constatou-se que os materiais cimentícios (concreto e argamassa) foram os que apresentaram maior fração na composição dos RCD, chegando a representar na cidade de São Carlos/SP, por exemplo, aproximadamente 70% do RCD gerado na região.

Tabela 2.3 – Composição, em %, do RCD de diversas cidades brasileiras

MATERIAL	ORIGEM			
	SÃO PAULO (SP) ₁	RIBEIRÃO PRETO (SP) ₂	SALVADOR (BA) ₃	FLORIANÓPOLIS (SC) ₄
Concreto e Argamassa	33	59	53	37
Solo e Areia	32	-	22	15
Cerâmica	30	23	14	12
Rochas	-	18	5	-
Outros	5	-	6	36

Fonte: 1 Brito Filho (1999), *apud* John (2000); 2 Zordan (1997); 3 Pinto (2001)

4 Xavier *et al.* (2002)

A título de exemplificação, a Figura 2.2 apresenta a constituição dos RCD da cidade de Salvador-BA. De acordo com Carneiro *et al.* (2001), os RCD dessa cidade apresentam em sua composição 94% de materiais com alto potencial de reciclagem.

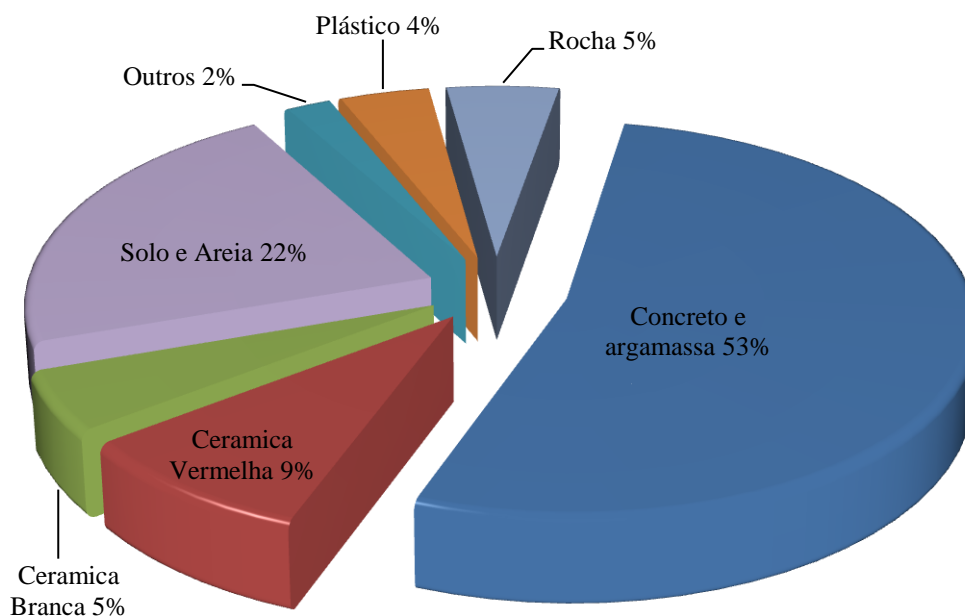


Figura 2.3 – Composição média dos RCD de Salvador-BA
Fonte: Carneiro *et al.* (2001)

Os dados analisados a respeito da composição média dos RCD em outros países comprovam que há uma variação elevada. Em Toronto, por exemplo, segundo Swana (1993) *apud* Pinto (1999), cerca de 35% dos resíduos de construção e/ou demolição gerados são de madeira, o que se justifica devido às técnicas/tradição construtivas da região. Na Bélgica, os resíduos de concreto e alvenaria juntos são responsáveis por aproximadamente 83% do total de RCD gerado, sendo a madeira responsável apenas por 2%.

No tocante à participação das diferentes origens, conclui-se que tais índices possuem uma elevada variação, sendo esta justificada através da relação direta com a intensidade de construção e de demolição da região.

Em países desenvolvidos, onde as atividades de renovação de edificações, infraestrutura e espaços urbanos são mais intensas, os resíduos provindos de demolições são muito mais frequentes. A Tabela 2.4 apresenta dados da participação das atividades de construção e de demolição na geração de resíduos para diversos países.

Tabela 2.4 – Participação (%) dos resíduos de construção e demolição

PAÍS	RCD (TON./ANO)	% DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO NO RCD	% DE RESÍDUO DE DEMOLIÇÃO NO RCD	ANO
Alemanha ₁	32,6 milhões	31	69	1994
Estados Unidos ₂	31,5 milhões	33	66	1994/1997
Brasil ₃	70 milhões	30 - 50	50 - 70	1999
Japão ₁	99 milhões	52	48	1993
União Europeia ₄	215 milhões	19	81	Previsão 2000

Fonte: 1 Lauritzen (1994); 2 Peng *et al.*, (1997); 3 Pinto (1999); 4 Pera (1996), Quebaud, Buyle-Bodin (1999); *apud* Carneiro (2005)

NOTA: Dados trabalhados pelo autor.

(*) Para esta estimativa foi considerada uma população de 150 milhões de habitantes, com uma geração anual de 0,5 ton/hab. Ano, média obtida de algumas cidades brasileiras em Pinto (1999). Ressalta-se que não se trata de uma média representativa.

2.7 RECICLAGEM DOS RCD

Segundo a resolução do Conama nº 307 (BRASIL, 2002) reciclagem consiste no processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação, enquanto reutilização é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo. Assim, elevadas quantidades de entulhos são utilizadas racionalmente (EC, 2000), convertendo-se um produto descartado em um material de alta qualidade.

Segundo Pinto (1999) a elevada geração de resíduos, determinada pelo acelerado desenvolvimento econômico nos dois últimos séculos, coloca como inevitável a adoção de políticas de valorização dos resíduos e sua reciclagem, nos países desenvolvidos e em amplas regiões dos países em desenvolvimento. De acordo com Wilburn e Goonan (1998), a reciclagem também tem o intuito de prolongar a vida útil dos recursos naturais, reduzindo consequentemente os impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade.

Visando o reaproveitamento dos resíduos, há diversas técnicas e procedimentos, mais ou menos sofisticados, mão de obra ou capital intensivos, processos importados ou desenvolvidos no país. Para sua escolha, deve-se levar em consideração o aproveitamento ambientalmente adequado, menor custo possível, respeitando-se as características socioeconômicas e culturais de cada município (ROCHA *et al.*, 2003).

Independente do método utilizado para processamento do RCD, seu produto final possui uma gama enorme de alternativas, dentre as mais importantes:

- a) - aterramento;
- b) - base e sub- base para pavimentação;
- c) - produção de pré-moldados de concreto.

Como o intuito da seguinte pesquisa é o beneficiamento do RCD para camadas de base e sub-base, manteremos o foco nesse item.

2.7.1 Reciclagem de RCD no Mundo

De acordo com a literatura, a reciclagem de RCD é um processo tão antigo quanto à construção, sendo exercido há milênios pelas civilizações antigas.

Os países europeus por necessidade falta de espaço físico e esgotamento das jazidas naturais desenvolveram uma cultura de reaproveitamento e reciclagem, somados a esses fatores a segunda guerra mundial causou a destruição de inúmeras cidades gerando um volume enorme de escombros e uma demanda gigantesca por matérias. Destinados à reconstrução das cidades devastadas por bombardeios.

Na Alemanha, em meados de 1860, há notícias sobre o uso de blocos de concreto britados como agregado, para obtenção de novos produtos. Os primeiros estudos sobre os agregados reciclados e suas características, têm início neste mesmo país no ano de 1928. Contudo, sua utilização significativa só veio a ocorrer após a Segunda Guerra Mundial. Durante o período de reconstrução da Europa, havia uma enorme demanda por materiais de construção, e em contrapartida, era necessário remover a grande quantidade de escombros das cidades destruídas por bombardeios (SCHULZ; HENDRICKS, 1992, *apud* PINTO, 1999, p.87). A Alemanha herdou da guerra um volume entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos de escombros, dos quais foram reciclados aproximadamente cerca de 11,5 milhões de metros cúbicos, que contribuíram para a produção de 175.000 unidades habitacionais até o ano de 1955 (SCHULZ; HENDRICKS, 1992, *apud* PINTO, 1999, p.87). Desde o fim dessa guerra, os europeus assumiram a liderança no desenvolvimento de técnicas de reciclagem dos resíduos de construção e demolição (WILBURN; GOONAN, 1998). Além da Europa, essas técnicas encontram-se consolidadas também no Japão e nos EUA.



Figura 2.4 – Cidade alemã após bombardeio
Fonte: Gazeta Maringaense (2012)

Segundo o relatório *Recycled Materials in European Highway Environments: Uses, Technologies, and Policies* (FHWA, 2000), uma gama de fatores influenciou no sucesso da reciclagem dos países europeus, tais como a ausência de material virgem e os custos elevados com o transporte do mesmo, a oposição pública à exploração de jazidas minerais e o descarte dos resíduos em aterros.

Grubba (2009), diz que no tocante à questão cultural, a opinião pública europeia possui uma conscientização sobre o real valor da reciclagem, que vêm se consolidando no decorrer das últimas décadas. Além disso, os governos exercem um grande esforço para informar e educar a população sobre os programas que promovem a reciclagem. Essa divulgação é primordial para se estimular a reciclagem (FHWA, 2000). Segundo Pinto (1999) em praticamente todos os países-membros da comunidade europeia existem instalações de reciclagem de RCD, normas e políticas para esse tipo de resíduo. A tabela 2.5 apresenta a porcentagem reciclada ou reutilizada de RCD em alguns países membros da União Europeia.

Tabela 2.5 – (%) Reutilizada dos RCD em alguns países da União Europeia

PAÍS	TAXA DE RECICLAGEM DE RCD (%)
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Áustria	41
Suécia	21
Alemanha	17
França	15
Itália	9
Espanha	<5
Grécia	<5
Portugal	<5
Irlanda	<5

Fonte: Symonds (2005)

Analisando-se a tabela 2.5, constata-se que as taxas de reciclagem diferem consideravelmente nos países membros da União Europeia. Os países ao sul da Europa: Itália, Espanha, Portugal e Grécia, possuem níveis mais baixos de reciclagem. Em contrapartida Holanda, Bélgica e Dinamarca, apresentam maiores valores. Segundo o relatório da Comissão Europeia *Management of Construction and Demolition Waste* (EC, 2000), há uma variação considerável no tocante aos métodos empregados pelos países para a gestão dos RCD, assim como os níveis de proteção ambiental, os quais refletem diretamente na taxa de reciclagem.

Na Holanda, o alto índice de reciclagem, maior da União Europeia, está relacionado com avanços em alguns aspectos do modelo de sustentabilidade. O governo desse país adotou uma política que minimiza o uso de materiais naturais e promove a utilização de materiais reciclados inserido em um sistema de mercado. (FHWA, 2000). Esse índice vem crescendo desde o início da década de 1990, onde a Holanda já reciclava 60% dos RCD gerados, abastecendo 10% do mercado de agregados com estes produtos (NORDBERG NEWS, sd, *apud* PINTO, 1999, p.88).

A Dinamarca é outro exemplo de sucesso na reciclagem de resíduos de construção e demolição. Segundo EC (2000), os municípios desse país são os responsáveis pelo recolhimento do RCD, sendo que mais da metade deles já possuem regulamentação específica para classificação deste tipo de material. De acordo com FHWA (2000), os dinamarqueses utilizam-se de incentivos financeiros como impostos, taxas e subsídios para gestão de

resíduos. O intuito, é que esses recursos promovam o uso de tecnologias mais limpas e a reciclagem dos resíduos.

Na Itália, Espanha, Portugal e Grécia, os recursos naturais atendem à demanda de materiais de construção a um custo moderado. Dessa forma, os agregados reciclados não conseguem concorrer com baixos custos dos agregados naturais, e consequentemente seu mercado não se desenvolve (EC, 2000).

No Japão, devido ao crescimento na geração de RCD na década de 1980, (passou de 30,4 para 83,6 milhões de toneladas anuais). No que diz respeito à reciclagem de RCD, avanços significativos foram alcançados. Em 1991, Tóquio já dispunha de 12 instalações de reciclagem, sendo operadas por equipamentos de origem alemã, exclusivamente para a reciclagem de concreto (HONG KONG, 1993, *apud* PINTO, 1999, p. 88).

Nos EUA em 1996, verificou-se a existência de 1.800 instalações de reciclagem em operação no país, 1.000 processando asfalto, 500 processando madeira e 300 operando com resíduos misturados (YOST, 1998, *apud* PINTO, 1999, p.89). Neste país, segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA), em 1996, foram geradas aproximadamente 136 milhões de toneladas de RCD, das quais novas construções foram responsáveis por apenas 8% desse total (48% demolição e 44% reformas). Devido a esse aspecto, o aperfeiçoamento de técnicas de desconstrução é muito importante nesse país, visando a garantir condições de reuso e reciclagem para uma maior quantidade de RCD.

2.7.2 Reciclagem de RCD no Brasil

Com a finalidade de se reduzir os impactos oriundos da indústria da construção civil, publicou-se a Resolução Conama nº 307 (BRASIL, 2002), que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Essa resolução faz algumas considerações a respeito dos RCD, as quais são citadas a seguir:

- a) - Seu descarte em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental;
- b) - Representam um percentual significativo dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas;
- c) - Os geradores devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos, demolições de estruturas e estradas, bem

como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos;

- d) - A viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil;
- e) - A gestão integrada de resíduos da construção civil deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

Segundo Grubba (2009), no tocante à reciclagem dos resíduos de construção e demolição, outro avanço no país é decorrente da publicação pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), de normas específicas relativas à sua gestão e seu emprego, que são citadas a seguir:

- a) - NBR 15112 (ABNT, 2004d) - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- b) - NBR 15113 (ABNT, 2004e) - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- c) - NBR 15114 (ABNT, 2004f) - Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- d) - NBR 15115 (ABNT, 2004g) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- e) - NBR 15116 (ABNT, 2004h) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Mesmo com a publicação de resoluções e normas técnicas específicas sobre o assunto, no Brasil a reciclagem de resíduos de construção e demolição ainda se mostra aquém do ideal. (GRUBBA, 2009). Em um país com mais de 5560 municípios (IBGE, 2001), em 2004 havia apenas 14 usinas de reciclagem de RCD, espalhadas por 12 cidades (NUNES, 2004). Segundo (MOREIRA *et al.*, 2007), esse número aumentou para 16 unidades.

No Brasil, a prática da reciclagem dos resíduos de construção e demolição ainda é bastante recente se comparada a países como a Alemanha, Japão ou EUA. No entanto, nos últimos anos essa atividade vem se intensificando como forma de minimizar ou até solucionar o problema da destinação dos RCD.

Os primeiros estudos iniciaram-se a partir de 1983 (PINTO, 1986), ocorrendo na sequência os estudos de Silveira (1993), Zordan (1997), Levy (1997), Latterza (1998) *apud* Carneiro (2005) e Lima (1999) *apud* Carneiro (2005), além de uma série de outros estudos e pesquisas em várias instituições do País (PINTO, 1999).

A primeira unidade de reciclagem de RCD instalada no Brasil foi à da cidade de São Paulo, em 1991. Localizava-se em uma área de 20.000 m² em Itatinga, na zona sul do município, com capacidade inicial de 100 toneladas/hora. Em 2001, essa central foi transferida para a área de aterro de inertes de Itaquera (NUNES, 2004). Na sequência surgiram as centrais de Londrina no Paraná e as de Belo Horizonte em Minas Gerais (ZORDAN, 1997 *apud* SANTOS, 2007). Em 2007 mais uma usina de reciclagem para beneficiamento de RCD foi inaugurada, com capacidade de até 300m³/dia. A mesma se encontra na cidade de João Pessoa no Estado da Paraíba, localizada no bairro de Mangabeira.

Outros muitos municípios brasileiros prosseguiram com a instalação de unidades de reciclagem. Segundo (PINTO, 1999), essas novas unidades foram resultantes dos planos de gestão dos RCD, e em outros casos, uma ação descoordenada sem um devido planejamento, como mera aquisição de equipamentos, o que inevitavelmente compromete os resultados a serem alcançados.

Ainda de acordo com Pinto (1999), o sucesso alcançado por algumas instalações brasileiras, devido ao volume de material que vem sendo processado e pelo impacto ambiental eliminado, é o fato de terem sido criadas através de processos com quantificações precisas, planejamento bem executado e reconhecimento de fluxos, ou seja, um diagnóstico bem elaborado.

Uma referência na gestão de resíduos de construção e demolição, mesmo não tendo sido a pioneira, é a cidade de Belo Horizonte. Três unidades de reciclagem de entulho são acessíveis à população, disponibilizadas pela Prefeitura Municipal. A primeira a iniciar suas atividades em novembro de 1995 foi a do Estoril, seguida pela da Pampulha em 1996, e pela Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) em 2006. De acordo com Catapreta

et al., (2008), juntas essas unidades têm capacidade nominal para se processar aproximadamente 1.000 toneladas resíduos/dia.

Um aspecto comum a quase todas as instalações de reciclagem em operação no Brasil, é o fato das mesmas serem operadas/controladas pelo poder público ou autarquias locais, sendo que a maior parte dos agregados produzidos nessas unidades são empregados em obras de pavimentação, tendo como cliente principal as administrações públicas locais.

Recentemente, a oportunidade de negócios na operação de centrais de reciclagem de RCD está em ascensão, sejam elas impulsionadas pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), ou pelas normatizações específicas (ABNT, 2004), estão despertando a atenção do setor privado. As dificuldades existentes referentes ao sucesso do processamento do RCD são diversas, no setor privado, porém com a normalização do uso de agregados reciclados de RCD em concretos, mesmo que não apresentem função estrutural, representam um estímulo no desenvolvimento de mercados alternativos para esses produtos.



Figuras 2.5 / 2.6 – Usinas de RCD do Estoril e CTRS em Belo Horizonte - MG
Fonte: PMBH (2012)



Figura: 2.7 /2.8 – Usina de reciclagem de RCD em Caçapava – SP e Usina de reciclagem Julio de Mesquita da empresa Fremix em São Paulo-SP
Fonte: Sugestões para Caçapava (2012). / FREMIX (2012)

2.8 APLICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

Os agregados reciclados de RCD podem ser empregados nas mais variadas aplicações, tais como: serviço de drenagem, construção de aterros, camadas de base e sub-base de pavimentos, confecção de argamassa e concreto, fabricação de pré-moldados sem função estrutural, entre outros.



Figuras 2.9 / 2.10 / 2.11 – Blocos pré-moldados de concreto Caçapava – SP;
Tubulação de águas pluviais Caçapava - SP; Camadas de base e reforço
para passeios guias e sarjetas Av. Brig Faria Lima - São Paulo – SP.
Fonte: 2.9 / 2.10 Sugestões para Caçapava (2012). / 2.11 PRÓPRIA (2012)

2.9 EMPREGO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD EM PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL

O agregado reciclado proveniente de RCD em camadas de base e sub-base de pavimentos apresenta diversas vantagens às administrações municipais. Segundo Grubba (2009), o grande atrativo para o emprego de agregados reciclados em camadas de pavimento é o fator econômico, uma vez que tais matérias são vendidos, à empreiteiras a preços inferiores aos de agregados convencionalmente utilizados em pavimentação. De acordo com Carneiro *et al.* (2001), o RCD reciclado é a maneira mais simples de aproveitamento pela não exigência de processos de reciclagem sofisticados.

2.9.1 Utilização de agregados de RCD em São Paulo – SP

No município de São Paulo os RCD já eram utilizados no revestimento primário de subleito de vias urbanas, isso mesmo antes da instalação das usinas de reciclagem, visando minimizar a ocorrência de lama nos períodos chuvosos ou poeira nos períodos de estiagem (GRUBBA, 2009). É de fundamental importância destacar que apesar dessas ruas não terem recebido uma pavimentação definitiva, tais locais passaram a requerer uma manutenção menos constante se comparado a outros locais. Porém a primeira obra com acompanhamento técnico ocorreu em 1984, na Rua Gervásio da Costa – Jardim São Jorge, na zona oeste da cidade. Nesta via o RCD foi empregado no reforço do subleito. Esse pavimento foi executado pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) e monitorado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), apresentando um excelente desempenho (BODI *et al.*, 1995 *apud* GRUBBA, 2009).

A PMSP incentiva a utilização de agregados reciclados de RCD na construção de camadas de pavimentos de diversas formas. Publicando em 2003 a especificação de serviço **PMSP/SP ETS – 001/2003** (PMSP, 2003) que define os critérios para a execução de camadas de reforço de subleito, sub-base ou base de pavimentos com agregados de RCD. Posteriormente em 2005, a **Lei Municipal nº 14.015** de 28/06/2005 (PMSP, 2005) que regulamentou e obrigou a destinação final dos resíduos de misturas asfálticas extraídas do pavimento urbano na cidade de São Paulo. Já em 2006 por meio do **Decreto Municipal nº 48.075** de 28/12/2006 (PMSP, 2006), dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município. As contratações de obras e serviços de

pavimentação de vias públicas passaram a contemplar de modo preferencial o uso de agregados reciclados. Seguindo esse enfoque a Prefeitura de São Paulo concebeu a norma **PMSP/SP ETS – 002/2009** (PMSP, 2009) que trata do assunto da base de fresado com espuma de asfalto.

No que diz respeito ao aspecto econômico os custos unitários de construção de camadas compostas com agregados reciclados de RCD em bases e sub-bases são menores do que os empregando brita graduada, macadame hidráulico ou bica corrida. A tabela 2.6 apresenta os custos de alguns destes materiais.

Tabela 2.6 – Comparativo de preços por m³ de agregado de RCD

PREÇOS PRATICADOS PELA PMSP EM (2011) (incluindo agregados, equipamentos e mão-de-obra), em R\$/m³:	
MATERIAL	PREÇO
Base de macadame hidráulico	153,49
Base de BGTC	131,83
Base de pedra bica corrida	104,61
Base de BGS	96,04
Base de agregado reciclado de RCD	70,68
Revest. primário de agregado reciclado misturado a solo local	51,94
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 60% em volume	44,91
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 50% em volume	39,36
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 40% em volume	33,81
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 30% em volume	28,26
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 20% em volume	22,71
Reforço do sub-leito ou sub-base de solo com agregado reciclado 10% em volume	17,16

Fonte: Motta (junho 2012)

Analisando a tabela 2.6 é possível notar que o custo de execução de uma base com agregado reciclado é 26% menor que o de uma base com brita graduada simples (BGS), essa tendência segue com o mesmo percentual para as camadas de reforço quando se emprega o material reciclado ao invés da pedra britada.

Outra iniciativa da PMSP realizada por intermédio da empresa Fremix, que faz parte do Programa de Conservação de Vias com uso de material reciclado de RCD, desenvolve a pavimentação ecológica, proveniente da demolição de edifícios na região central da cidade. A Avenida Sapopemba e recebe pavimentação ecológica desde novembro de 2011. No trecho experimental entre a Avenida dos Sertanistas e a Rua Bento Guelfi foram pavimentados cinco quilômetros da via com material reciclado retirado dos antigos edifícios São Vito, Mercúrio e Moinho, demolidos entre 2010 e 2011 (PMSP, 2012).



Figuras: 2.12 – Usina de reciclagem móvel de RCD, Av. Sapopemba – SP
 2.13 – Pavimentação ecológica, Av. Sapopemba - SP
 2.14 – Camadas de base em material reciclado, Av. Sapopemba – SP
 2.15 – Compactação do RAP espumado, Av. Sapopemba - SP

Fonte: Bomfim (2012)

A técnica de pavimentação consiste em reutilizar resíduos de demolição após a separação manual dos materiais inaproveitáveis o resíduo restante é britado e tratado granulometricamente, essa composição apresenta um índice granulométrico semelhante ao da BGS, para compor a sub-base que é aplicada na via de forma convencional espalhada no trecho a ser pavimentado com auxílio de motoniveladoras após sua compactação, o material recebe uma pintura asfáltica.

Já a camada de base é uma mistura composta por resíduo asfáltico de petróleo espumado (RAP), que apresenta a seguinte composição: 70% de RAP material retirado por fresagem da própria via, 29% do material é composto por RCD e 1% da mistura composta por cimento portland a essa mistura é adicionado 2,5% de cimento asfáltico de petróleo 50-70 (CAP) espumado em câmaras de compressão. Sua aplicação na via é feita com a utilização de

uma vibroacabadora convencional após a compactação com rolos compressores, a via está pronta para receber a camada de revestimento, como mostram as figuras 2.16 e 2.17.



Espalhamento do RCD com motoniveladora



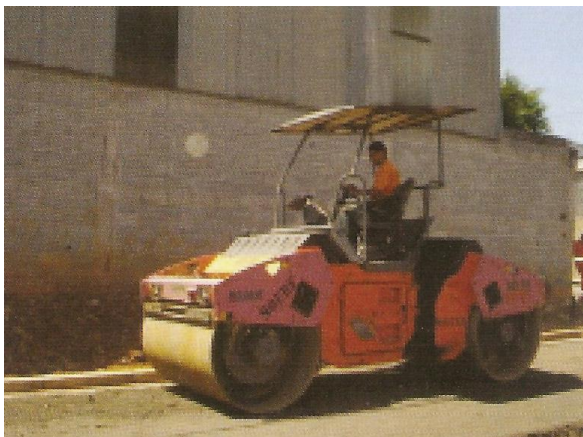
Compactação do subleito de RCD



Pintura sobre camada do subleito



Aplicação do RAP com vibroacabadora



Compactação da base de RAP espumado



Base pronta para receber o revestimento

Figura 2.16– Etapas de execução de obras de pavimentação viária com utilização de RAP e RCD, na R. Maria do Carmo Marialva Aranha em Pirituba – SP
Fonte: FREMIX (2012)

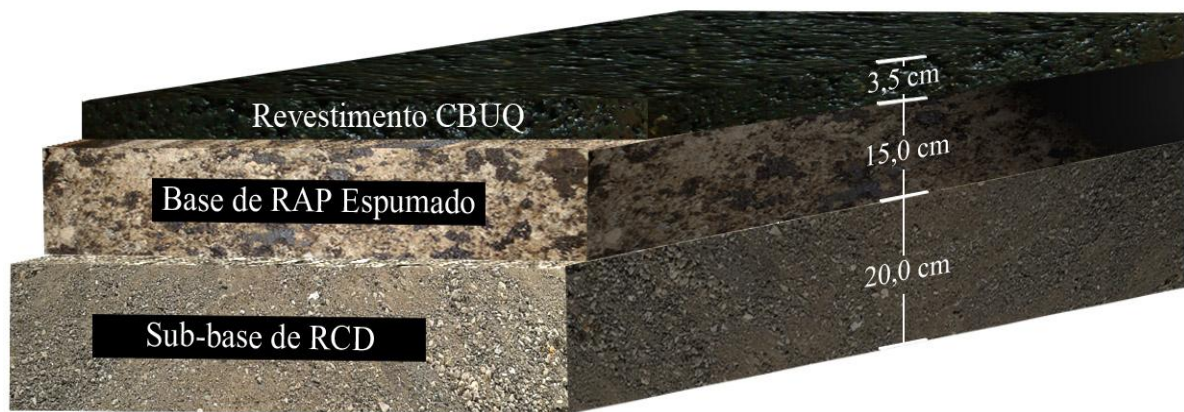


Figura 2.17 – Seção transversal de pavimento para vias de tráfego leve
Fonte: RFEMIX (2012)

Outra obra de reparo em pavimentos com a utilização de resíduos realizado pela Fremix, em parceria com a concessionária Ecopistas Grupo responsável pela administração das rodovias Ayrton Senna e Carvalho Pinto, e a recuperação do pavimento da rodovia Ayrton Senna.

Segundo Valmir Bonfim (2012), diretor técnico do grupo ANE o tráfego no trecho reparado é de moderado a pesado chegando a solicitação de $N \leq 2 \times 10^7$ de repetições de eixo-padrão de 80 KN, para tanto são necessárias mudanças na estrutura do pavimento. Os serviços são realizados no período noturno entre às 22h e às 5h como mostram as 2.18 e 2.19.

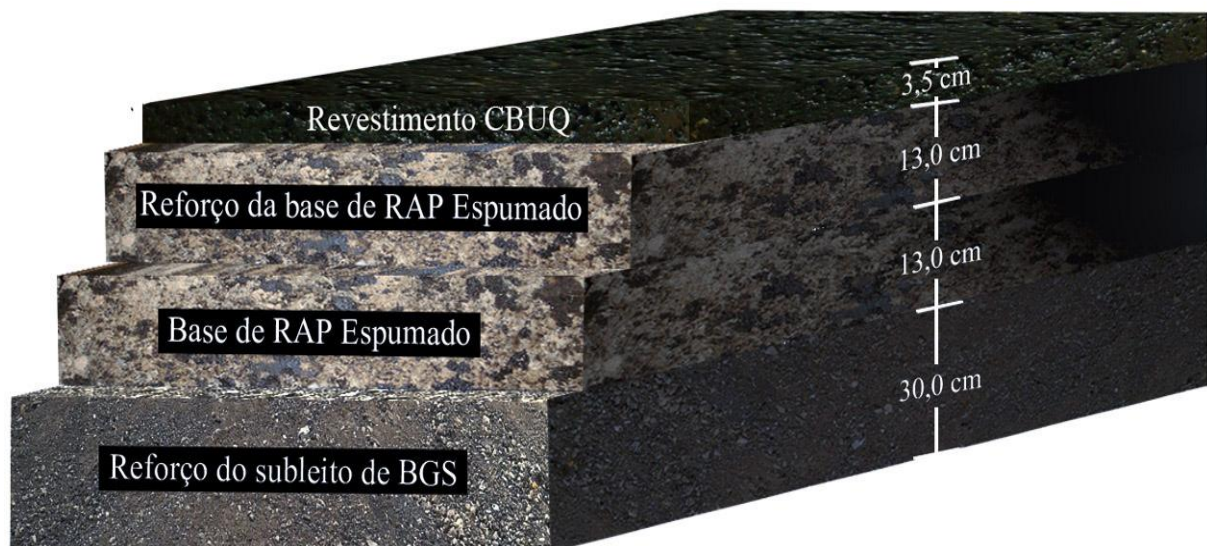


Figura 2.18 – Seção transversal de pavimento para vias de tráfego pesado
Fonte: FREMIX (2012)



Início do serviço de fresagem



Remoção das camadas de pavimento



Fresadora em operação automática



Remoção de 30 cm de pavimento por vez



Limpeza material removido



Avaliação estrutural do subleito por deflecção



Aplicação do RAP com vibroacabadora



Coesão do material antes da compactação



Compactação do RAP com pé de carneiro



Compactação com rolo liso vibratório



Trecho reparado aguardando revestimento



Rodovia pavimentada liberada ao trafego



Usina móvel de reciclagem do RAP



Pilha de RAP reciclado pronto para uso

Figura 2.19 – Etapas de execução de obras de pavimentação viária com utilização de RAP, na Rodovia Ayrton Senna – Guarulhos, SP

Fonte: PRÓPRIA (2012)

O programa de reabilitação de estradas para a malha rodoviária de 17.000 km de extensão cria um resíduo adicional de 20.000 m³ de material asfáltico a cada mês, que até então era descartado em aterros sanitários (WIRTGEN GROUP, 2012).

2.9.2 Utilização de agregados de RCD em Belo Horizonte – MG

A Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) emprega os RCD em camadas de bases e sub-bases de pavimento desde 1996. Segundo Dias (2004) *apud* Grubba (2009), entre 1996 até 2001, foram utilizadas cerca de 137.000 toneladas de RCD na implantação ou recuperação de 271 vias, públicas totalizando aproximadamente 400 Km de ruas.

Um dado interessante sobre o emprego de agregados reciclados de RCD em pavimentação observado por engenheiros do município, segundo afirma Pinto (1999), após a reabertura de uma base, meses após sua execução, foi a coesão apresentada por esta camada. O fato permitiu observar que, diferente das bases compostas por agregados naturais, que apresentam um travamento mecânico entre as partículas e uma desagregação quando o material é desconfinado, as bases com RCD reciclado apresentam-se de forma consolidadas, demonstrando a ocorrência de componentes reativos no RCD que agiram com a exposição à umidade natural dos solos locais (GRUBBA, 2009).

A camada de base e regularização do estádio do Mineirão foi realizada com RCD conforme demonstra a figura 2.20



Figura 2.20 – Obra no Mineirão com utilização de RCD. Belo Horizonte - MG
Fonte: FIFA (2012)

2.9.3 Utilização de agregados de RCD em Goiânia – GO

No final de 2003, foi construída em Goiânia, uma pista experimental empregando uma mistura de agregados reciclados de RCD. Foi formada uma parceria entre a Prefeitura Municipal de Goiânia, Universidade Estadual de Goiás (UEG) e o Departamento de Apoio Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. (OLIVEIRA, 2007).

O estudo seguiu com a execução de uma via, o trecho experimental corresponde à pista de acesso para o Centro de Abastecimento S. A. (CEASA), localizado na Rua dos Ciprestes, bairro Mansões Bernardo Sayão em Goiânia (OLIVEIRA, 2007).

O processo foi efetuado britando-se o RCD em diversas Graduações misturando o mesmo a argila para solucionar os possíveis problemas de falta de coesão e controle de umidade. Os ensaios laboratoriais provaram que o material nestas condições apresentaram boa trabalhabilidade e parâmetros compatíveis para serem utilizados como camadas de base, sub-base e reforço de pavimentos, o agregado processado também foi utilizado na composição do concreto asfáltico de petróleo no caso Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ); para finalizar o processo também foi feito um estudo de dosagem de concreto com agregados reciclados de RCD utilizando-o para a execução dos meios fios guias e sarjetas (LIMA, 2009).

Oliveira (2007) ainda relata que após decorridos mais de dois anos de ação do tráfego, a pista experimental não apresenta defeitos superficiais aparentes nem deformações que comprometam sua estrutura e funcionalidade. Desta forma conclui-se que os resultados apresentados viabilizam o agregado reciclado de RCD para o emprego em camadas de base e sub-base de estrutura de pavimentos (GRUBBA, 2009).

As figuras 2.21 a 2.24 ilustram base de pavimento, guias e sarjetas construídas com RCD.



Figuras: 2.21 – Base com agregado reciclado, R dos Ciprestes, Goiânia - GO
2.22 – Meio fio com agregado composto de RCD, Goiânia - GO
Fonte: SILVA (2004)



Figuras: 2.23 / 2.24 – Pista, meio fio guias e sarjeta experimental com agregado reciclado de RCD, R dos Ciprestes, Goiânia - GO
Fonte: Lima (2009)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as origens do agregado reciclado de construção e demolição (RCD), e do resíduo asfáltico de petróleo reciclado (RAP), bem como os procedimentos de caracterização física utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa e a metodologia observada na preparação dos corpos de prova a serem ensaiados para determinação do comportamento mecânico. São também descritos os equipamentos e as técnicas que serão empregadas para a execução dos ensaios.

O material fornecido para os ensaios foi cedido pela usina recicladora Júlio de Mesquita, de propriedade da empresa Fremix, assim como o acompanhamento da restauração das camadas danificadas de base e revestimento do pavimento da rodovia Ayrton Senna entre os quilômetros 13 e 14, a convite do diretor técnico engenheiro Valmir Bonfim.

3.1 TRIAGEM DO RCD/RAP

O resíduo de construção e demolição (RCD) trata-se de um material heterogêneo. Após sua chegada na usina de reciclagem o mesmo é submetido a uma separação manual e/ou mecânica onde são descartados os materiais indesejáveis como: gesso, madeira, ferro, plástico, fibras e isopor, que sofrem uma destinação de reciclagem para outras finalidades.

O material restante sofre um processo de britagem para obtenção do mesmo em frações menores, sendo então submetido a uma série de ensaios visando sua adequação ao uso em pavimentação.

O resíduo asfáltico de petróleo (RAP) tem origem no material obtido através da fresagem de camadas de pavimentos flexíveis, que após sua chegada ao local de reciclagem, normalmente instalado próximo ao local da obra, este material sofre uma britagem em britadores moveis visando sua adequação às normas estabelecidas.

O Agregado de RAP é um material com comportamento impar, os testes e ensaios realizados com o mesmo o tratam por vezes como uma camada granular, e por outras como uma camada asfáltica. A seguir serão descritos alguns ensaios realizados nestes dois materiais, com diferentes porcentagens e diversas composições.

3.2 ENSAIOS

3.2.1 Composição granulométrica simples

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do material, ou em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

O ensaio de granulometria é dividido em duas partes distintas, utilizáveis de acordo com o tipo de material e as finalidades do ensaio para cada caso particular. São elas: análise granulométrica por peneiramento e análise granulométrica por sedimentação. Os solos grossos (areias e pedregulhos), possuindo pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada utilizando-se somente o peneiramento. Em solos possuindo quantidades de finos significativas, deve-se proceder ao ensaio de granulometria conjunta, que engloba as fases de peneiramento e sedimentação.

Através dos resultados obtidos desse ensaio, é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, que possui fundamental importância na caracterização geotécnica do solo, principalmente no caso dos solos grossos.

Objetivo

O objetivo primordial do ensaio de granulometria é obter a curva granulométrica de um material. Através da curva granulométrica podem-se estimar as percentagens (em relação ao peso seco total), correspondentes a cada fração granulométrica do material.

Material

Os principais equipamentos e utensílios utilizados são:

- a) - Balança
- b) - Almofariz e mão de grau
- c) - Cápsulas para determinação de umidade
- d) - Estufa
- e) - Jogo de peneiras (50 / 38 / 25 / 19 / 9,5 / 4,8 / 2,38 / 2 / 1,2 / 0,6 / 0,42 / 0,29 / 0,15 / 0,075mm)

f) - Agitador de peneiras e dispersor elétrico

g) - Proveta graduada de 1000 ml

Preparação da Amostra

Após o recebimento da amostra de solo, efetua-se o seguinte procedimento:

1) - Seca-se uma determinada quantidade de material ao ar (uma quantidade maior do que aquela que será utilizada no ensaio), desmancham-se os torrões e, em seguida, homogeneizasse o material cuidadosamente.

2) - Para que o material ensaiado seja representativo, a quantidade de material a ser utilizada no ensaio deve ser obtida por quarteamento (realizado manualmente ou com o uso do quarteador), obtendo-se assim uma amostra de material com o peso necessário para se efetuar os ensaios (a quantidade de material necessária para a realização do ensaio de granulometria é em função do tipo de material: materiais grossos requerem uma maior quantidade de solo e vice-versa).

3) - Pesa-se a amostra de solo seco ao ar e peneira-se o material na #10 (2,00mm). Deve-se tomar o cuidado de desmanchar os possíveis torrões que ainda possam existir no material, de modo a assegurar que fiquem retidos na #10 apenas os grãos maiores que a abertura da malha.

4) - O material retido na #10 (2,00mm) é utilizado no peneiramento grosso. Do material que passa na #10 retiram-se quantidades suficientes de material para a realização do peneiramento fino, e para a determinação do peso específico dos sólidos e para a determinação do teor de umidade do solo:

Método

O procedimento experimental para o ensaio de granulometria divide-se em duas partes que são:

O peneiramento grosso é realizado utilizando-se a quantidade de material que fica retida na #10 (2,00mm), no momento da preparação da amostra, seguindo-se o seguinte procedimento experimental:

1º) Lava-se o material na #10 colocando-o em seguida na estufa.

2º) As peneiras de aberturas maiores e igual a #10 são colocadas uma sobre a outra com as aberturas das malhas crescendo de baixo para cima. Embaixo da peneira de menor abertura (#10) será colocado o prato que recolherá os grãos que por ela passarão. Em cima da peneira de maior abertura será colocada a tampa para que se evite a perda de partículas no início do processo de vibração. O conjunto de peneiras assim montado poderá ser agitado manualmente ou conduzido a um peneirador capaz de produzir um movimento horizontal e um vertical às peneiras, simultaneamente.

3º) Pesa-se a fração de solo retida em cada peneira, até chegar à #10 (2,00mm).

O peneiramento fino é realizado utilizando-se cerca de 120g de material que consegue passar na #10 (2,00mm), no momento da preparação da amostra, seguindo-se o seguinte procedimento experimental:

1º) Põe-se o material na #200 (0,075mm), lavando-o e em seguida colocando-o na estufa.

2º) Junta-se e empilham-se as peneiras de aberturas compreendidas entre as peneiras #10 (2,00mm) e #200 (0,075mm), coloca-se o material seco no conjunto de peneiras e agita-se o conjunto mecânica ou manualmente (tomando-se todos os cuidados descritos para o caso do peneiramento grosso).

3º) Pesa-se a fração de material retida em cada peneira.

Resultados

A partir dos valores calculados traça-se a curva de distribuição granulométrica, marcando-se no eixo das abscissas, em escala logarítmica, os “diâmetros” das partículas e no eixo das ordenadas, em escala natural, os percentuais das partículas menores do que os diâmetros considerados, isto é, os percentuais de material passante nas peneiras.

Norma

NBR-NM 248 (ABNT, 2003).

Neste ensaio foram utilizados os materiais: RAP/RCD/CAL, RAP/BGS/CP, RCD, RCD/CIM.

Os resultados dos ensaios de granulometria estão demonstrados nas tabelas 3.1 a 3.4 e figuras 3.1 a 3.4.

Tabela 3.1a / b – Análise granulométrica RAP/RCD/CAL HIDRATADA

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SIMPLES)					
Tipo de Material: RAP / RCD / CAL					
OBS:	AMOSTRA TOTAL SECA		UMIDADE HIGROSCÓPICA		RESUMO
Amostra	Am. Total Úmid.	5.000,00	Cápsula	1	Pedregulho: Acima 4,8 mm 47,9
	Retido nº 8	3.290,00	C + S + A	200,00	Areia Grossa: 4,8 - 2,0 mm 18,6
Menor	Pas. nº 4	1.709,50	C + S	194,20	Areia Média: 2,0 - 0,42 mm 9,8
	Peso da Água	49,60	A - Água	5,80	Areia Fina: nº 40 - 200 18,6
Retida nº 8	Pas. nº 4 Seca	1.659,90	C - Cápsula	0,00	Passante nº 200 5,1
	Am. Total Seca	4.950,40	S - Solo	194,20	Total 100,0
	Am. Me nº 4 Úmid.	500,00	Úmidade	2,99	Retido: nº 10 - 200 28,4
	Am. Me nº 4 Seca	486,50	F. de Correção	0,971	

PENEIRA		MATERIAL RETIDO			MATERIAL PASSANTE		
pol.	mm	peso - g	% amostra total	% acumulada	% mínima	% passante	% máxima
2	25,4	0,00	0,00	0,0	100	100	100
3/4	19,1	595,10	12,02	12,0	70	88,0	95
3/8	9,5	725,10	14,65	26,7	58	73,3	80
nº 4	4,75	1050,30	21,22	47,9	45	52,1	67
nº 8	2,4	920,00	18,58	66,5	35	33,5	55
nº 30	0,6	142,20	9,82	76,3	20	23,7	40
nº 100	0,15	216,20	14,93	91,2	8	8,8	25
nº 200	0,074	53,00	3,66	94,9	5	5,1	20
fundo							

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

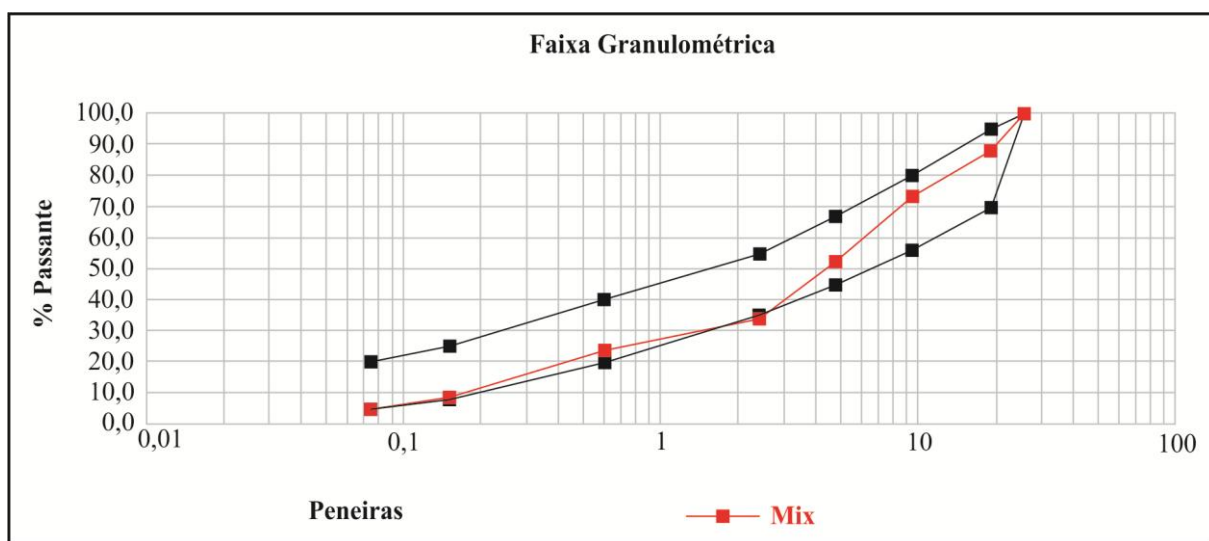


Figura 3.1 – Faixa granulométrica RAP / RCD / CAL
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.2a / b – Análise granulométrica RAP/BGS/CIMENTO PORTLAND

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SIMPLES)						
Tipo de Material: RAP / BGS / CIM						
OBS:	AMOSTRA TOTAL SECA		UMIDADE HIGROSCÓPICA		RESUMO	
Amostra	Am. Total Úmid.	2.000,00	Cápsula	3	Pedregulho: Acima 4,8 mm	52,8
	Retido nº 8	1.237,70	C + S + A	140,20	Areia Grossa: 4,8 - 2,0 mm	9,4
Menor	Pas. nº 4	762,30	C + S	138,60	Areia Média: 2,0 - 0,42 mm	17,7
	Peso da Água	11,50	A - Água	1,60	Areia Fina: nº 40 - 200	13,8
Retida	Pas. nº 4 Seca	750,80	C - Cápsula	34,40	Passante nº 200	6,2
	Am. Total Seca	1.988,50	S - Solo	104,20	Total	100,0
nº 8	Am. Me nº 4 Úmid.	200,00	Úmidade	1,549	Retido: nº 10 - 200	31,5
	Am. Me nº 4 Seca	197,00	F. de Correção	0,985		

PENEIRA		MATERIAL RETIDO			MATERIAL PASSANTE		
pol.	mm	peso - g	% amostra total	% acumulada	% mínima	% passante	% máxima
2	25,4	0,00	0,00	0,0	100	100	100
3/4	19,1	581,10	29,22	29,2	70	70,8	95
3/8	9,5	297,20	14,95	44,2	58	55,8	80
nº 4	4,75	172,60	8,68	52,8	45	47,2	67
nº 8	2,4	186,80	9,39	62,2	35	37,8	55
nº 30	0,6	92,60	17,75	80,0	20	20,0	40
nº 100	0,15	56,90	10,91	90,9	8	9,1	25
nº 200	0,074	15,00	2,88	93,8	5	6,2	20
fundo							

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

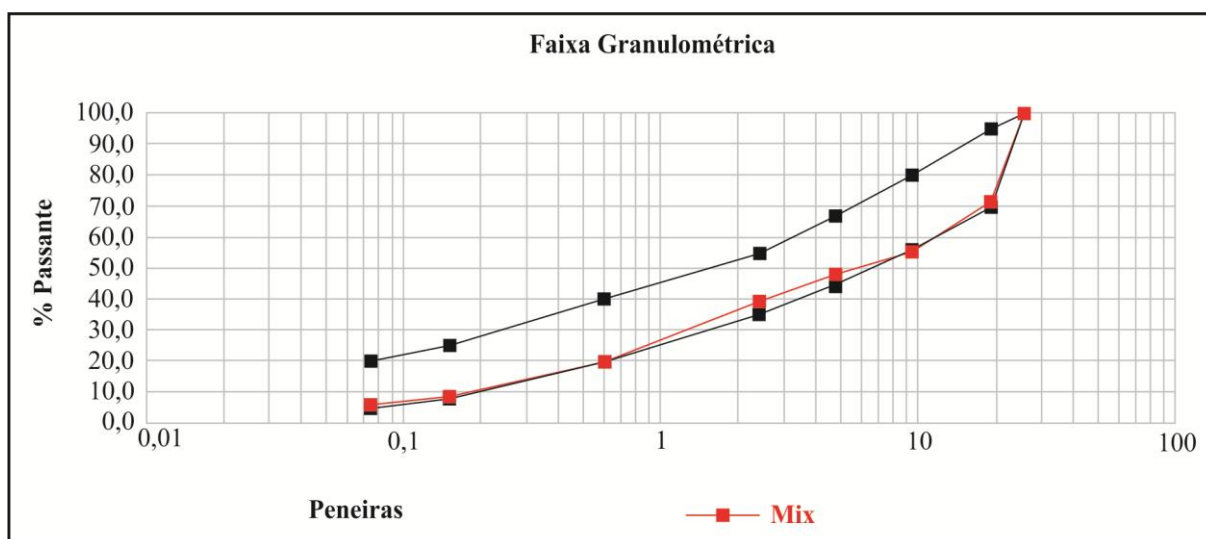
Figura 3.2 – Faixa granulométrica RAP / BGS / CIM
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.3a / b – Análise granulométrica RCD

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SIMPLES)					
Tipo de Material: RCD					
OBS:	AMOSTRA TOTAL SECA		UMIDADE HIGROSCÓPICA		RESUMO
Amostra	Am. Total Úmid.	5.000,00	Cápsula	3	Pedregulho: Acima 4,8 mm 46,7
	Retido nº 8	2.582,50	C + S + A	144,50	Areia Grossa: 4,8 - 2,0 mm 5,8
Menor	Pas. nº 4	2.417,50	C + S	140,90	Areia Média: 2,0 - 0,42 mm 15,8
	Peso da Água	79,00	A - Água	3,60	Areia Fina: nº 40 - 200 22,0
Retida	Pas. nº 4 Seca	2.338,50	C - Cápsula	34,40	Passante nº 200 9,7
	Am. Total Seca	4.921,00	S - Solo	106,50	Total 100,0
nº 8	Am. Me nº 4 Úmid.	500,00	Úmidade	3,38	Retido: nº 10 - 200 37,8
	Am. Me nº 4 Seca	483,70	F. de Correção	0,967	

PENEIRA		MATERIAL RETIDO			MATERIAL PASSANTE		
pol.	mm	peso - g	% amostra total	% acumulada	% mínima	% passante	% máxima
2	25,4	0,00	0,00	0,0	100	100	100
3/4	19,1	949,90	19,30	19,3	70	80,7	95
3/8	9,5	1137,10	23,10	42,4	58	57,6	80
nº 4	4,75	210,90	4,29	46,7	45	53,3	67
nº 8	2,4	284,60	5,78	52,5	35	47,5	55
nº 30	0,6	161,10	15,83	68,3	20	31,7	40
nº 100	0,15	186,30	18,30	86,6	8	13,4	25
nº 200	0,074	37,40	3,67	90,3	5	9,7	20
fundo							

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

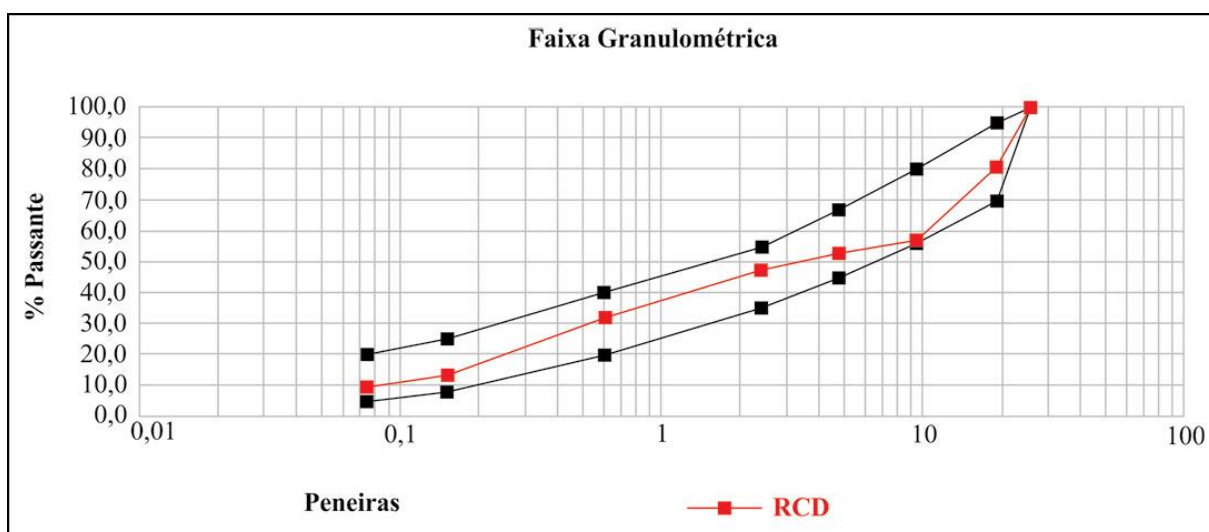


Figura 3.3 – Faixa granulométrica RCD

Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.4a / b – Análise granulométrica RCD/CIMENTO PORTLAND

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (SIMPLES)						
Tipo de Material: RCD + CIM						
OBS:	AMOSTRA TOTAL SECA		UMIDADE HIGROSCÓPICA		RESUMO	
Amostra	Am. Total Úmid.	5.000,00	Cápsula	1	Pedregulho: Acima 4,8 mm	51,7
	Retido nº 8	3.220,00	C + S + A	200,00	Areia Grossa: 4,8 - 2,0 mm	13,8
Menor	Pas. nº 4	1.780,00	C + S	190,90	Areia Média: 2,0 - 0,42 mm	15,9
	Peso da Água	81,00	A - Água	9,10	Areia Fina: nº 40 - 200	14,6
Retida	Pas. nº 4 Seca	1699,00	C - Cápsula	0,00	Passante nº 200	4,0
	Am. Total Seca	4.919,00	S - Solo	190,90	Total	100,0
nº 8	Am. Me nº 4 Úmid.	500,00	Úmidade	4,77	Retido: nº 10 - 200	30,5
	Am. Me nº 4 Seca	477,30	F. de Correção	0,955		

PENEIRA		MATERIAL RETIDO			MATERIAL PASSANTE		
pol.	mm	peso - g	% amostra total	% acumulada	% mínima	% passante	% máxima
2	25,4	0,00	0,00	0,0	100	100	100
3/4	19,1	495,80	10,80	12,1	70	87,9	95
3/8	9,5	938,50	19,80	31,2	58	68,8	80
nº 4	4,75	109,20	20,52	51,7	45	48,3	67
nº 8	2,4	676,50	13,75	65,5	35	34,5	55
nº 30	0,6	220,00	15,92	81,4	20	18,6	40
nº 100	0,15	159,60	11,55	92,9	8	7,1	25
nº 200	0,074	42,30	3,06	96,0	5	4,0	20
fundo							

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

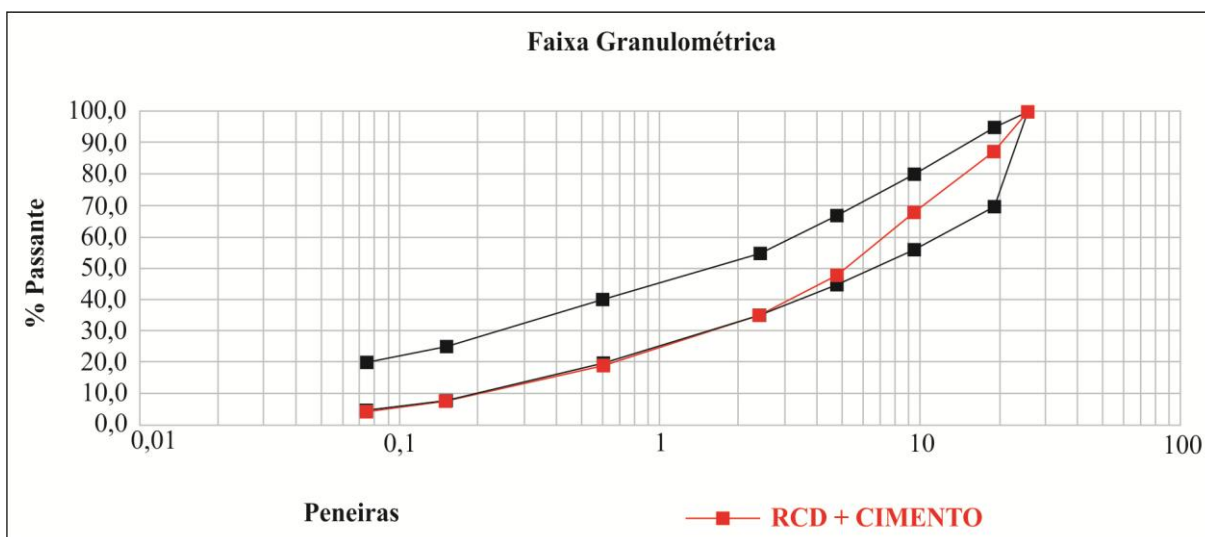


Figura 3.4 – Faixa granulométrica RCD / CIM

Fonte: FREMIX (2012)

3.2.2 Ensaio de proctor

Objetivo

A compactação de um material em laboratório tem a finalidade de determinar a curva de variação da densidade do material em função da umidade, para uma dada energia de compactação.

Material

Cilindro e soquete de compactação; balança; bandejas metálicas; extrator de amostras; cápsulas de alumínio; peneiras de aberturas 4,76 mm; balança com capacidade de 1 kg e estufa.

Método

- a) - Secar a amostra ao ar, caso seja necessário.
- b) - Colocar a amostra de material numa bandeja metálica a qual foi previamente passada na peneira de 4,76mm.
- c) - Determinar a umidade da amostra.
- d) - Pulverizar uma pequena quantidade de água e homogeneiza-la.
- e) - Colocar o material solto no cilindro até uma altura tal que, o material depois de compactado, tenha uma altura igual a $\frac{1}{3}$ da altura do cilindro. O ensaio consiste em compactar uma amostra de material dentro de um cilindro, em três camadas sucessivas, com a aplicação de golpes com um soquete com peso de 2,5 kg a uma altura de queda de 30 cm. Desta forma tem-se uma energia de compactação
- f) - Com o soquete aplicar os golpes tendo o cuidado de distribuí-los por toda a área do material dentro do cilindro.
- g) - Repetir os itens 5 e 6 mais duas vezes. Observe que o número de camadas usadas neste ensaio é igual a 3. Antes de iniciar a compactação da segunda camada deverá ser feita uma escarificação no topo da camada compactada, de forma a permitir um entrosamento maior entre o material das duas camadas.

h) - Terminada a operação de compactação, retirar cuidadosamente o colar. Cuidar para que o material não exceda de 1 cm de borda superior do cilindro e nem que o cilindro não fique totalmente preenchido.

i) - Retirar o excesso de tal maneira que o volume do material seja igual ao volume do cilindro.

j) - Determinar a massa do material + cilindro.

l) - Colocar o cilindro no extrator de amostra e retirar o solo.

m) - Determinar a umidade do material compactado, retirando do interior do corpo de prova, uma amostra que será composta por uma parte de cada terço do material.

n) – Após a retirada da amostra para determinação da umidade, colocar o restante do corpo de prova junto com o restante do material da bandeja e destorroá-lo.

o) - Determinar a densidade para esta condição de umidade.

p) - Pulverizar uma certa quantidade de água e homogeneizar o material.

q) - Repetir os itens 5 a 15 até se obter pelo menos 5 pontos, sendo 2 abaixo e dois acima e 1 próximo à umidade ótima de compactação.

Resultados

Obtidos os pares de valores de umidade (eixo X) e densidade do material (eixo Y), Plotam-se os resultados em um gráfico (umidade gravimétrica x densidade do material) ajustando em seguida um polinômio de 2º grau ($D_s = aU^2 + bU + C$), obtendo-se, a curva de compactação, com a umidade ótima ($U_{ót}$) e densidade máxima ($D_{s_{máx.}}$) obtidas pela expressão: $U_{ót} = (-b)/2a$, $D_{s_{máx}} = -(b^2 - 4ac)/4a$, onde: a, b e c = Parâmetros da equação.

Determinar o valor da densidade máxima (pico da curva) e a umidade ótima.

Norma

NBR-7182 (ABNT, 1986)

Neste ensaio foram utilizados os materiais RAP/RCD/CAL, RAP/BGS/CIM, RCD/CIM.

Os resultados dos ensaios de proctor estão demonstrados nas tabelas 3.5 a 3.7 e figuras 3.5 a 3.7

Tabela 3.5a / b – Ensaio de Proctor RAP/RCD/CAL HIDRATADA

COMPACTAÇÃO 70% RAP + 29% RCD + 1% CAL HIDRATADA						
Cilindro nº	2	9	7	8	4	
Água acrescentada (g)	180	270	360	450	540	
Peso do cilindro (g)	5591	5794	5800	5530	5549	
Volume do cilindro (g)	2074	2078	2082	2073	2073	
Peso do cilindro + Solo úmido	9260	9650	9753	9369	9310	
Peso do solo úmido (g)	3669	2856	3953	3839	3761	
Densidade do solo úmido (g/cm³)	1,769	1,856	1,899	1,852	1,814	Higroscópica
Capsula nº	4	24	6	13	5	10
Peso de capsula + Solo úmido (g)	252,1	271,9	272,1	278,3	260,1	200,00
Peso de capsula + Solo seco (g)	242,0	258,1	256,7	259,9	242,1	196,20
Peso de capsula (g)	72,7	72,1	78,3	71,9	73,2	72
Peso da água (g)	10,1	13,8	15,4	18,4	18,0	3,8
Peso do solo seco (g)	169,3	186,0	178,4	188,0	168,0	124,2
Umidade	6,0	7,4	8,6	9,8	10,7	3,1
Umidade (%)	6,2	7,7	9,2	10,8	12,3	3,1
Densidade aparente do solo seco (g/cm³)	1,669	1,727	1,748	1,687	1,639	
Peso da amostra seca	5821,9					
Peso da amostra úmida	6000,0					

RESUMO			
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	NORMAL	DENSIDADE MÁXIMA	1,75
	INTERMEDIÁRIA 26 - G		
	MODIFICADA	UMIDADE ÓTIMA	8,4%

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

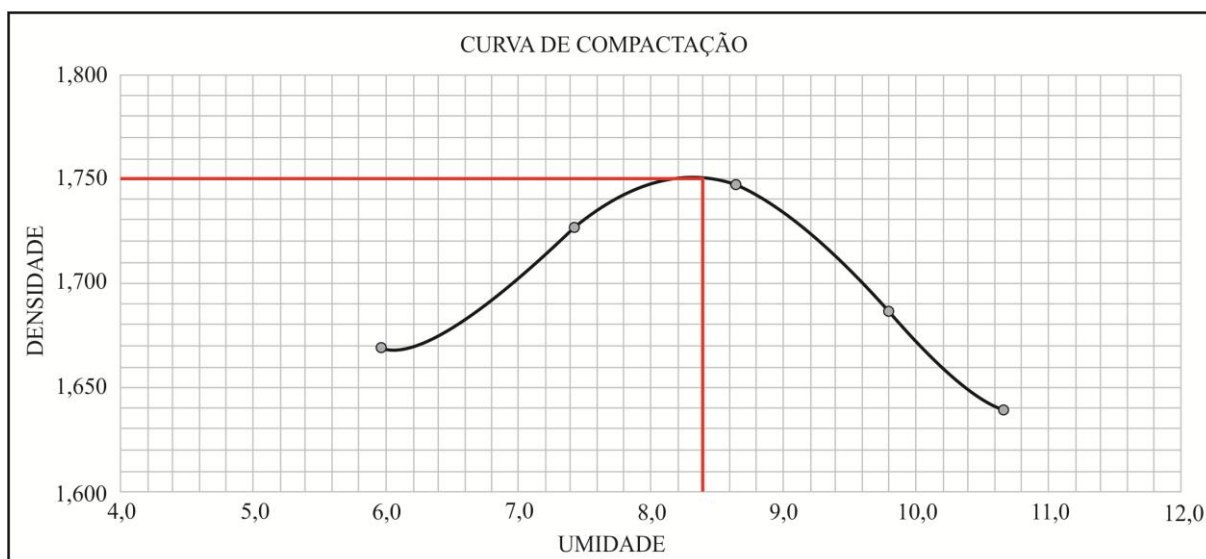


Figura 3.5 – Ensaio de Proctor RAP / RCD / CAL
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.6a / b – Ensaio de Proctor RAP/BGS/CIMENTO PORTLAND

COMPACTAÇÃO 70% RAP + 29% BGS + 1% CIMENTO PORTLAND						
Cilindro nº	6	2	7	1	5	
Água acrescentada (g)	180	270	360	450	540	
Peso do cilindro (g)	5679	5591	5800	5668	5790	
Volume do cilindro (g)	2078	2074	2082	2078	2078	
Peso do cilindro + Solo úmido	9520	9790	10170	10100	10090	
Peso do solo úmido (g)	3841	4199	4370	4432	4300	
Densidade do solo úmido (g/cm³)	1,848	2,025	2,099	2,133	2,069	Higroscópica
Capsula nº	7	8	9	10	4	1
Peso de capsula + Solo úmido (g)	476,7	459,7	436,0	4,749	480,1	500,00
Peso de capsula + Solo seco (g)	464,2	442,2	414,4	445,8	444,1	495,00
Peso de capsula (g)	72,0	71,9	73,1	72,0	72,7	70,3
Peso da água (g)	12,5	17,5	21,6	29,1	36,0	5,0
Peso do solo seco (g)	392,2	370,3	341,3	373,3	371,4	424,7
Umidade	3,2	4,7	6,3	7,8	9,7	1,2
Umidade (%)	4,2	5,7	7,2	8,8	10,3	1,2
Densidade aparente do solo seco (g/cm³)	1,791	1,933	1,974	1,979	1,886	
Peso da amostra seca	5930,2					
Peso da amostra úmida	6000,0					

RESUMO			
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	NORMAL	DENSIDADE MÁXIMA	1,98
	INTERMEDIÁRIA		
	MODIFICADA 55 - G	UMIDADE ÓTIMA	7,6%

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

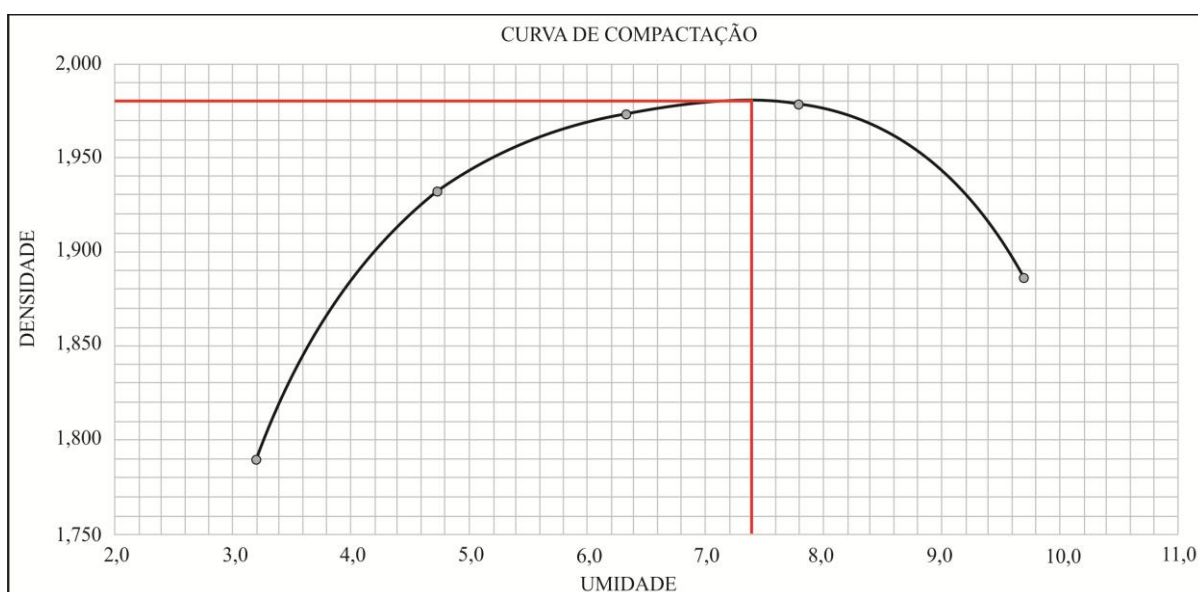


Figura 3.6 – Ensaio de Proctor RAP / BGS / CIM

Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.7a / b – Ensaio de Proctor RCD/CIMENTO PORTLAND

COMPACTAÇÃO 99% RCD + 1% CIMENTO PORTLAND						
Cilindro nº	1	1	1	1	1	
Água acrescentada (g)	300	390	480	570	660	
Peso do cilindro (g)	5664	5664	5664	5664	5664	
Volume do cilindro (g)	2079	2079	2079	2079	2079	
Peso do cilindro + Solo úmido	9550	9750	9921	9885	9867	
Peso do solo úmido (g)	3886	4086	4257	4221	4203	
Densidade do solo úmido (g/cm³)	1,869	1,965	2,048	2,030	2,022	Higroscópica
Capsula nº	2	10	9	7	8	2
Peso de capsula + Solo úmido (g)	715,1	552,8	603,8	586,6	591,4	776,70
Peso de capsula + Solo seco (g)	672,1	506,2	454,3	521,8	520,4	747,10
Peso de capsula (g)	176,1	52,1	52,3	44,0	45,4	176,1
Peso da água (g)	43,0	46,6	58,5	64,8	71,0	29,6
Peso do solo seco (g)	496,0	454,1	493,0	477,8	475,0	571,0
Umidade	8,7	10,3	11,9	13,6	14,9	5,2
Umidade (%)	10,4	12,0	13,6	15,2	16,8	5,2
Densidade aparente do solo seco (g/cm³)	1,720	1,782	1,830	1,788	1,759	
Peso da amostra seca	5704,3					
Peso da amostra úmida	6000,0					

RESUMO			
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	NORMAL	DENSIDADE MÁXIMA	1,83
	INTERMEDIÁRIA		
	MODIFICADA 55 - G	UMIDADE ÓTIMA	11,9%

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

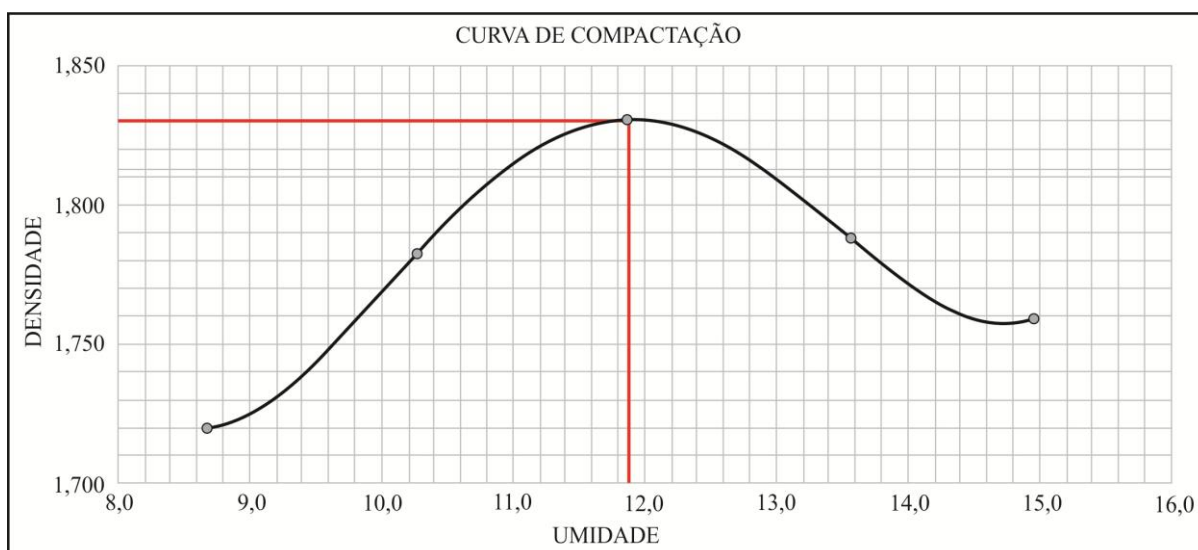


Figura 3.7 – Ensaio de Proctor RCD / CIM

Fonte: FREMIX (2012)

3.2.3 Ensaio de compactação método Marshall modificado

Objetivo

Determinação do teor ótimo de espuma de asfalto a ser utilizado na mistura, para que a mesma se enquadre dentro de especificações que são definidas. Sua finalidade é de evitar desagregação prematura da mistura, por falta de espuma de asfalto, que possui em sua composição ligante, ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso.

Material

- a) Molde de compactação de aço, consistindo de anéis superiores e inferiores e de uma placa base;
- b) Estufa capaz de manter temperaturas de até 200°C, com variação de $\pm 2^\circ\text{C}$;
- c) Balança com capacidade de 5 kg, com resolução de 1 grama;
- d) Extrator de corpo de prova de aço, em forma de disco;
- e) Termômetro de vidro com proteção ou termômetro de haste metálica com mostrador circular, graduado em 2°C , de (10 a 200) $^\circ\text{C}$, para medir a temperatura da mistura;
- f) Espátula de aço, com ponta arredondada;
- g) Base de compactação, instalada em nível perfeitamente estável, livre de vibração ou trepidação;
- h) Soquete de compactação de aço, com 450 gramas de massa e uma altura de queda livre de 45,72cm. A face de compactação no pé do soquete deve ser plana e circular;
- i) Paquímetro com exatidão de 0,1mm;
- j) Molde de compressão de aço;
- l) Repartidores de amostra de 1,3 cm E de 2,5 cm de abertura;
- m) Bandeja metálica de cerca de 50 cm x 30 cm x 5 cm;
- n) Peneiras de 25 / 19 / 9,5 / 4,8 / 2,0 mm de abertura, inclusive tampa e fundo, de acordo com a DNER-ME 035/95, intitulada peneiras de malha quadrada para análise granulométrica;

- o) Colher de metal, com capacidade de (30-50) mL, possuindo cabo com cerca de 25 cm, semelhante a usada por jardineiro;
- p) Luva de amianto com proteção de couro na face externa da palma e dos dedos;
- q) Pinça de aço inoxidável ou de alumínio para colocar e retirar os corpos de prova do banho d'água;
- r) Molde de compressão de aço;
- s) Banho d'água para corpos de prova, provido de uma prateleira plana e perfurada, 50 mm acima do fundo, para permitir a circulação de água por baixo dos corpos de prova. O nível d'água deve ficar no mínimo 3 cm acima dos corpos de prova. O aquecimento deve ser preferivelmente elétrico, com controle automático de temperatura, para (60 ± 1) e para $(38 \pm 1)^{\circ}\text{C}$.
- t) Parafina, pincel e papel de filtro de diâmetro de 101,6 mm.

Método

Atendido os limites da faixa granulométrica, o próximo passo foi moldar os corpos de prova.

A norma da PMSP ETS-02/2009 BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO, rege que devem ser moldados seis corpos de prova. No nosso caso, ensaios de compactação Marshall modificados, foram moldados quatro corpos de prova por cada percentual de espuma entre 1,0 % e 4,0 %, totalizando 20 corpos de prova.

Os corpos de prova Marshall devem ser moldados com 50 golpes por face. Na sequência todos deverão ser colocados por um período de 72 horas em estufa a 60°C . Após permanência em estufa, os mesmos devem ser retirados e resfriados até 25°C , mantendo-se assim a temperatura de equilíbrio.

No nosso caso, os mesmos foram encaminhados para a realização do próximo ensaio, que é o de resistência à tração indireta seca. A média de resistência dos cinco corpos de prova é denominada como resistência média a tração indireta seca.

Norma

ME 043/95 (DNER, 1995)

Os resultados dos ensaios Marshall estão demonstrados nas tabelas 3.8 a 3.10 e figuras 3.8 a 3.10

Tabela 3.8a / b / c – Compactação Marshall RAP/RCD/CAL

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MÉTODO MARSHALL MODIFICADO DENSIDADE APARENTE - TIPO DE MATERIAL 70% RAP + 29% RCD + 1% CAL												
Teor de Espuma	1,0%				1,5%				2,0%			
n° do CP	1	2	3	4	7	8	9	10	13	14	15	17
Peso do Ar g	1089,8	1103,1	1100,6	1100,2	1103,3	1110,6	1072,4	1005,2	1110,1	1105,5	1108,2	1108,7
Peso com Fita g	1093,7	1106,8	1104,6	1104,4	1108,3	1115,2	1076,7	1109,6	1114,2	1118,3	1109,3	1118,8
Peso da Fita g	3,9	3,7	4,0	4,2	5,0	4,6	4,3	4,4	4,1	4,4	4,4	3,9
Dens. da Fita	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Peso Parafinado g	1102,7	1113,5	1111,1	1111,7	1114,7	1124,8	1081,8	1117,5	1121,2	1127,4	1125,7	1125,7
Peso da Parafina g	9,0	6,7	6,5	7,3	6,4	9,6	5,1	7,9	7,0	17,7	16,4	6,9
Dens. de Parafina	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Peso Imerso g	513,3	506,2	516,9	513,4	505,5	532,3	511,4	505,8	522,9	517,7	512,3	512,3
Volume da Fita cm ³	4,0	3,8	4,1	4,3	5,2	4,7	4,4	4,5	4,2	4,5	4,5	4,0
Vol. da Parafina cm ³	10,1	7,5	6,9	8,2	7,2	10,8	5,7	8,9	7,9	5,7	18,4	7,8
Volume do CP cm ³	511,3	502,4	512,8	509,1	500,3	527,6	507,0	501,3	518,7	513,2	507,8	508,3
Dens. Aparente	2,132	2,196	2,146	2,161	2,205	2,105	2,115	2,205	2,140	2,171	2,176	2,193
Média	2,159				2,158				2,170			

Teor de Espuma	2,5%				3,0%							
n° do CP	19	21	22	23	26	27	28	29				
Peso do Ar g	1107,9	1105,5	1108,2	1108,7	1106,7	1106,1	1103,1	1102,1				
Peso com Fita g	1112,0	1109,8	1112,4	1112,5	1111,0	1110,5	1107,5	1106,2				
Peso da Fita g	4,1	4,3	4,2	3,8	4,3	4,4	4,4	4,1				
Dens. da Fita	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97				
Peso Parafinado g	1119,0	1118,7	1118,3	1120,0	1120,6	1120,7	1117,4	1115,5				
Peso da Parafina g	7,0	8,9	5,9	7,5	9,6	10,2	9,9	9,3				
Dens. de Parafina	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89				
Peso Imerso g	510,9	510,3	496,7	507,7	506,7	513,3	511,2	515,5				
Volume da Fita cm ³	4,2	4,4	4,3	3,9	4,4	4,5	4,5	4,2				
Vol. da Parafina cm ³	7,9	10,0	6,6	8,4	10,8	11,5	11,1	10,4				
Volume do CP cm ³	506,7	505,9	492,4	503,8	502,3	508,8	506,7	511,3				
Dens. Aparente	2,187	2,185	2,251	2,201	2,203	2,174	2,177	2,156				
Média	2,206				2,178							

RESUMO			
ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO	TEOR ÓTIMO DE ESPUMA	2,5	DENS. MÁXIMA MARSHALL
			2,206

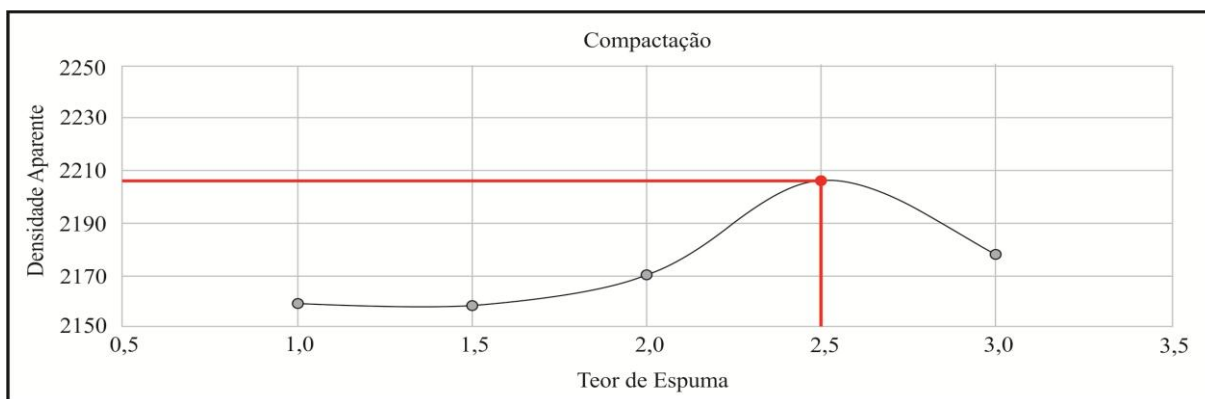


Figura 3.8 – Ensaio de compactação Marshall RAP / RCD / CAL

Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.9a / b / c – Compactação Marshall RAP/BGS/CIMENTO

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MÉTODO MARSHALL MODIFICADO DENSIDADE APARENTE - TIPO DE MATERIAL 70% RAP + 29% BGS + 1% CP												
Teor de Espuma	1,5%				2,0%				2,5%			
nº do CP	1	3	5	6	7	8	11	12	13	14	16	17
Peso do Ar g	1140,3	1136,0	1137,8	1143,5	1134,1	1127,7	1128,2	1143,7	1098,7	1122,7	1127,6	1125,6
Peso com Fita g	1145,0	1140,8	1142,2	1147,7	1138,8	1132,8	1133,2	1148,1	1141,8	1127,8	1132,6	1130,6
Peso da Fita g	4,7	4,8	4,7	4,2	4,7	5,1	5,0	4,4	4,1	5,1	5,0	5,0
Dens. da Fita	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Peso Parafinado g	1159,7	1150,9	1152,2	1154,3	1148,0	1143,3	1143,0	1157,5	1151,8	1140,0	1148,9	1139,5
Peso da Parafina g	14,7	9,5	9,7	6,6	9,2	10,4	9,8	9,4	10,0	12,2	16,3	8,9
Dens. de Parafina	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Peso Imerso g	583,2	570,7	571,0	574,4	565,8	571,3	564,3	578,3	573,6	552,8	565,3	575,3
Volume da Fita cm³	4,8	4,9	4,8	4,3	4,8	5,3	5,2	4,5	4,4	5,3	4,2	5,2
Vol. da Parafina cm³	16,5	10,7	10,9	7,4	10,3	11,7	11,0	10,6	11,2	13,7	18,3	10,0
Volume do CP cm³	578,4	565,8	566,2	570,1	561,0	566,0	559,1	573,8	529,2	547,5	560,1	570,1
Dens. Aparente	1,972	2,008	2,010	1,006	2,022	1,992	2,018	1,993	2,076	2,050	2,013	1,974
Média	1,9999				2,006				2,028			

Teor de Espuma	3,0%				3,5%							
nº do CP	19	21	22	23	26	27	28	29				
Peso do Ar g	1140,0	1147,6	1138,9	1139,6	1141,9	1147,1	1136,3	1135,7				
Peso com Fita g	1144,4	1152,4	1143,6	1144,2	1146,2	1152,2	1141,1	1140,2				
Peso da Fita g	4,4	4,8	4,7	4,6	4,3	5,1	4,8	4,5				
Dens. da Fita	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97				
Peso Parafinado g	1159,7	1150,9	1152,2	1154,3	1156,1	1169,1	1151,2	1154,7				
Peso da Parafina g	10,2	13,0	9,4	17,8	9,9	19,9	10,1	14,5				
Dens. de Parafina	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89				
Peso Imerso g	570,6	575,0	577,0	578,0	569,8	573,6	560,3	568,1				
Volume da Fita cm³	4,5	4,9	4,8	4,7	4,4	5,3	4,9	4,6				
Vol. da Parafina cm³	11,5	14,6	10,6	20,0	11,1	19,0	11,3	16,3				
Volume do CP cm³	566,1	570,1	572,2	573,5	565,4	568,3	555,4	563,5				
Dens. Aparente	2,014	2,013	1,991	1,987	2,020	2,018	2,046	2,016				
Média	2,001				2,025							

RESUMO			
ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO	TEOR ÓTIMO DE ESPUMA	2,5	DENS. MÁXIMA MARSHALL
			2,028

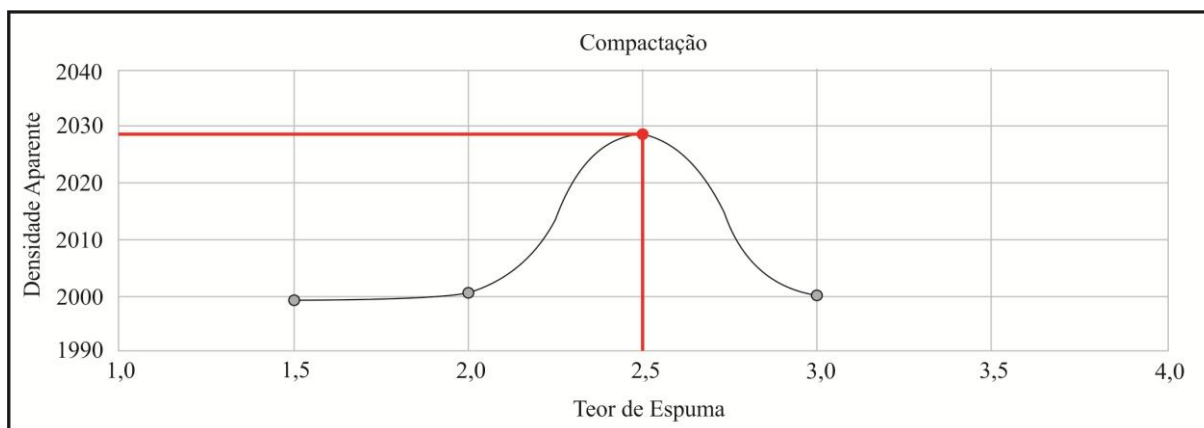


Figura 3.9 – Ensaio de compactação Marshall RAP / BGS / CIM
 Fonte: FREMIX (2012)

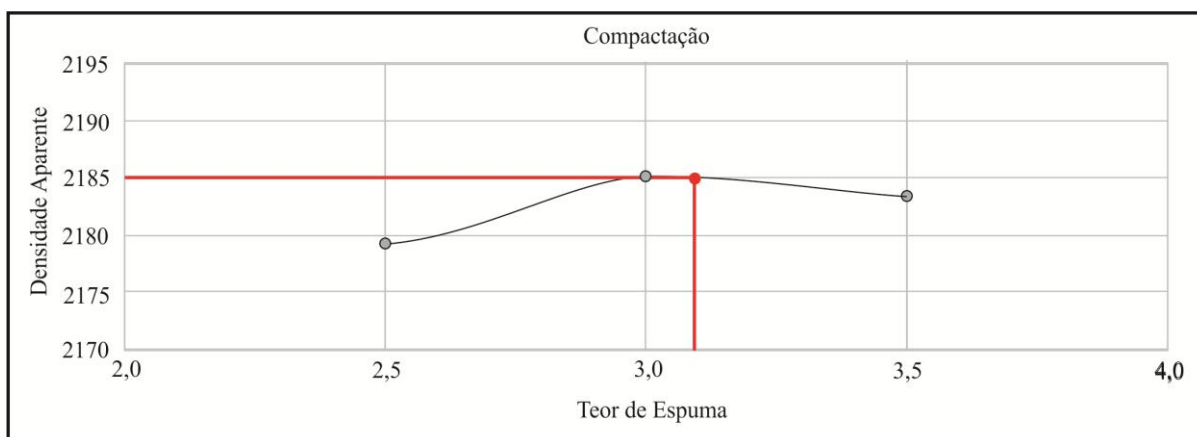
Tabela 3.10a / b / c – Compactação Marshall RCD/CIMENTO

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MÉTODO MARSHALL MODIFICADO DENSIDADE APARENTE - TIPO DE MATERIAL 99% RCD + 1% CP												
Teor de Espuma	2,0%				2,5%				3,0%			
nº do CP	1	2	3	4	6	7	8	9	11	12	13	14
Peso do Ar g	1049,5	1056,5	1050,3	1049,6	1049,6	1053,4	1065,3	1056,7	1051,2	1050,5	1051,0	1051,9
Peso com Fita g	1057,8	1065,6	1098,6	1098,9	1058,8	1062,8	1073,9	1065,4	1059,2	1058,7	1059,3	1060,9
Peso da Fita g	8,3	9,1	48,3	49,3	9,2	9,4	8,6	8,7	8,1	8,2	8,2	8,9
Dens. da Fita	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Peso Parafinado g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Peso da Parafina g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dens. de Parafina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Peso Imerso g	505,1	505,5	497,3	497,9	482,7	491,7	508,6	493,9	495,5	488,9	486,4	488,9
Volume da Fita cm³	8,7	9,5	50,3	51,4	9,6	9,8	9,0	9,1	8,4	8,6	8,6	9,3
Vol. da Parafina cm³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volume do CP cm³	492,5	496,0	447,0	446,6	473,1	481,9	499,6	484,8	487,0	480,3	477,8	479,7
Dens. Aparente	2,131	2,130	2,350	2,351	2,219	2,186	2,132	2,180	2,158	2,187	2,200	2,193
Média	2,240				2,179				2,185			

Teor de Espuma	3,5%				4,0%							
nº do CP	16	17	18	19	21	22	23	24				
Peso do Ar g	1057,2	1037,7	1062,2	1060,1	1047,2	1052,0	1041,9	1051,3				
Peso com Fita g	1065,9	1066,7	1071,1	1068,9	1056,3	1060,8	1050,7	1059,6				
Peso da Fita g	8,8	29,0	8,9	8,9	9,3	8,8	8,7	8,4				
Dens. da Fita	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96				
Peso Parafinado g	-	-	-	-	-	-	-	-				
Peso da Parafina g	-	-	-	-	-	-	-	-				
Dens. de Parafina	-	-	-	-	-	-	-	-				
Peso Imerso g	494,1	491,7	498,9	506,5	481,2	494,7	484,6	495,4				
Volume da Fita cm³	9,1	30,2	9,3	9,3	9,7	9,2	9,1	8,8				
Vol. da Parafina cm³	-	-	-	-	-	-	-	-				
Volume do CP cm³	484,9	461,6	489,6	497,2	471,5	485,5	475,5	486,7				
Dens. Aparente	2,180	2,248	2,170	2,132	2,221	2,167	2,191	2,160				
Média	2,183				2,185							

RESUMO			
ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO	TEOR ÓTIMO DE ESPUMA	3,2	DENS. MÁXIMA MARSHALL
			2,185

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

Figura 3.10 – Ensaio de compactação Marshall RCD / CIM
Fonte: FREMIX (2012)

3.2.4 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Este ensaio estabelece os procedimentos metodológicos para determinar a resistência à tração por compressão diametral de misturas betuminosas, de utilidade para projeto de pavimentos flexíveis.

Objetivo

Este método prescreve o modo pelo qual se determina a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de misturas betuminosas, através do ensaio de compressão diametral.

Material

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) - Prensa mecânica, com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N (ou 2,0 kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s;
- b) - Estufa capaz de manter a temperatura entre 30° C e 60° C;
- c) - Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25° C;
- d) - Paquímetro.

Preparação da Amostra

O corpo-de-prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm a 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm.

Método

- a) - Medir a altura (H) do corpo-de-prova com paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas. Adotar como altura o valor da média aritmética das quatro leituras;
- b) - Medir o diâmetro (D) do corpo-de-prova com o paquímetro, em três posições paralelas. Adotar como diâmetro o valor da média aritmética das três leituras;
- c) - Colocar o corpo-de-prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de 2 (duas) horas, de modo a se obter a temperatura específica para o ensaio, 25° C, 30° C, 45° C, ou 60° C.

Em seguida, é colocada em posição horizontal, repousando, segundo uma geratriz, sobre o prato inferior da prensa.

Verifica-se visualmente a retilineidade das geratrizes de contato com ambos os pratos. No caso de desvios sensíveis, é necessário interpor, entre os pratos da prensa e do corpo-de-prova, ao longo dessas geratrizes, dois frisos metálicos curvos, com o comprimento do corpo-de-prova.

Ajustar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova.

d) - Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical;

e) Anotar o valor da carga de ruptura (F).

Resultados

Com o valor obtido é calculada a resistência à tração do corpo de prova rompido por compressão diametral, através da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2.F}{\pi.D.H}$$

Onde:

σ_R – resistência à tração, kgf/cm²;

F – carga de ruptura, kgf;

D – diâmetro de corpo-de-prova, cm;

H – altura do corpo-de-prova, cm;

Norma

ME 136/2010 (DNIT, 2010)

Os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral estão demonstrados nas tabelas 3.11 a 3.16 e figuras 3.11 a 3.13

Tabela 3.11a / b / c / d / e / f / g / h / i – ITS RAP/RCD/CAL

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E TEOR TOTAL DE CAP (FOAMED BITUMEN) - MATERIAL 70% RAP + 29% RCD + 1% CAL									
Teor de Espuma Adicionado %	Teor de Umidade								
	Cápsula n°	Massa (g)	Amostra Umida + Cápsula (g)	Amostra Seca + Cápsula (g)	Água (g)	Amostra Seca (g)	Umidade %		
1,5	5	73,30	224,90	213,40	11,50	140,10	8,2		
2,0	4	72,70	231,30	218,40	12,90	145,70	8,9		
2,5	1	70,30	250,40	235,40	15,00	165,10	9,1		
3,0	3	70,50	232,90	220,90	12,00	150,40	8,0		
3,5	2	74,20	281,10	264,40	16,70	190,20	8,8		

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 1,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
1	1098,8	-	73,20	101,40	2,3318	182	348,712	299	-
2	1103,1	-	75,70	102,00	2,4258	192	367,872	303	-
3	1100,6	1184,9	73,10	101,50	2,3310	118	226,088	-	194
4	1100,2	1188,4	74,10	101,70	2,3675	125	239,500	-	202
							Média	301	198
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		66	

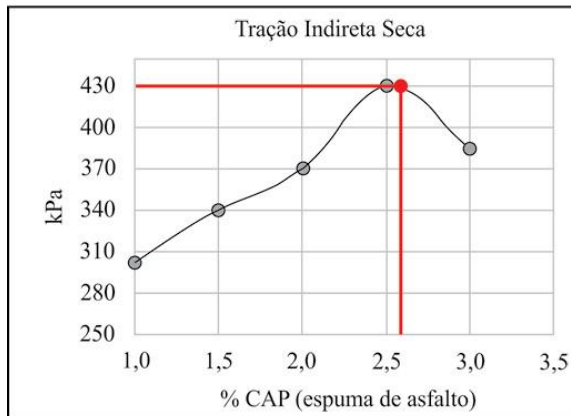
DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 1,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
7	1103,3	-	74,94	101,74	2,3953	190	364,040	304	-
8	1110,6	-	72,55	101,52	2,3139	235	450,260	389	-
9	1072,4	1152,4	70,45	101,67	2,2502	110	210,760	-	187
10	1105,2	1203,6	75,22	101,44	2,3971	128	245,248	-	205
							Média	347	196
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		57	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 2,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
13	1110,1	-	74,30	100,54	2,3468	225	431,100	367	-
14	1113,9	-	75,77	101,25	2,4101	240	459,840	382	-
15	1104,9	1192,0	72,87	101,09	2,3142	122	233,752	-	202
16	1114,9	1218,3	76,83	101,43	2,4482	130	249,080	-	203
							Média	374	203
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		54	

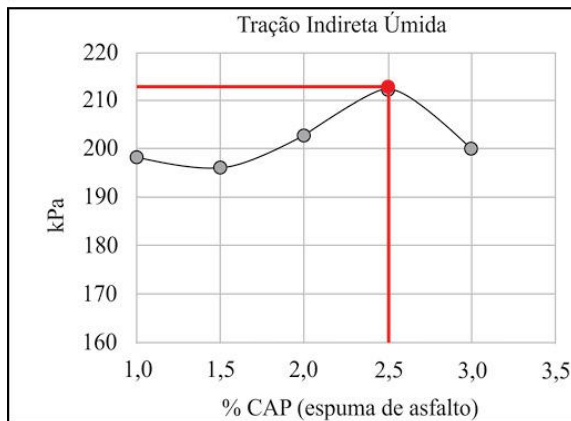
DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 2,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
19	1107,9	-	74,91	102,28	2,4070	270	517,320	430	-
20	1105,5	-	74,98	101,60	2,3933	285	546,060	456	-
21	1108,2	1206,3	76,77	101,72	2,4533	130	249,080	-	203
22	1108,7	1193,4	75,61	102,01	2,4231	140	268,240	-	221
							Média	443	212
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		48	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
25	1106,7	-	75,58	101,40	2,4077	239	457,924	380	-
26	1106,1	-	74,76	101,48	2,3834	241	461,756	387	-
27	1103,1	1190,5	74,19	101,80	2,3727	115	220,340	-	186
28	1102,1	1184,1	73,57	101,42	2,3441	131	250,996	-	214
Média								384	200
$\pi = 3,1416$ Sensibilidade do Anel = 1,99								TR%	52

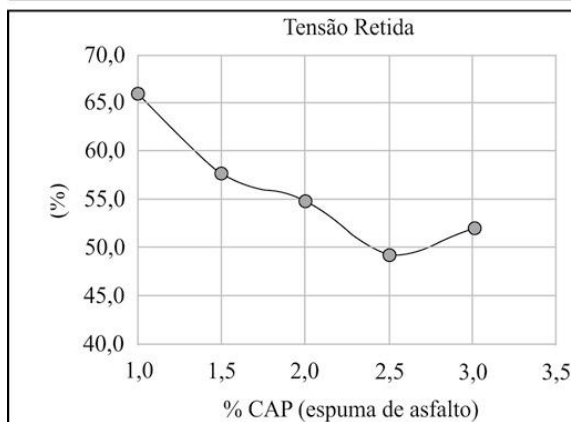
Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim



CP n°	(kN)	$\pi h D$ (m³)	Tração Indireta (kPa)	Média
1	348,712	2,3318	299	301
2	367,852	2,4258	303	
7	364,040	2,3953	304	
8	450,260	2,3139	389	340
13	431,100	2,3468	367	
14	459,840	2,4101	382	
19	517,320	2,4070	430	430
20	546,060	2,3933	456	
25	457,924	2,4077	380	
26	461,756	2,3834	387	384



CP n°	(kN)	$\pi h D$ (m³)	Tração Indireta (kPa)	Média
3	226,088	2,3310	194	198
4	239,500	2,3675	202	
9	210,760	2,2502	187	
10	245,248	2,3971	205	196
15	233,752	2,3142	202	
16	249,080	2,4482	203	
21	249,080	2,4533	203	203
22	268,240	2,4231	221	
27	220,340	2,3727	186	
28	250,996	2,3441	214	200



RESUMO	
Teor mínimo admissível:	2,3 %
Teor ótimo (recomendável):	2,6 %
Teor Máxima admissível:	2,9 %
ITS (seco) =	430 kPa
ITS úmido =	213 kPa

Figuras 3.11a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / RCD / CAL
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.12a / b / c – Compressão Diametral RAP/RCD/CAL

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOSAGEM 70 RAP 29% RCD + 1% CAL HIDRATADA											
Teor de CAP (%)				1,0%				1,5%			
Corpo de Prova nº				1	2	3	4	7	8	9	10
Altura do CP	1ª Medida	h ₁	cm	7,31	7,42	7,37	7,35	7,62	7,20	7,05	7,53
	2ª Medida	h ₂	cm	7,36	7,57	7,29	7,43	7,42	7,25	7,07	7,50
	3ª Medida	h ₃	cm	7,40	7,68	7,26	7,49	7,42	7,25	7,00	7,51
	4ª Medida	h ₄	cm	7,21	7,62	7,31	7,33	7,52	7,33	7,07	7,54
	Alt. Média	H	cm	7,32	7,57	7,31	7,40	7,49	7,26	7,04	7,52
Diâmetro do CP	1ª Medida	d ₁	cm	10,16	10,11	10,14	10,19	10,15	10,15	10,13	10,14
	2ª Medida	d ₂	cm	10,14	10,23	10,13	10,18	10,17	10,16	10,21	10,14
	3ª Medida	d ₃	cm	10,12	10,27	10,17	10,16	10,21	10,15	10,16	10,15
	Diân. Médio	D	cm	10,14	10,20	10,20	10,18	10,17	10,15	10,20	10,14
	Área do CP	π.H.D	3,1416	233,1	242,7	234,2	236,5	239,5	231,4	225,7	239,7
Leitura no Deflectômetro		Const. do Anel	1,916	182,0	192,0	118,0	125,0	190,0	235,0	110,0	128,0
Carga de Ruptura do CP		F	kgf	348,7	367,9	226,1	239,5	364,0	450,0	211,0	245,0
Resistência à Tração		δR=2.F/π.D.H	MPa	0,30	0,30	0,19	0,20	0,30	0,39	0,19	0,20
Teor de CAP (%)				2,0%				2,5%			
Corpo de Prova nº				13	14	15	16	19	20	21	22
Altura do CP	1ª Medida	h ₁	cm	7,48	7,55	7,35	7,70	7,52	7,42	7,67	7,48
	2ª Medida	h ₂	cm	7,45	7,68	7,30	7,78	7,50	7,53	7,69	7,62
	3ª Medida	h ₃	cm	7,36	7,57	7,25	7,63	7,46	7,52	7,68	7,52
	4ª Medida	h ₄	cm	7,43	7,52	7,26	7,63	7,49	7,53	7,67	7,62
	Alt. Média	H	cm	7,43	7,58	7,29	7,68	7,49	7,50	7,68	7,56
Diâmetro do CP	1ª Medida	d ₁	cm	9,90	10,09	10,10	10,12	10,14	10,21	10,17	10,18
	2ª Medida	d ₂	cm	10,10	10,14	10,11	10,16	10,25	10,12	10,18	10,17
	3ª Medida	d ₃	cm	10,14	10,14	10,12	10,15	10,30	10,15	10,17	10,26
	Diân. Médio	D	cm	10,05	10,13	10,20	10,14	10,23	10,16	10,20	10,20
	Área do CP	π.H.D	3,1416	234,6	241,0	233,5	244,8	240,7	239,4	246,0	242,3
Leitura no Deflectômetro		Const. do Anel	1,916	225,0	240,0	122,0	130,0	270,0	285,0	130,0	140,0
Carga de Ruptura do CP		F	kgf	431,0	460,0	234,0	249,0	517,0	546,0	249,0	268,0
Resistência à Tração		δR=2.F/π.D.H	MPa	0,37	0,38	0,20	0,20	0,43	0,46	0,20	0,22
Teor de CAP (%)				3,0%				DADOS DA AMOSTRA			
Corpo de Prova nº				25	26	27	28	Pass. na # 200:		5,1 %	
Altura do CP	1ª Medida	h ₁	cm	7,57	7,51	7,46	7,35	Umidade ótima:		8,4 %	
	2ª Medida	h ₂	cm	7,60	7,44	7,41	7,35	Adição do teor de CAP:		0,5 %	
	3ª Medida	h ₃	cm	7,53	7,47	7,38	7,40	% de água na espuma:		2,0 %	
	4ª Medida	h ₄	cm	7,54	7,49	7,43	7,34	Expansão da espuma:		28vezes	
	Alt. Média	H	cm	7,56	7,48	7,42	7,36	Meia Vida:		12 seg	
Diâmetro do CP	1ª Medida	d ₁	cm	10,14	10,14	10,17	10,15	Nº de golpes		75	
	2ª Medida	d ₂	cm	10,14	10,14	10,18	10,16	Massa da amostra:		10 kg	
	3ª Medida	d ₃	cm	10,14	10,16	10,20	20,12	Água acrescentada:		520 ml	
	Diân. Médio	D	cm	10,14	10,15	10,18	10,14				
	Área do CP	π.H.D	3,1416	240,8	238,8	237,3	234,5				
Leitura no Deflectômetro		Const. do Anel	1,916	239,0	241,0	115,0	131,0				
Carga de Ruptura do CP		F	kgf	458,0	462,0	220,0	251,0				
Resistência à Tração		δR=2.F/π.D.H	MPa	0,38	0,39	0,19	0,21				

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.13a / b / c / d / e / f / g / h / i – ITS RAP/BGS/CIMENTO

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E TEOR TOTAL DE CAP (FOAMED BITUMEN) - MATERIAL 70% RAP + 29% BGS + 1% CP									
Teor de Espuma Adicionado %	Teor de Umidade								
	Cápsula n°	Massa (g)	Amostra Umida + Cápsula (g)	Amostra Seca + Cápsula (g)	Água (g)	Amostra Seca (g)	Umidade %		
1,5	5	73,30	495,20	465,20	30,00	391,90	7,7		
2,0	8	71,90	376,00	351,70	24,30	279,80	8,7		
2,5	7	72,00	424,20	401,20	23,00	329,20	7,0		
3,0	9	73,10	433,10	405,10	28,00	332,00	8,4		
3,5	10	72,00	497,20	465,10	32,10	393,10	8,2		

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 2,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
5	1137,8	-	72,00	101,60	2,2981	170	338,300	294	-
6	1143,5	-	71,00	101,70	2,2685	155	308,450	272	-
1	1140,3	1159,9	70,20	101,90	2,2473	137	272,630	-	243
3	1136,0	1136,0	71,40	101,80	2,2835	110	281,900	-	192
							Média	283	217
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		77	

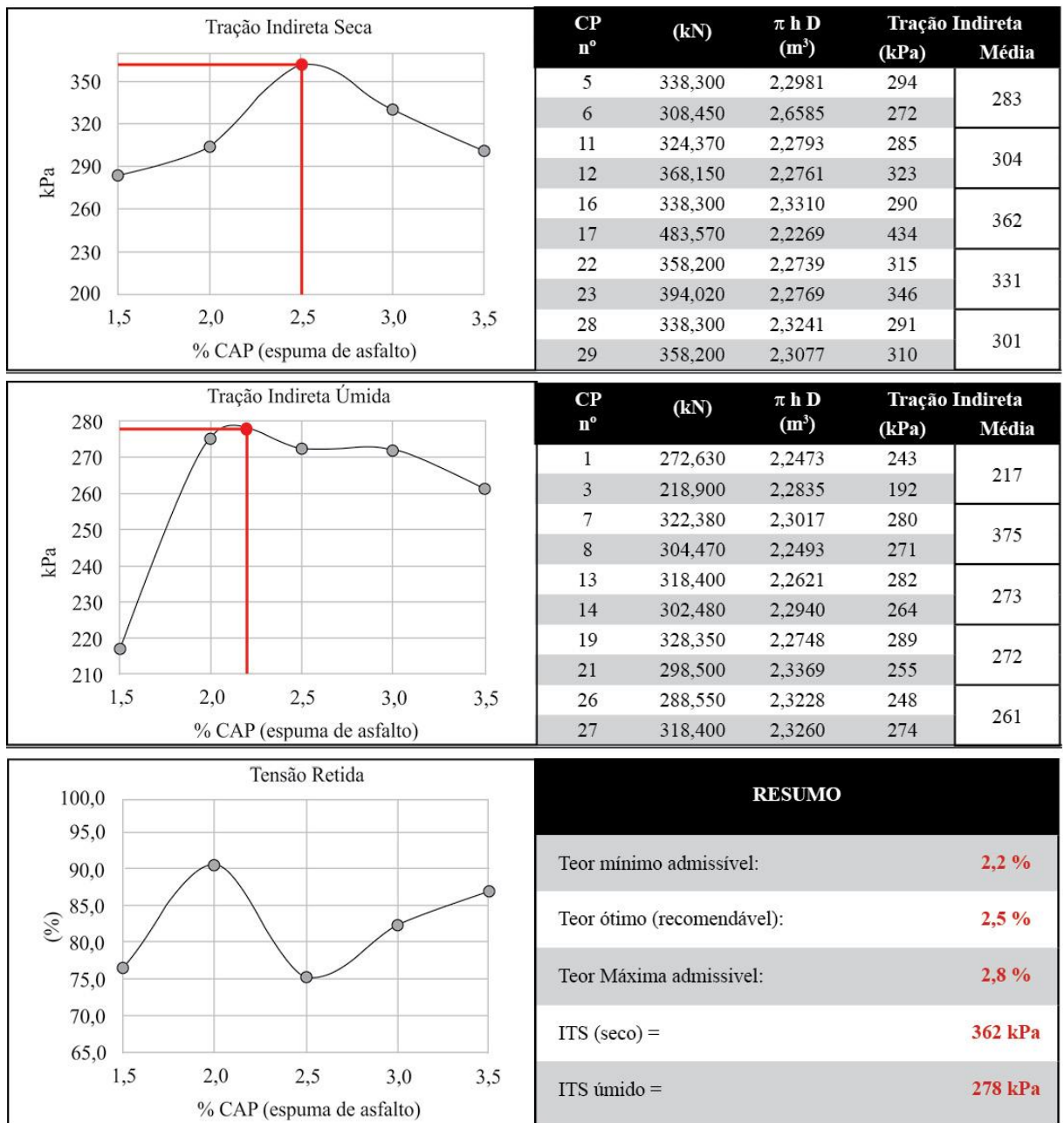
DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 2,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
11	1128,2	-	71,20	101,90	2,2793	163	324,370	285	-
12	1143,7	-	71,10	101,90	2,2761	185	368,150	323	-
7	1134,1	1142,3	71,90	101,90	2,3017	162	322,380	-	280
8	1132,8	1147,9	70,40	101,70	2,2493	153	304,470	-	271
							Média	304	275
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		91	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
16	1127,6	-	73,10	101,50	2,3310	170	338,300	290	-
17	1125,6	-	69,70	101,70	2,2269	243	483,570	434	-
13	1098,7	1157,4	70,80	101,70	2,2621	160	318,400	-	282
14	1122,7	1131,1	71,80	101,70	2,2940	152	302,480	-	264
							Média	362	273
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		75	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
22	1138,9	-	71,10	101,80	2,2739	180	358,200	315	-
23	1139,6	-	71,40	101,50	2,2767	198	394,020	346	-
19	1140,0	1146,6	71,20	101,70	2,2748	165	228,350	-	298
21	1147,6	1177,2	73,00	101,90	2,3369	150	298,500	-	255
							Média	331	272
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99				TR%		82	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 4,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
28	1136,3	-	72,60	101,90	2,3241	170	338,300	291	-
29	1135,7	-	72,30	101,60	2,3077	180	358,200	310	-
26	1141,9	1150,3	72,70	101,70	2,3228	145	288,550	-	248
27	1147,1	1170,3	72,80	101,70	2,3260	160	218,400	-	274
Média								301	261
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,99					TR%	87	

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim



Figuras 3.12a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / BGS / CIM
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.14a / b / c – Compressão Diametral RAP/BGS/CIMENTO

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOSAGEM 70% RAP + 29% BGS + 1% CIMENTO PORTLAND											
Teor de CAP (%)				1,5%				2,0%			
Corpo de Prova nº				1	3	5	5	7	8	11	12
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	7,20	7,14	7,20	7,10	7,19	7,04	7,12	7,11
	2ª Medida	h_2	cm	7,20	7,14	7,20	7,10	7,19	7,04	7,12	7,11
	3ª Medida	h_3	cm	7,20	7,14	7,20	7,10	7,19	7,04	7,12	7,11
	4ª Medida	h_4	cm	7,20	7,14	7,20	7,10	7,19	7,04	7,12	7,11
	Alt. Média	H	cm	7,20	7,14	7,20	7,40	7,19	7,04	7,12	7,11
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	10,19	10,16	10,20	10,17	10,19	10,17	10,19	10,19
	2ª Medida	d_2	cm	10,19	10,16	10,20	10,17	10,19	10,17	10,20	10,19
	3ª Medida	d_3	cm	10,19	10,16	10,20	10,17	10,19	10,17	10,20	10,19
	Diân. Médio	D	cm	10,19	10,16	10,20	10,17	10,19	10,17	10,20	10,19
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	230,5	227,9	230,7	226,8	230,2	224,9	228,2	227,6
Leitura no Deflectômetro				Const. do Anel	1,916	137,0	110,0	170,0	155,0	162,0	153,0
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	272,6	218,9	338,3	308,5	322,0	304,0
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,24	0,19	0,29	0,27	0,28	0,27

Teor de CAP (%)				2,5%				3,0%			
Corpo de Prova nº				13	14	16	17	19	21	22	23
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	7,08	7,18	7,31	6,97	7,12	7,30	7,11	7,14
	2ª Medida	h_2	cm	7,08	7,18	7,31	6,97	7,12	7,30	7,11	7,14
	3ª Medida	h_3	cm	7,08	7,18	7,31	6,97	7,12	7,30	7,11	7,14
	4ª Medida	h_4	cm	7,08	7,18	7,31	6,97	7,12	7,30	7,11	7,14
	Alt. Média	H	cm	7,08	7,18	7,31	6,97	7,12	7,30	7,11	7,14
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	10,17	10,17	10,20	10,17	10,17	10,19	10,20	10,15
	2ª Medida	d_2	cm	10,17	10,17	10,20	10,17	10,17	10,19	10,20	10,15
	3ª Medida	d_3	cm	10,17	10,17	10,20	10,17	10,17	10,19	10,20	10,15
	Diân. Médio	D	cm	10,17	10,17	10,20	10,17	10,17	10,19	10,20	10,15
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	226,2	229,4	234,2	222,7	227,5	233,7	227,8	227,7
Leitura no Deflectômetro				Const. do Anel	1,916	160,0	152,0	170,0	243,0	165,0	150,0
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	318,0	302,0	338,0	484,0	328,0	299,0
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,28	0,26	0,29	0,43	0,30	0,30

Teor de CAP (%)				3,0%				DADOS DA AMOSTRA	
Corpo de Prova nº				26	27	28	29	Pass. na # 200:	6,5 %
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	7,27	7,28	7,26	7,23	Umidade ótima:	7,6 %
	2ª Medida	h_2	cm	7,27	7,28	7,26	7,23	Adição do teor de CAP:	0,5 %
	3ª Medida	h_3	cm	7,27	7,28	7,26	7,23	% de água na espuma:	2,0 %
	4ª Medida	h_4	cm	7,27	7,28	7,26	7,23	Expansão da espuma:	24vezes
	Alt. Média	H	cm	7,27	7,28	7,26	7,23	Meia Vida:	12 seg
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	10,17	10,17	10,19	10,16	Nº de golpes	75
	2ª Medida	d_2	cm	10,17	10,17	10,19	10,16	Massa da amostra:	10 kg
	3ª Medida	d_3	cm	10,17	10,17	10,19	10,16	Água acrescentada:	560 ml
	Diân. Médio	D	cm	10,17	10,17	10,19	10,16		
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	232,3	232,6	232,4	230,8		
Leitura no Deflectômetro				Const. do Anel	1,916	160,0	189,0	338,0	358,0
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	458,0	462,0	220,0	251,0
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,30	0,20	0,30	0,30

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.15a / b / c / d / e / f / g / h – ITS RCD/CIMENTO

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E TEOR TOTAL DE CAP (FOAMED BITUMEN) - MATERIAL 99% RCD + 1% CP									
Teor de Espuma Adicionado %	Teor de Umidade								
	Cápsula n°	Massa (g)	Amostra Umida + Cápsula (g)	Amostra Seca + Cápsula (g)	Água (g)	Amostra Seca (g)	Umidade %		
2,0	4	44,79	446,00	409,01	36,99	364,22	10,2		
2,5	6	44,20	537,63	495,99	41,64	451,79	9,2		
3,0	2	51,46	582,91	532,12	50,79	480,66	10,6		
3,5	5	44,85	577,11	532,10	45,01	487,25	9,2		
4,0	7	43,97	533,05	490,38	42,67	446,41	9,6		

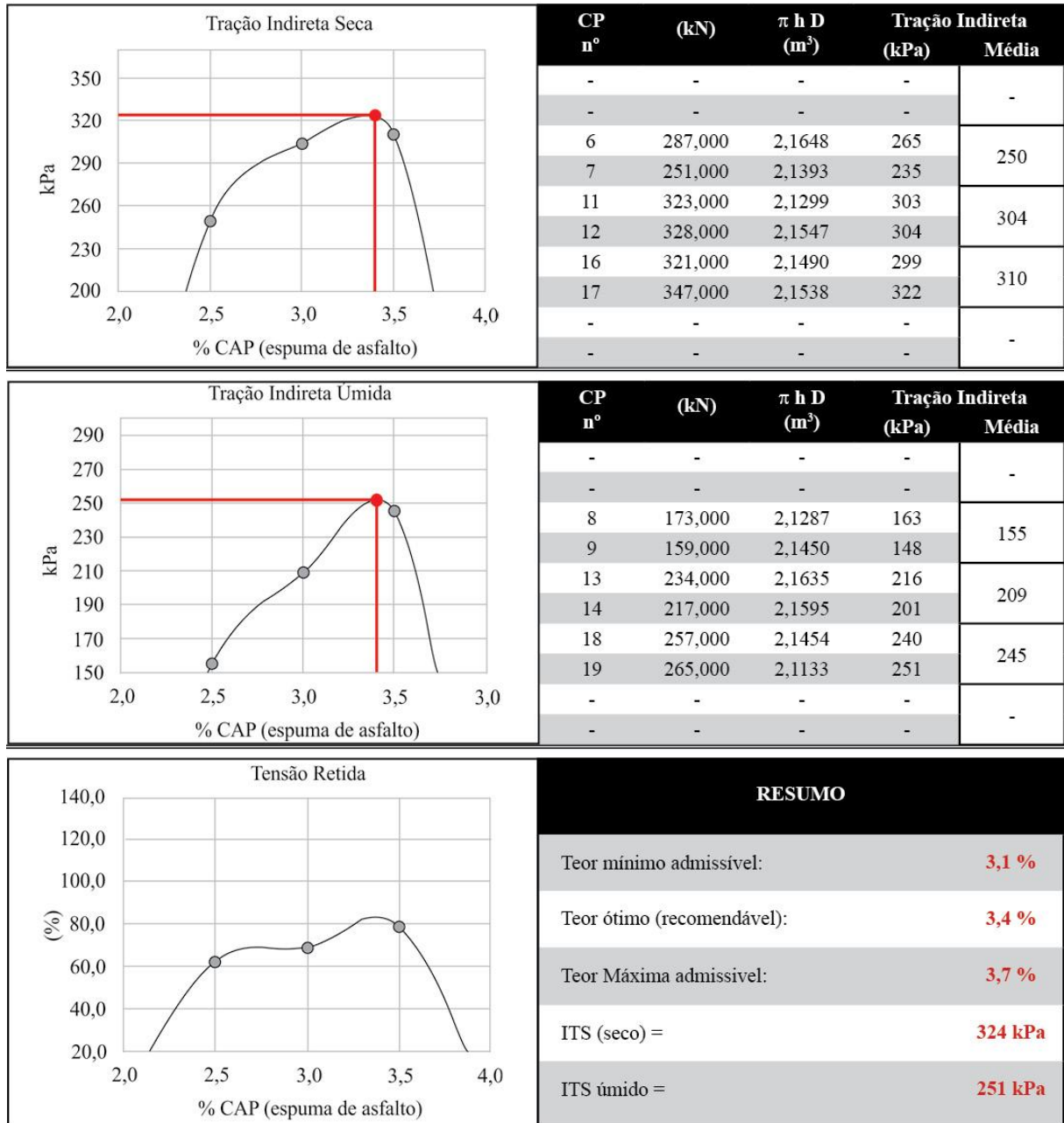
DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 2,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
6	1049,6	-	70,10	98,30	2,1648	287	287,000	265	-
7	1053,4	-	69,70	97,70	2,1393	251	251,000	235	-
8	1065,3	1155,4	69,00	98,20	2,1287	173	173,000	-	163
9	1056,7	1154,4	69,60	98,10	2,1415	159	159,000	-	148
							Média	250	155
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,0				TR%		62	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,0% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
11	1051,2	-	68,90	98,40	2,1299	323	323,000	303	-
12	1050,5	-	69,70	98,40	2,1547	328	328,000	304	-
13	1051,1	1141,9	70,20	98,10	2,1635	234	234,000	-	216
14	1052,0	1141,1	70,00	98,20	2,1595	217	217,000	-	201
							Média	304	209
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,0				TR%		69	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
16	1057,2	-	69,80	98,00	2,1490	321	321,000	299	-
17	1057,8	-	70,10	97,80	2,1538	347	347,000	322	-
18	1062,2	1142,7	69,40	98,40	2,1454	257	257,000	-	240
19	1060,1	1141,1	68,50	98,20	2,1133	265	265,000	-	251
							Média	310	245
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,0				TR%		79	

DETERMINAÇÃO DO I.T.S. - COM 3,5% DE ESPUMA									
CP n°	Massa		Altura (cm)	Diâmetro (cm)	$\pi h D$	Leitura no Extensômetro	P (kN)	Tração Indireta ITS	
	Seca (g)	Saturada (g)						Seca (kPa)	Úmida (kPa)
16	1057,2	-	69,80	98,00	2,1490	321	321,000	299	-
17	1057,8	-	70,10	97,80	2,1538	347	347,000	322	-
18	1062,2	1142,7	69,40	98,40	2,1454	257	257,000	-	240
19	1060,1	1141,1	68,50	98,20	2,1133	265	265,000	-	251
							Média	310	245
$\pi = 3,1416$		Sensibilidade do Anel = 1,0				TR%		79	

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim



Figuras 3.13a / b / c – Ensaio de I.T.S. RAP / BGS / CIM
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.16a / b / c – Compressão Diametral RCD/CIMENTO

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOSAGEM 99% RCD + 1% CP															
Teor de CAP (%)				2,0%					2,5%						
Corpo de Prova nº				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	6,80	6,81	6,85	6,85	6,86	7,01	6,97	6,90	6,96	6,88		
	2ª Medida	h_2	cm	6,80	6,81	6,85	6,85	6,86	7,01	6,97	6,90	6,96	6,88		
	3ª Medida	h_3	cm	6,80	6,81	6,85	6,85	6,86	7,01	6,97	6,90	6,96	6,88		
	4ª Medida	h_4	cm	6,80	6,81	6,85	6,85	6,86	7,01	6,97	6,90	6,96	6,88		
	Alt. Média	H	cm	6,80	6,81	6,85	6,85	6,86	7,01	6,97	6,90	6,96	6,88		
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	9,76	9,76	9,81	9,79	9,74	9,83	9,77	9,82	9,81	9,83		
	2ª Medida	d_2	cm	9,76	9,76	9,81	9,79	9,74	9,83	9,77	9,82	9,81	9,83		
	3ª Medida	d_3	cm	9,76	9,76	9,81	9,79	9,74	9,83	9,77	9,82	9,81	9,83		
	Diân. Médio	D	cm	9,76	9,76	10,20	9,79	10,20	9,83	9,77	10,20	9,81	9,83		
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	208,5	208,8	219,5	210,7	219,8	216,5	213,9	221,1	214,5	220,5		
Leitura no Deflectômetro Const. do Anel				1,00	347,0	299,0	208,0	172,0	000,0	287,0	251,0	173,0	159,0	000,0	
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	347,0	299,0	208,0	172,0	000,0	287,0	251,0	173,0	159,0	000,0
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,33	0,29	0,19	0,16	0,00	0,27	0,23	0,16	0,15	0,00

Teor de CAP (%)				3,0%					3,5%						
Corpo de Prova nº				11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	6,89	6,97	7,02	7,00	6,98	6,98	7,01	6,94	6,85	6,98		
	2ª Medida	h_2	cm	6,89	6,97	7,02	7,00	6,98	6,98	7,01	6,94	6,85	6,98		
	3ª Medida	h_3	cm	6,89	6,97	7,02	7,00	6,98	6,98	7,01	6,94	6,85	6,98		
	4ª Medida	h_4	cm	6,89	6,97	7,02	7,00	6,98	6,98	7,01	6,94	6,85	6,98		
	Alt. Média	H	cm	6,89	6,97	7,02	7,00	6,98	6,98	7,01	6,94	6,85	6,98		
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	9,84	9,84	9,81	9,82	9,53	9,80	9,78	9,84	9,82	9,83		
	2ª Medida	d_2	cm	9,84	9,84	9,81	9,82	9,53	9,80	9,78	9,84	9,82	9,83		
	3ª Medida	d_3	cm	9,84	9,84	9,81	9,82	9,53	9,80	9,78	9,84	9,82	9,83		
	Diân. Médio	D	cm	9,84	9,84	10,20	9,82	10,20	9,80	9,78	10,20	9,82	10,20		
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	213,0	215,5	225,0	216,0	223,7	214,9	215,4	222,4	211,3	223,7		
Leitura no Deflectômetro Const. do Anel				1,00	323,0	328,0	324,0	217,0	000,0	321,0	347,0	257,0	265,0	000,0	
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	323,0	328,0	234,0	217,0	000,0	321,0	347,0	257,0	265,0	000,0
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,30	0,30	0,21	0,20	0,00	0,30	0,32	0,23	0,25	0,00

Teor de CAP (%)				4,0%					DADOS DA AMOSTRA		
Corpo de Prova nº				21	22	23	24	25	Pass. na # 200:		8,8 %
Altura do CP	1ª Medida	h_1	cm	7,00	6,90	7,02	6,93	6,96	Umidade ótima:		11,9 %
	2ª Medida	h_2	cm	7,00	6,90	7,02	6,93	6,96	Adição do teor de CAP:		0,5 %
	3ª Medida	h_3	cm	7,00	6,90	7,02	6,93	6,96	% de água na espuma:		2,0 %
	4ª Medida	h_4	cm	7,00	6,90	7,02	6,93	6,96	Expansão da espuma:		26 vezes
	Alt. Média	H	cm	7,00	6,90	7,02	6,93	6,96	Meia Vida:		12 seg
Diâmetro do CP	1ª Medida	d_1	cm	9,81	9,81	9,79	9,86	9,83	Nº de golpes		75
	2ª Medida	d_2	cm	9,81	9,81	9,79	9,86	9,83	Massa da amostra:		10 kg
	3ª Medida	d_3	cm	9,81	9,81	9,79	9,86	9,83	Água acrescentada:		600 ml
	Diân. Médio	D	cm	9,81	9,81	9,79	9,86	9,83			
	Área do CP	$\pi.H.D$	3,1416	215,7	212,7	215,9	214,7	219,9			
Leitura no Deflectômetro Const. do Anel				1,00	239,0	241,0	115,0	131,0			
Carga de Ruptura do CP				F	kgf	458,0	462,0	220,0			
Resistência à Tração				$\delta R=2.F/\pi.D.H$	MPa	0,38	0,39	0,19	0,21	0,00	

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim

Fonte: FREMIX (2012)

3.2.5 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) – *Califórnia Bearing Ratio (CBR)*

O intuito do ensaio é avaliar a resistência ou capacidade de suporte de um determinado material de camada de pavimento e subleito.

Objetivo

Medir a resistência à penetração de um pistão com seção transversal de 4,96 cm, a uma velocidade de 0,05 pol/min, em uma amostra de solo saturada, compactada segundo método de Proctor.

O valor obtido da resistência à penetração é expresso em porcentagem, sendo que 100% é o valor que corresponde à penetração em uma amostra de brita graduada de elevada qualidade, que foi adotada como padrão de referência.

Material

a) - Conjunto constituído de molde cilíndrico com 15,2 cm de diâmetro interno e 17,8 cm de altura, com entalhe superior externo em meia espessura; cilindro complementar com 5 cm de altura, com entalhe inferior interno em meia espessura, e prato de base perfurado com 24 cm de diâmetro, com dispositivo para fixação do molde;

b) - Disco espaçador maciço com 15 cm de diâmetro e 6,4 cm de altura;

c) - Soquete cilíndrico, para compactação, face inferior plana, de altura de queda de 45,7 cm, com 4,5 kg de peso e 5 cm de diâmetro de face inferior;

d) - Prato perfurado com 14,9 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura, com haste central ajustável, constituída de uma parte fixa rosqueada internamente e recartilhada externamente, com a face superior plana para contato com o extensômetro;

e) - Tripé com dispositivo para fixação do extensômetro;

f) - Disco anelar para sobrecarga, dividido diametralmente em duas partes com 2,27 kg de peso total, com diâmetro externo de 14,9 cm e diâmetro interno de 5,40 cm;

g) - Extensômetro com curso mínimo de 10 mm, graduado em 0,001;

h) - Prensa para determinação do índice de suporte Califórnia composta de:

- 1) - Quadro formado por base e travessa com quatro tirantes;
- 2) - Macaco de engrenagem, de operação manual por movimento giratório de uma manivela, acompanhado de um prato reforçado ajustável ao macaco, com 24 cm de diâmetro, para suportar o molde;
- 3) - Conjunto dinamométrico com capacidade para 4000 kg, sensível a 2,5 kg, com dispositivo para se fixar ao entalhe da travessa; extensômetro graduado em 0,001 mm para medir encurtamento diametral; pistão de penetração com 4,96 cm de diâmetro e com uma altura de cerca de 19 cm, variável conforme as condições do ensaio; e extensômetro graduado em 0,01 mm com curso maior que 12,7 mm.
 - i) - Extrator de amostras do molde cilíndrico;
 - j) - Balde com capacidade de cerca de 20 litros;
 - l) - Papel de filtro circular com cerca de 15 cm de diâmetro;
 - m) - Balança com capacidade de 20 kg, sensível a 5 g.

Método

A 1ª etapa do ensaio consiste em se compactar cinco corpos de prova, cada qual com uma unidade, conforme o método Proctor. O conjunto do molde é fixado na base perfurada, sendo colocado no fundo o disco espaçador, cuja função primordial é de que o solo a ser compactado, ocupe totalmente o molde, por consequência resultando em um espaço para posterior colocação da sobrecarga a ser utilizada na determinação da expansão. Coloca-se o colarinho e o papel de filtro no fundo do molde, sendo este apoiado sobre uma base rígida, de concreto. O material foi compactado em cinco camadas com o soquete, sendo que a energia de compactação utilizada foi a intermediária, ou seja, 26 golpes. Sempre antes de se executar a próxima camada, é importante que se realize a escarificação da camada compactada. Após o término da compactação, retira-se o molde da base perfurada, inverte-o retirando o disco espaçador e pesa-se o molde + solo, determinando-se assim o teor de umidade.

O próximo passo do ensaio é obter-se a curva de expansão. Sobre o corpo de prova dentro do molde cilíndrico, no espaço deixado pelo disco espaçador, é colocado o prato perfurado, e sobre este o disco anelar que é dividido em duas partes com 2,27 kg. Sobre a haste do prato perfurado, é apoiada a haste do relógio comparador fixado no porta

extensômetro, anotando-se a leitura inicial. A seguir coloca-se o corpo de prova imerso por 96 horas, medindo-se a expansão, que pode ser definida como a relação entre o aumento da altura do corpo de prova (expansão) e a sua altura inicial, expresso em porcentagem.

A última parte do ensaio consiste em se medir a resistência à penetração. Com o término do período de imersão, retira-se o corpo de prova e de sobre ele o prato perfurado com a sobrecarga, e deixa-se escorrer por 15 minutos para se retirar a água em excesso. Na sequência, recoloca-se a sobrecarga e o transfere para a prensa para que o mesmo seja rompido através da penetração do pistão a uma velocidade de 1,27 mm/min. São anotadas as leituras para as seguintes penetrações: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,81; 5,08; 7,62; 10,16 e 12,70, sendo esta última leitura realizada ao tempo de 10 minutos. Para se obter as pressões de penetração, dividi-se a carga pela área de contato do pistão. Com os valores obtidos traça-se uma curva de pressão x penetração.

Após plotados os valores no gráfico, caso haja ponto de inflexão no mesmo, se faz necessário realizar a correção da curva. Geralmente tal correção é necessária, na utilização de equipamentos manuais, ou seja, pela dificuldade de se manter uma velocidade constante.

O valor do ISC é expresso em porcentagem, e é relacionado à pressão padrão obtida no ensaio penetrométrico com a brita correspondente às penetrações de 0,1" (2,54mm) e 0,2" (5,08mm), e apresenta CBR = 100%.

$$\text{ISC} = (\text{Pressão calculada (lida) ou pressão corrigida} / \text{Pressão Padrão}) \times 100$$

Tabela 3.17 – Padronização de pressões para ensaio do ISC

PRESSÕES PADRÃO PARA O ENSAIO DE ISC			
Tempo em Minutos	Penetração		Pressão Padrão Kg/cm ²
	mm	pol	
0,5	0,63	0,025	-
1,0	1,27	0,050	-
1,5	1,90	0,075	-
2,0	2,54	0,100	70
3,0	3,81	0,150	-
4,0	5,08	0,200	105
6,0	7,62	0,300	132
8,0	10,16	0,400	161
10,0	12,70	0,500	182

Fonte: DNER (1994)

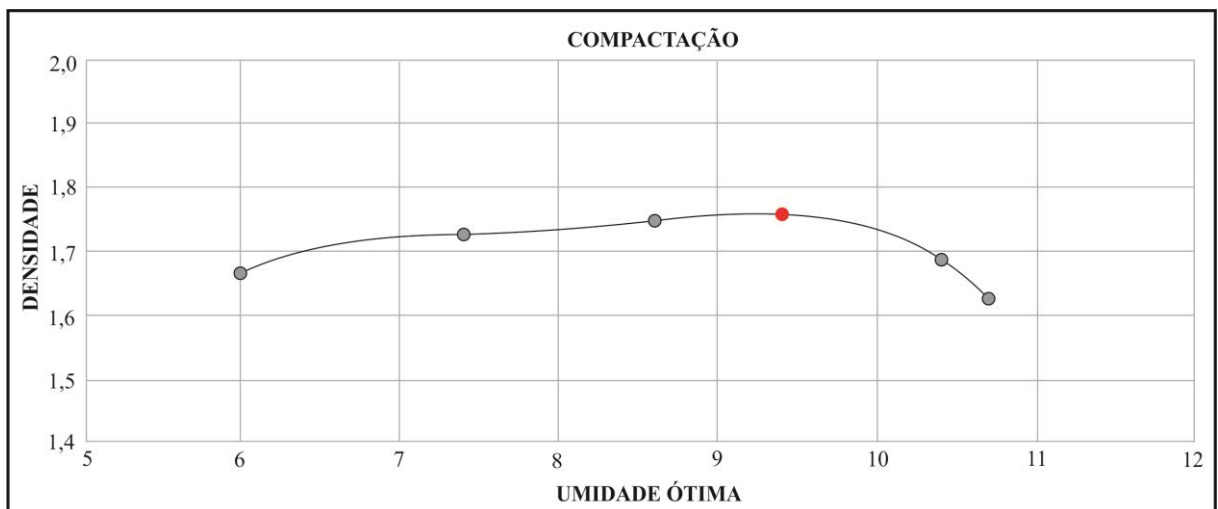
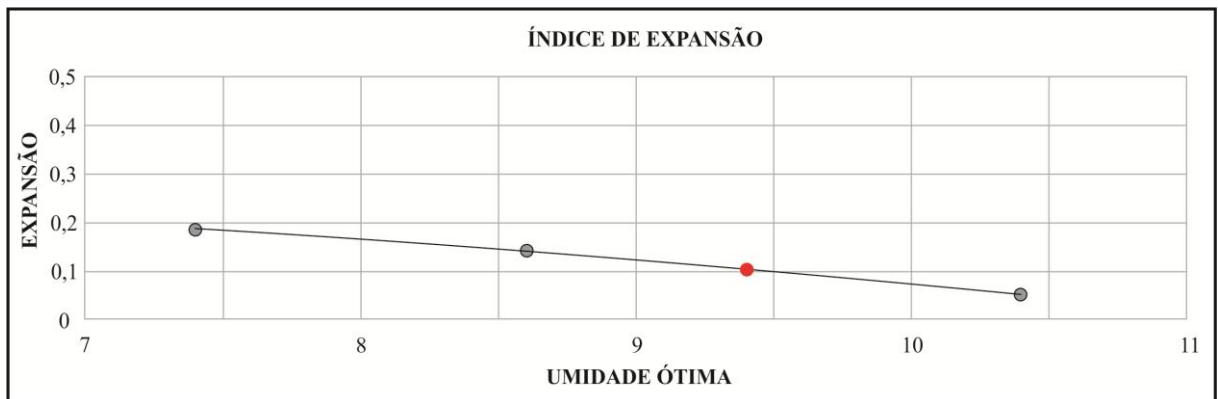
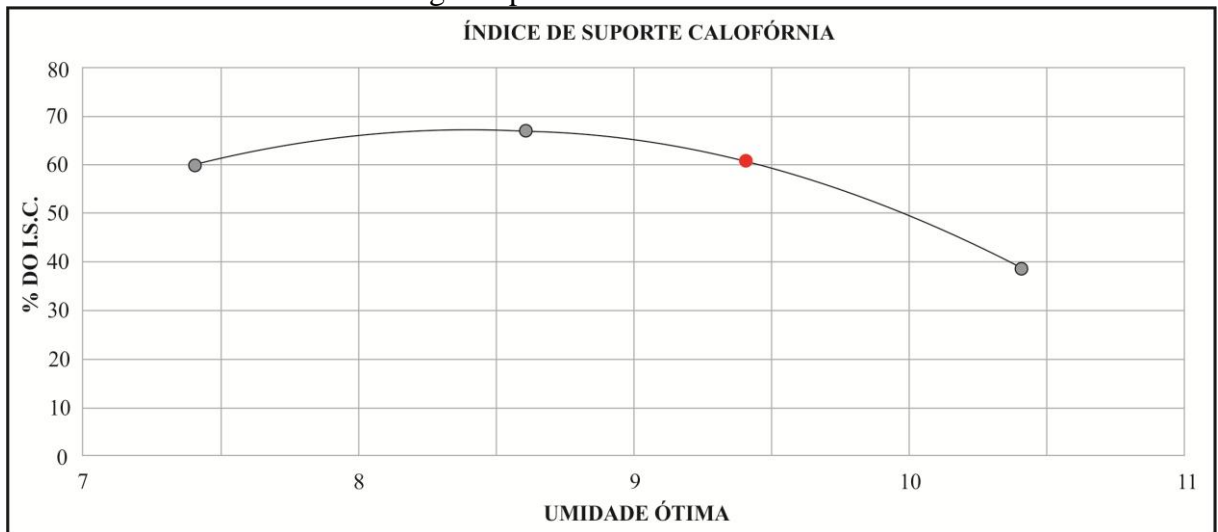
Norma

ME 049/94 (DNER, 1994) e NBR 9895 (ABNT, 1987).

Tabela 3.18a / b / c / d / e – Índice de suporte Califórnia RAP/RCD/CAL

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA MATERIAL 70% RAP / 29% RCD / 1% CAL HIDRATADA COMPACTAÇÃO - ENERGIA INTERMEDIÁRIA										
Cilindro nº	2		9		7		8		4	
Água Adicionada	300		400		500		600		700	
Cilindro + Solo Úmido (g)	9.260		9.650		9.753		9.389		9.310	
Peso do Cilindro (g)	5.591		5.794		5.800		5.530		5.549	
Peso do Solo Úmido (g)	3.669		3.856		3.953		3.859		3.761	
Volume do Cilindro (cm³)	2.074		2.078		2.082		2.073		2.092	
Dens. Apar. Úmida (g/cm³)	1,769		1,856		1,899		1,862		1,798	
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE										
Cápsula nº	4		24		6		12		5	
Cápsula + Solo Úmido (g)	252,10		271,90		272,10		278,30		260,10	
Cilindro + Solo Seco (g)	242,00		258,10		256,70		258,90		242,10	
Peso da Água (g)	10,10		13,80		15,40		19,40		18,00	
Peso da Cápsula (g)	72,70		72,10		78,30		71,90		73,30	
Peso do Solo Seco (g)	169,30		186,00		178,40		187,00		168,80	
Teor de Umidade (%)	6,00		7,40		8,60		10,40		10,70	
Umidade Adotada (%)	6,00		7,40		8,60		10,40		10,70	
Dens. Apar. Seca (g/cm³)	1,669		1,728		1,748		1,686		1,624	
EXPANSÃO										
Altura do CP	114,3	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão	
Data	Hora	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)	
14/09/2012	00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	
15/09/2012	24:00							-	-	
16/09/2012	48:00							-	-	
17/09/2012	72:00							-	-	
18/09/2012	96:00	0,22	0,2	0,18	0,2	0,10	0,1	-	-	
PENETRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA										
Anel Dinamométrico nº				Constante do Anel				99,23		
Tempo min	Penetração (0,01 mm)		Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)		
0,5	0,64		10	0,51	35	1,80	17	0,87		
1	1,27		32	1,64	53	2,72	31	1,59		
1,5	1,91		51	2,62	66	3,39	42	2,16		
2	2,54		70	3,60	89	4,57	52	2,67		
3	3,81		91	4,67	108	5,55	62	3,18		
4	5,08		119	6,11	128	6,57	78	4,01		
6	7,62		132	6,78	140	7,19	92	4,73		
8	10,16		-	-	-	-	-	-		
10	12,70		-	-	-	-	-	-		
Índice Suporte Califórnia			Carga Corrigida	ISC (%)	Carga Corrigida	ISC (%)	Carga Corrigida	ISC (%)		
I.S.C. 0,1"			3,89	56,4	4,63	67,2	2,67	38,7		
I.S.C. 0,2"			6,20	59,9	6,59	63,7	4,01	38,7		
RESUMO										
DENS. SECA MÁX. = 1,757		UMID. ÓTIMA (%) = 9,4			I.S.C. = 60,3			EXPANSÃO = 0,1		

Laboratorista Eder Monteiro / Eng. Responsável Valmir Bonfim



Figuras 3.14a / b / c – Ensaio de I.S.C. RAP / RCD / CAL
Fonte: FREMIX (2012)

Tabela 3.19a / b / c / d / e – Índice de suporte Califórnia RCD

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA MATERIAL RCD 100% COMPACTAÇÃO - ENERGIA NORMAL / INTERMEDIÁRIA									
Cilindro nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Água Adicionada	300	390	480	570	660				
Cilindro + Solo Úmido (g)	9.550	9.750	9.921	9.885	9.867				
Peso do Cilindro (g)	5.664	5.664	5.664	5.664	5.664				
Peso do Solo Úmido (g)	3.886	4.086	4.257	4.221	4.203				
Volume do Cilindro (cm³)	2.079	2.079	2.079	2.079	2.079				
Dens. Apar. Úmida (g/cm³)	1,869	1,965	2,048	2,030	2,022				

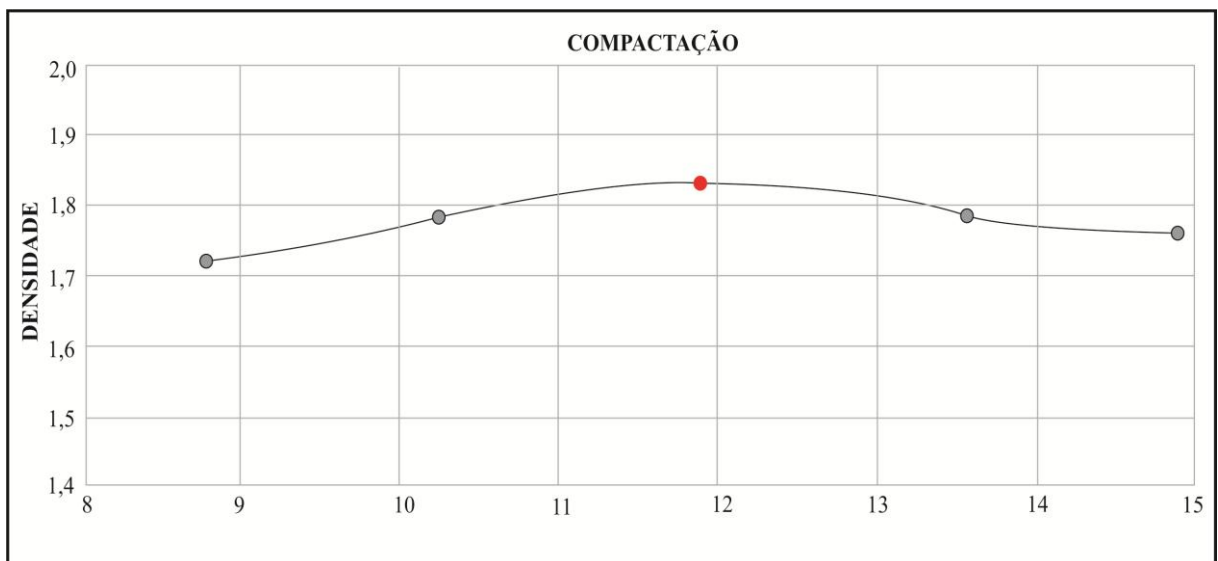
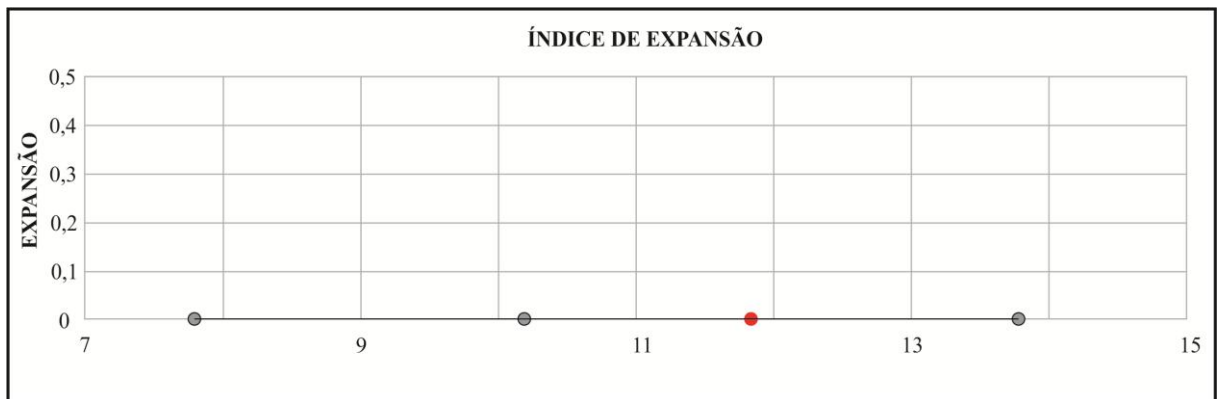
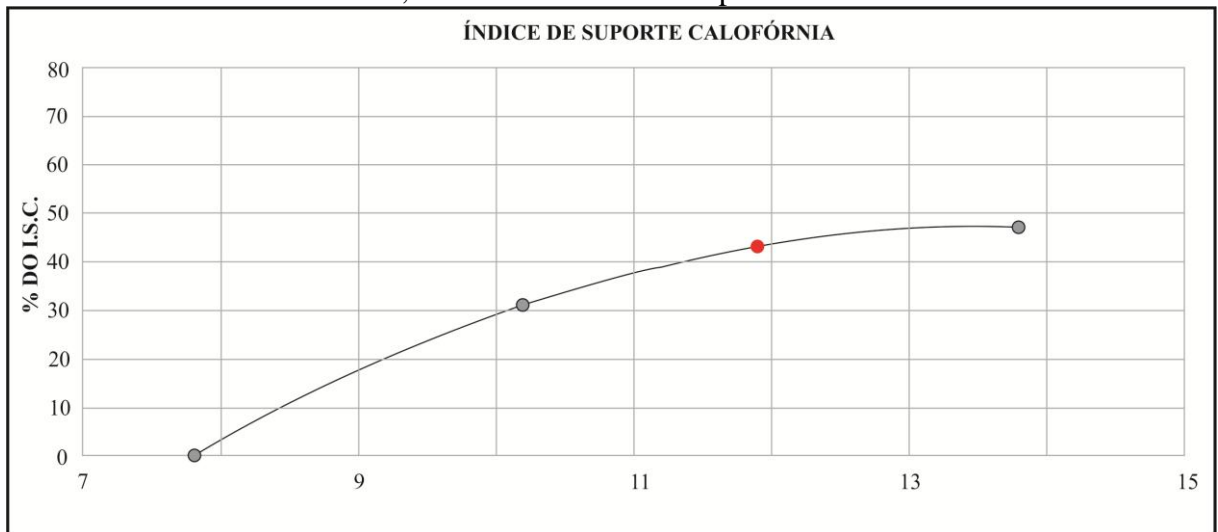
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE									
Cápsula nº	2	10	9	7	8				
Cápsula + Solo Úmido (g)	715,10	552,80	603,80	586,60	591,4				
Cilindro + Solo Seco (g)	672,10	506,20	454,30	521,80	520,40				
Peso da Água (g)	43,00	46,60	58,50	64,80	71,00				
Peso da Cápsula (g)	76,10	52,10	52,30	44,00	45,40				
Peso do Solo Seco (g)	496,00	454,10	493,00	477,80	475,00				
Teor de Umidade (%)	8,70	10,30	11,90	13,60	14,90				
Umidade Adotada (%)	10,40	12,00	13,60	15,20	16,80				
Dens. Apar. Seca (g/cm³)	1,720	1,782	1,830	1,788	1,759				

EXPANSÃO									
Altura do CP	114,3	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão	Leitura	Expansão
Data	Hora	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)	(0,01 mm)	(%)
13/04/2013	00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
14/04/2013	24:00							-	-
15/04/2013	48:00							-	-
16/04/2013	72:00							-	-
17/04/2013	96:00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

PENETRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA									
		Constante do Anel				1			
Tempo min	Penetração (0,01 mm)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)	Leitura (0,001 mm)	Pressão (Mpa)
0,5	0,64	-	-	49	4,80	91	8,92		
1	1,27	-	-	120	11,76	186	18,23		
1,5	1,91	-	-	210	20,58	273	26,76		
2	2,54	-	-	300	29,41	392	38,43		
3	3,81	-	-	457	44,80	680	66,66		
4	5,08	-	-	618	60,58	947	92,82		
6	7,62	-	-	632	61,69	1325	129,90		
8	10,16	-	-	-	-	1763	172,84		
10	12,70	-	-	-	-	2105	206,37		
Índice Suporte Califórnia		Carga Corrigida	ISC (%)	Carga Corrigida	ISC (%)	Carga Corrigida	ISC (%)		
I.S.C. 0,1"		-	-	0,00	22,2	0,00	29,0		
I.S.C. 0,2"		-	-	0,00	30,5	0,00	46,7		

RESUMO			
DENS. SECA MÁX. = 1,830	UMID. ÓTIMA (%) = 11,9	I.S.C. = 42,5	EXPANSÃO = 0,0

Laboratorista: André L. Martin, Ronaldo A. Costa / Responsável Prof. Mestre Josué A. Roso



Figuras 3.15a / b / c – Ensaio de I.S.C. RCD
Local: Laboratório de Solos, FATEC (2013)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização, composição granulométrica, compactação, umidade ótima determinação do teor de espuma de asfalto, resistência à compressão diametral e índice de suporte Califórnia, a que foram submetidos os materiais estudados nesta pesquisa.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

A caracterização física dos agregados estudados neste trabalho visa adequar o agregado de RCD e o agregado de RAP às faixas granulométricas pré-estabelecidas ao uso na pavimentação como camadas granulares de base e sub-base, as faixas granulométricas devem atender as normas estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP).

É prevista para a obtenção da faixa granulométrica ideal a adição de materiais finos (*filler*), ou seja, materiais passantes na peneira 0,420 mm, como pó de pedra, cal hidratada, cimento Portland e pó de calcário. Sendo que sua proporção deve ser preferencialmente de 1% não podendo exceder a 2% do total do material.

Também esta prevista a adição de matérias granulares graúdos, ou seja, materiais retidos na peneira 4,8 mm, como brita graduada (BGS) para composição de material grosso desde que a porcentagem não exceda 30% do total do material composto.

Os materiais estudados foram compostos da seguinte forma e distribuídos em quatro grupos com as composições descritas a seguir: RAP / RCD / Cal Hidrata; RAP / BGS / Cimento Portland; RCD e RCD / Cimento Portland, todos os quatro grupos estudados atenderam as faixas granulométricas dentro de suas tolerâncias. Porém os materiais se mostram críticos nos extremos das curvas justamente na faixa dos agregados graúdos e finos onde foram adicionados o agregado de RCD britado em granulometria grauda e a brita graduada retida na peneira 4,8 mm. Já para compor o material de enchimento *filler*, foi utilizado cimento portland e cal hidratada.

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

4.3.1 Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de Proctor tem como finalidade estabelecer a densidade máxima de compactação de um material em função da umidade ótima, foram estudados três compostos de materiais reciclados sendo assim divididos:

70% RAP / 29% RCD / 1% Cal Hidratada, os resultados da compactação deste material apresentaram uma densidade máxima de 1,75 com uma umidade ótima de 8,4% a energia de compactação utilizada foi a intermediária, a curva de compactação em formato de sino e a densidade máxima de compactação aconteceram no ramo seco o que indica as mesmas características do agregado natural o que difere é a umidade ótima acima dos ensaios realizados com um único material granular. Esse fato já era esperado por se tratar de um composto heterogêneo e algumas características químicas presentes no material como argamassas e materiais cimentícios tendem a absorver uma quantidade maior de água.

Já o segundo material estudado continha a seguinte composição 70% RAP / 29% BGS / 1% Cimento Portland, este composto apresentou uma densidade de 1,98 com sua umidade ótima 7,6% a energia de compactação utilizada foi a modificada, o resultado apresentado mostra uma curva em formato parabólico e uma umidade inferior se comparado ao ensaio anterior à mudança característica na alteração da umidade relativamente menor se deu em função da maior energia de compactação porém a densidade máxima ocorreu no início do ramo úmido do material.

Por fim o terceiro ensaio mostra o RCD britado em diversas faixas granulométricas, sendo composto de 99% RCD / 1% Cimento Portland, material obtido em britadores moveis com ajuste granulométrico o cimento adicionado à mistura funciona como material fino ou de enchimento (*filler*), os resultados apresentados indicam uma densidade máxima de 1,83 a uma umidade ótima de 11,9% com energia de compactação modificada, novamente temos nesse composto a curva em formato de sino característica de materiais granulares porém sua umidade foi quase o dobro da encontrada no agregado natural de granito BGS, por exemplo, o fator que contribuiu para uma maior absorção de água se deve novamente as características químicas dos materiais que compõe o RCD a compactação máxima foi próxima ao centro entre o ramo seco e úmido do material.

4.3.2 Ensaio de compactação Marshall

O ensaio de compactação Marshall tem por finalidade estabelecer o teor ideal de betume a ser adicionado à mistura em função de sua densidade máxima as normas DNER ME 043/95 Misturas betuminosas a quente – Método Marshall, e PMSP ETS 02/2009 Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto, estabelecem para este ensaio teores aplicados de espuma de asfalto entre 2% e 4% como níveis mínimos e máximos respectivamente, para este ensaio foram utilizados os mesmos materiais usados no ensaio de Proctor.

Os resultados obtidos no ensaio serão descritos a seguir para a mistura 70% RAP / 29% RCD / 1% Cal, a densidade máxima atingida foi 2,206 com uma adição de espuma de asfalto CAP 50-70 de 2,5%.

Para o segundo composto estudado contendo 70% RAP / 29% BGS / 1% Cimento, a densidade máxima alcançada foi 2,028 também com um teor de espuma de 2,5% o CAP utilizado também foi o 50-70.

Por fim o terceiro material submetido ao teste foi composto por 99% RCD / 1% Cimento, a densidade máxima alcançada foi de 2,185 com uma adição de espuma de 3,2% da massa total do material.

Neste ensaio todos os materiais estudados atenderam as normas que estabelecem os limites mínimos e máximos de espuma de asfalto na mistura em relação a sua densidade máxima de compactação.

4.4 ESPUMA DE ASFALTO

Espuma de asfalto é a mistura de asfalto aquecido a uma temperatura aproximada de 180°C, com água a temperatura ambiente.

A obtenção da espuma de asfalto se processa através do aquecimento do ligante asfáltico sob determinadas condições de pressão e temperatura promovendo-se então seu encontro com água pressurizada à temperatura ambiente, água então se transforma em vapor que é envolvido pelo ligante muito mais denso causando uma expansão no seu volume de até 30 vezes seu volume inicial. (FREMIX, 2012)

A figura 4.1 mostra o esquema da câmara de expansão durante o processo da obtenção da espuma de asfalto.

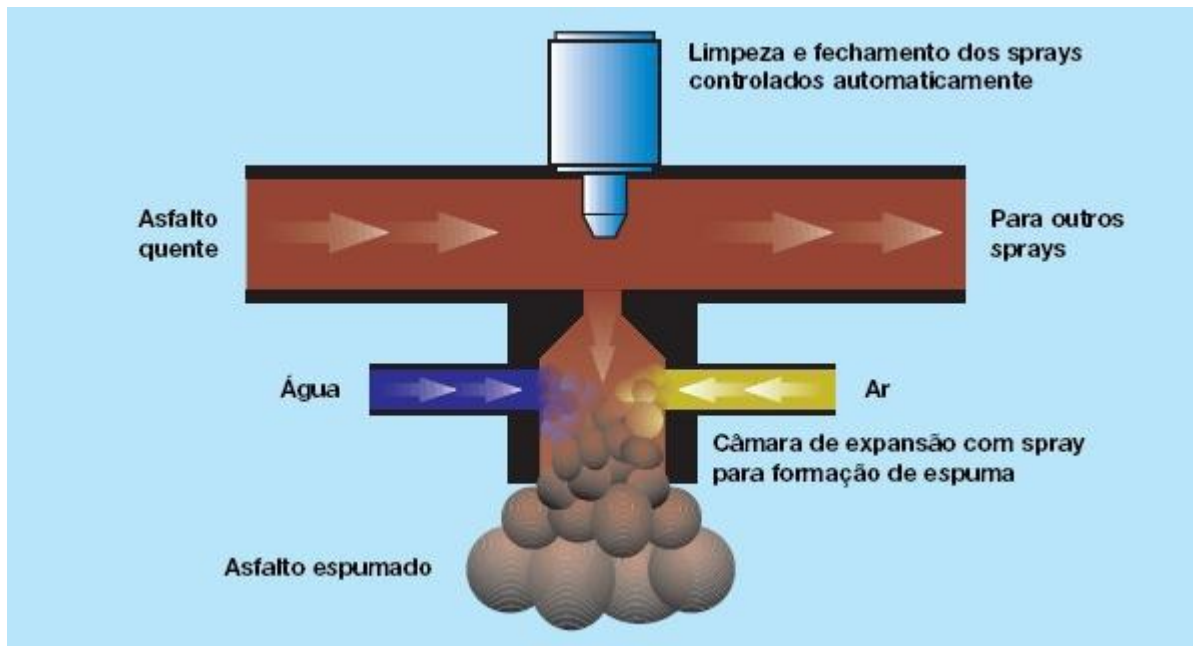


Figura 4.1 – Câmara de expansão onde é produzida a espuma de asfalto
Fonte: FREMIX (2012)

A taxa de expansão é a relação entre o volume máximo do CAP em estado de espuma e o volume do material final após o retorno ao seu estado natural. Quanto maior a expansão mais partículas o CAP consegue envolver tornando assim a distribuição do ligante muito mais eficaz por todo o material.

Meia vida é o tempo em segundos necessário para uma espuma regredir do seu volume máximo até a metade desse volume as normas determinam que este tempo não deva ser inferior a 5seg, pois caso isto ocorra haverá a formação de grumos de ligante aumentando o volume de vazios no material, causando a consequente diminuição da compactação máxima desejada.

Outros fatores que podem influenciar as propriedades da espuma de asfalto são: temperatura do asfalto, quantidade de água adicionada na obtenção da espuma, pressão dos injetores e na câmara de expansão e presença de agentes anti espumantes como derivados de silicone.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

4.5.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência a tração de camadas de pavimento flexível, o material estudado neste ensaio visa determinar se o composto escolhido para determinada camada de pavimento resistirá aos esforços de tração a que são submetidos ao longo de sua vida útil.

Foram utilizados para este ensaio os mesmos materiais utilizados nos testes anteriores para o primeiro composto 70% RAP / 29% RCD / 1% Cal hidratada, com adição de 2,5% da massa total da mistura de asfalto espumado. Dados do ensaio: material passante na peneira nº200 5,1%, umidade ótima 8,4%, adição do teor de espuma 0,5%, água adicionada na espumação 2,0%, expansão da espuma 28 vezes, meia vida 12seg, nº de golpes por face 75, massa da amostra 10kg e água acrescentada 520ml.

Resultados do ensaio: teor mínimo de espuma admissível 2,3%, teor ótimo recomendável 2,6%, teor Máximo admissível 2,9%, tração média amostra seca 430kPa e tração média úmida 213kPa.

Para o segundo composto ensaiado os materiais e porcentagens utilizados foram 70% RAP / 29% BGS / 1% Cimento Portland, com adição de 2,5% da massa total da mistura de asfalto espumado. Dados do ensaio: material passante na peneira nº200 6,5%, umidade ótima 7,6%, adição do teor de espuma 0,5%, água adicionada na espumação 2,0%, expansão da espuma 24 vezes, meia vida 12seg, nº de golpes por face 75, massa da amostra 10kg e água acrescentada 560ml.

Resultados do ensaio: teor mínimo de espuma admissível 2,2%, teor ótimo recomendável 2,5%, teor Máximo admissível 2,8%, tração média amostra seca 362kPa e tração média amostra úmida 278kPa.

Para o terceiro composto ensaiado os materiais e porcentagens utilizados foram 99% RCD / 1% Cimento Portland, com adição de 3,4% da massa total da mistura de asfalto espumado. Dados do ensaio: material passante na peneira nº200 8,8%, umidade ótima 11,9%, adição do teor de espuma 0,5%, água adicionada na espumação 2,0%, expansão da espuma 26 vezes, meia vida 12seg, nº de golpes por face 75, massa da amostra 10kg e água acrescentada 600ml.

Resultados do ensaio: teor mínimo de espuma admissível 3,1%, teor ótimo recomendável 3,4%, teor Máximo admissível 3,7%, tração média amostra seca 324kPa e tração media amostra úmida 251kPa.

Os resultados apresentados atendem a norma do DNIT ME 136/2010 Determinação da resistência à tração por compressão diametral, que indicam como valores mínimos tração indireta úmida de 0,20 mPa ou 200kPa e máxima 0,28mPa ou 280kPa. O que se percebe nos ensaios realizados é que quanto maior a quantidade de finos passantes na peneira 200 maior também a necessidade de espuma de asfalto no material como o RCD no terceiro composto testado apresentou uma maior quantidade de materiais finos seu teor adicionado de espuma se encontra próximo ao limite Máximo estabelecido de 4%.

4.5.2 Ensaio do índice de suporte Califórnia (ISC)

O ensaio do índice de suporte Califórnia tem como objetivo determinar o índice de suporte para camadas de base, sub-base e reforço do subleito, este ensaio não é exigido para materiais estabilizados com espuma de asfalto, mas o mesmo oferece parâmetros se comparados a camadas granulares.

Segundo a especificação técnica da prefeitura de São Paulo ETS – 001/2003 Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil, atendem as especificações para camadas de reforço do subleito se o ISC for igual ou maior que 12,0% com expansão menor ou igual a 1,0%. Para camadas de sub-base o ISC deve ser igual ou superior a 20,0% com uma expansão menor ou igual a 1,0% e compactação intermediária. E para camadas de bases mistas é exigido um ISC igual ou superior a 60% com expansão de 0,5% com compactação intermediária.

Os resultados do ensaio apresentaram um índice para o composto 70% RAP / 29% RCD / 1% Cal hidratada um ISC de 60,3% expansão de 0,1% na energia de compactação intermediária. Já o material RCD sem adição de filler (material fino) ou estabilizado granulometricamente apresentou um ISC de 42,5% com uma expansão nula.

Portanto o material se granulometricamente estabilizado está habilitado a atuar como camada de base, sub-base e reforço do subleito, atendendo as especificações exigidas nas normas vigentes.

As figuras da imagem 4.2 mostram a execução das etapas do ensaio realizado no laboratório de solos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – SP).



Figura 4.2 – Ensaio de I.S.C. RCD
Fonte: Bienemann (2013)

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pesquisa teve como objetivo estudar a viabilidade do uso do agregado de resíduo de construção e demolição (RCD) e do agregado de resíduo asfáltico de petróleo (RAP), através da análise de resultados de ensaios laboratoriais, visita às obras em execução na Rodovia Ayrton Senna Km 13 leste com a utilização destes materiais, e também visitas aos trechos experimentais na Av. Sapopemba entre a Av. dos Sertanistas e R Bento Guelfi em São Paulo – SP e na Rodovia Ayrton Senna Km 15 pista oeste em Guarulhos – SP. O material estudado é proveniente da usina de reciclagem de resíduos da construção civil Julio de Mesquita na Barra Funda São Paulo - SP

É importante ressaltar que as conclusões apresentadas neste capítulo usam como base os materiais e condições restritas ao universo pesquisado.



Figuras 5.1 / 5.2 – Rod. Ayrton Senna Km 15 Guarulhos - SP



Figuras 5.3 / 5.4 – Av. Sapopemba São Paulo - SP
Fonte: Própria (2013)

5.2 CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO

O agregado reciclado, em comparação com o agregado natural apresenta maior absorção de água e menor densidade aparente. Acredita-se que estas variações sejam decorrentes do fato de o agregado reciclado apresentar uma parcela expressiva de cimento, argamassa ou betume inertes aderida a seus grãos.

Já no tocante a resistência o material atende aos parâmetros exigidos para sua utilização como camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, um fator que chama a atenção é o fato de os materiais retirados das pistas de prova em estudo apresentaram um aumento considerável em sua coesão e resistência acredita-se que este fato se deva as propriedades químicas contidas nos compostos que reagindo com a umidade proveniente do solo ao longo de um maior tempo de cura apresentem características de auto cimentação. Esse fenômeno pode ser comparado à estabilização química de um agregado natural com uma pequena porcentagem de cimento ou cal hidratada.

Vale resaltar que as pistas monitoradas durante a execução deste trabalho estão completando 36 meses na Av. Sapopemba, e 12 meses na Rod. Ayrton Senna, o material se mantém íntegro não demonstra sinais de fadiga ou deformações em sua estrutura. Como demonstra a figura 5.5 dos corpos de prova retirados das pistas em estudo.



Figura 5.5 – Corpos de prova extraídos da Rod Ayrton Senna - SP
Fonte: Própria (2013)

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa indicam que a utilização dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) e o agregado reciclado de resíduo asfáltico de petróleo (RAP) podem ser uma interessante alternativa ao emprego de agregados naturais na construção de camadas de base e sub-base de pavimentos. Por fim pode-se destacar que essa forma de reciclagem pode estender a vida útil dos aterros e uma preservação das jazidas de agregados naturais mitigando os impactos ambientais e promovendo o desenvolvimento sustentável.

5.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Pesquisar materiais reciclados provenientes de outras usinas;
- Avaliar os fatores químicos que promovem a auto cimentação do agregado de RCD;
- Monitorar o desempenho dos trechos experimentais através ensaios;
- Realizar avaliações econômicas mais aprofundadas sobre o emprego do RCD e RAP.
- Pesquisar a viabilidade da utilização destes materiais no caso da necessidade de troca de solo para obras de reparo em redes de água, esgoto, gás e águas pluviais.

REFERÊNCIAS

- ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000, São Paulo. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Departamento de engenharia de construção civil. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.
- ANGULO, S. C. *et al.* Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. *In: Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil*, 2003, São Paulo. **Anais:...** IBRACON/IPEN. 2003. CD-ROM.
- ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. 2005. 167 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
- _____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. 21p. Rio de Janeiro, 2004c.
- _____. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.
- _____. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. 2004e.
- _____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. 2004f.
- _____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004g.
- _____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004h.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 560 p. 2007.
- BIDONE, F. R. A. (Cord.). **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: Eliminação e valorização**. 1. Ed. São Carlos: RiMa / ABES, 2001
- BIENEMANN, M. **Ensaio de índice de suporte Califórnia**. 13 Fotografias cor. Arquivo pessoal. São Paulo. 2013.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29., Cuiabá, 1995. **Anais:...** ABPv, 1995. p. 409-436.

BONFIM, V. Pavimentação sustentável: reaproveitamento do resíduo da construção civil e de material fresado com espuma de asfalto. In: Reunião de pavimentação urbana, 18., 2012, São Luís. **Anais:...**São Luís. 64 p. Disponível em: <<http://www.rpu.org.br/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20Sustent%C3%A1vel%20-%20Valmir%20Bonfim.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2012.

BONFIM, V. **Recuperação de Pavimentos Rodoviários para tráfego entre moderado e pesado**. 2012. Guarulhos - São Paulo. Não Publicado.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. p. 190-227.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. 2005. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. 2005.

CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção** – Projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

CATAPRETA, C. A.; PEREIRA, J. C.; ALMEIDA, A. H. Avaliação do desempenho das usinas de reciclagem de resíduos de construção civil de Belo Horizonte. In: Congresso Interamericano AIDIS, 31., 2008, Santiago. **Anais:...** Santiago: AIDIS, 2008.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 307**, de 05 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 10 out. 2012.

_____. **Resolução nº 001**. Brasília, 1986.

COSTA, R. A.; MARTIN, A. L. **Avenida Brigadeiro Faria Lima**. 1 Fotografia cor. Arquivo Pessoal. São Paulo. 2012.

_____. **Etapas de execução de obras de pavimentação viária com utilização de RAP, na Rodovia Ayrton Senna**. 14 Fotografias cor. Arquivo Pessoal. São Paulo. 2012.

_____. **Avenida Sapopemba**. 2 Fotografias cor. Arquivo Pessoal. São Paulo. 2013.

_____. **Rodovia Ayrton Senna**. 3 Fotografias cor. Arquivo Pessoal. São Paulo. 2013.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME – 049/94: Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **ME – 035/95: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **ME – 043/95: Misturas betuminosas a quente – Método Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME – 136/2010: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ES – 405/2012: Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto.** Rio de Janeiro, 1995.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimentos de baixo custo.** 2004. 204 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

EC - *European Commission*. **Diretrizes para materiais de construção reciclados a partir de resíduos de engenharia estrutural**, Viena, 2000. Disponível em <ec.europa.eu/enterprise/tris/pisa/cfcontent.cfm?vFile=120070653PT.DOC>. Acesso em: 31 mai. 2013.

ENERGIA AMBIENTAL S.A. Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes. Biogas Energia Ambiental S.A. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.oeco.com.br/reportagens/2170-oeco25960>>. Acesso em: 29 set. 2012.

EPA - *Environmental Protection Agency – Municipal and industrial solid waste division – Office of solid waste. United States*. **Report nº EPA530-R-98-010 – Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States.** Estados Unidos: TechLaw, Inc. 1998 Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/02/01095.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2012.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. 1999

FHWA – *FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, United States*. 2000. **Report nº FHWA-PL-00-025-Recycled materials in European highway environments: uses, technologies and policies.** Disponível em: <<http://www.rmrc.unh.edu/resources/pandd/rcareport/rcareport.pdf>>. Acesso em: 21 de out. 2012.

FIFA – *Fédération Internationale de Football Association*. 2010. **Belo Horizonte se especializa na arte de reciclar.** Utilização de RCD na reforma do estádio Mineirão. Disponível em: <<http://pt.fifa.com/worldcup/news/newsid=1319563/index.html>>. Acesso em: 20 nov. 2012

FREMIX ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. **Usina de reciclagem Julio de Mesquita.** São Paulo. 2012. Disponível em: <<http://fremix.dominiotemporario.com/reciclagem/sub-menu-de-reciclagem-2>>. Acesso em: 06 out. 2012.

FREMIX ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. **Reciclagem a frio em usina móvel KMA de material fresado com espuma de asfalto e resíduo da construção civil.** 11 p. São Paulo, 2012.

GAZETA MARINGAENSE. **Relembrando** 1 fotografia. Maringá, 2011. Disponível em: <http://gazetamaringaense.blogspot.com.br/2011/08/relembrando_06.html>. Acesso em: 29 mai. 2013.

GONÇALVES, M. A. B. *et al.* **Uma forma racional de tratar os resíduos sólidos gerados nos canteiros de obra.** Programa de Entulho Limpo (1ª etapa) – Coleta Seletiva, Brasília, 2000. Disponível em: <http://www.cepam.sp.gov.br/arquivos/sisnama/meio_ambiente_em_temas/sinduscon1_ma.pdf> . Acesso em: 31 maio. 2013.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil dos municípios brasileiros: Gestão pública 2001 / IBGE** Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 245 p.

_____. **Censo demográfico**, [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 20 set. 2012.

JOHN, Vanderlei M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

LEVY, S. P. **reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos**. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1997.

LIMA, F. P. **Reciclagem de resíduos sólidos da construção e demolição no município de Goiânia – Benefícios ambientais**. 2009. 18 p. Pesquisa – Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás, Goiás.

MCA IMPRENSA. **Resíduos sólidos da construção civil podem ser reciclados no próprio canteiro de obra**. 1 Fotografia cor. [S.l.], maio 2008. Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/artigos/economia-e-financas/residuos-solidos-da-construcao-civil-podem-ser-reciclados-no-proprio-canteiro-de-obra/23175/>>. Acesso em: 21 mar. 2013.

MOREIRA, J. F.; DIAS, J. F.; REZENDE, M. E. Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG. **Vias Gerais**, Minas Gerais, fev. 2007. Disponível em: <<http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais6/9.pdf>>. Acesso em: 31 maios 2013.

MOTTA, R. S. *et al.* Aplicação de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de pavimentos. *In*: Congresso de pesquisa e ensino em transportes, 18., 2004, Florianópolis. **Anais:...** Florianópolis. Disponível em: <http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet_xviii Congrpesqens/apresentacao/index.html>. Acesso em: 22 de abr. 2012.

MURAKAMI, S. *et al.* **Sustainable building and policy design**. Tokio: *Institute of International Harmonization for Building and Housing*, 2002.

NETO, José Costa Marques. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. 1. ed. São Carlos: RiMa. 2004. 164 p.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. 2004. 276 p. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 167 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. 2007.

PERA, J. *State of the art Report t- use of waste materials in construction in western Europe*. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. Anais: São Paulo. Departamento de Engenharia e Construção Civil, Universidade de São Paulo, 1996. p. 1-20.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. 1986. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 209 p Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO, T. P. **Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável**. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001. Projeto entulho bom. p. 78-113.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do Sinduscon-SP**. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2005. 48 p.

PMBH – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE. **Usinas de reciclagem de RCD**. Minas Gerais, 2012. Disponível em: <<http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/contents.do?evento=conteudo&idConteudo=64436&chPlc=64436>>. Acesso em: 06 out. 2012.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS – 001/2003 – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. São Paulo, 2003. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/Especific%C3%A7%C3%B5es%20T%C3%A9cnicas%20de%20Servi%C3%A7o/PMSP_ETS_001_2003%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 01 set. 2012.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Lei Municipal nº 14.015** de 28/06/2005. São Paulo, 2005 Disponível em: <http://www.imprensaoficial.com.br/PortalIO/DO/GatewayPDF.aspx?link=/2005/diario%20oficial%20cidade%20de%20sao%20paulo/junho/29/pag_0002_829LPEC4EJ81NeFSSA20DKDSFQF.pdf>. Acesso em: 10 out. 2012.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Decreto Municipal nº 48.075** de 28/12/2006. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D%20480750000>. Acesso em: 10 out. 2012.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-002/2009 - Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto**. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/Relat%C3%B3rio%20de%20Apresenta%C3%A7%C3%A3o%202010/relatorio_de_apresentacao_2010%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 01 set. 2012.

PMSP – PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. SÃO PAULO. **Trecho da Avenida Sapopemba recebe pavimentação ecológica**. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/portal/a_cidade/noticias/index.php?p=48279>. Acesso em: 25 out. 2012.

POON, C. S.; QIAO, X. C; CHAN, D. *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. **Construction and building materials**, Hong Kong, n. 20, p. 578 – 585, 2006. Tradução nossa.

RAO, A.; JHA, K.; MISRA, S. *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. **Resources, conservation and recycling**, Nova Delhi, n. 50, p. 71 – 81, 2007. Tradução nossa.

RIBEIRO, H. C. **Aplicação de resíduos sólidos da construção civil em revestimento asfáltico tipo CBUQ PF-001A/04**. 91 p Monografia. Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2004.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. Coleção Habitare, v.4

ROSO, J. A. **Utilização de resíduo de construção civil e demolição (RCD) na pavimentação**. 2012. 24 p. Trabalho de pesquisa apresentado à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, referente ao primeiro ano de atividades, para atender ao plano de trabalho apresentado ao Departamento de Transportes e Obras de Terra referente ao o triênio de 01/08/2011 à 31/07/2014. São Paulo. No prelo.

SANDLER, K. *Analyzing what's recyclable in C&D debris*. **Biocycle**, Virginia, n. 20, p. 51-54, nov. 2003. Tradução Google tradutor.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 168 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2007.

SCHNEIDER, D. M. *et al.* **Tratamento e Destinação de Lixo na Cidade de São Paulo**. Monografia (Conclusão do curso de Gestão Ambiental) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 1999.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 2003.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI, A. Jr. Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo, **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 21-32, out./dez. 2004. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3571/1977>>. Acesso em: 31 maio 2013.

SILVA, A. L. A. **Aplicação de resíduos sólidos da construção civil em bases e sub-bases de pavimentos**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia, 2004.

SILVEIRA, G. T. R. **Metodologia da caracterização dos resíduos sólidos, como base para uma gestão ambiental. Estudo de caso: Entulhos de construção civil em Campinas – São Paulo**. 1993. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

SUGESTÕES PARA CAÇAPAVA **Criação de uma usina de reciclagem de entulho**. Caçapava, 2011. Disponível em: <<http://beer-rock-fest-cacapava.blogspot.com.br/2011/09/quantidade-de-entulho-gerada-nas.html>>. Acesso em 06 out. 2012.

VÁZQUEZ, E. Introdução. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. Introdução. *In: Projeto Entulho Bom*, 2001, Salvador. **Anais:...** Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2001. p. 22-25.

XAVIER, L. L.; BRITO, L. A.; CAVALCANTE, J. R.; CHERIAF, M. Diagnóstico do resíduo de construção civil da região de Florianópolis e sua potencialização como agregado graúdo para a confecção de novos concretos. *In: ENTAC 2002, Anais:...*Foz do Iguaçu, 2002.

WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. *Aggregates from natural and recycled sources: economic assessments for construction application/materials flow analysis, U.S. Geological survey*, Washington D.C., n. 1176, 131 p.,1998. Disponível em: <<http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1176/c1176.html>>. Acesso em: 16 de jul. 2012.

WIRTGEN GROUP – **Reciclagem na Megacidade**. 4 p. (*press release*) Proteção ambiental em São Paulo. 2012

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 140 p dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 1997.

ZORDAN, S. E. **Fichas Técnicas – Entulho da indústria da construção civil**. São Paulo, maio 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp/artigos1.htm>>. Acesso em: 13 de set. 2012.

_____. **Entulho na indústria da construção**. São Paulo: EP – USP, 2002. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/>>. Acesso em: 04 de ago. 2012.

ANEXO A



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

PMSP/SP ETS – 001/2003 - CAMADAS DE REFORÇO DO SUBLEITO, SUB-BASE E BASE MISTA DE PAVIMENTO COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

INTRODUÇÃO

Esta especificação de serviço define os critérios que orientam a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos com Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil, denominado “Agregado Reciclado”, em obras de pavimentação sob a fiscalização da Prefeitura do Município de São Paulo.

1- DESCRIÇÃO

Os serviços consistem no fornecimento de Agregado Reciclado para pavimentos, com características e restrições estabelecidas nos itens 1.1 e 1.2, além de carga, transporte, descarga, espalhamento e compactação, assim como a mão-de-obra, materiais e equipamentos necessários à execução e ao controle de qualidade da camada de Agregado Reciclado, de conformidade com a especificação apresentada a seguir e detalhes executivos contidos no projeto:

- 1.1 resíduos sólidos da construção civil, comumente chamados de “entulho de obra”, adequados à execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista, são os provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições de obras de construção civil, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rocha, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, etc, devendo ser evitada a presença de solos, madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes;
- 1.2 Agregado Reciclado para pavimento é o material granular proveniente do beneficiamento, por meio de britagem e classificação, de resíduos de construção ou demolição de obras civis, conforme item 1.1, que apresente características técnicas para aproveitamento em obras de pavimentação;
- 1.3 reciclagem é o processo de aproveitamento de resíduos, depois de terem sido submetidos à transformação;
- 1.4 reforço do subleito, sub-base e base mista de Agregado Reciclado para pavimento são camadas de material granular proveniente do beneficiamento através de britagem e classificação de resíduos sólidos da construção civil, conforme item 1.2, cujas técnicas executivas e controle de qualidade estão descritos a seguir;
- 1.5 para a presente especificação a base mista será sempre constituída por duas camadas, uma subjacente, necessariamente de Agregado Reciclado, e outra sobrejacente, de Macadame Betuminoso, Binder ou outro material que assegure as condições de coesão e resiliência do conjunto.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

2- MATERIAIS

Todas as especificações de materiais e normas de ensaio, exceto as explicitadas neste documento, devem satisfazer às especificações preconizadas pela Prefeitura do Município de São Paulo.

Os resíduos sólidos de construção civil que se aplicam à reciclagem, com posterior utilização em obras de pavimentação, devem ser classificados em:

- 2.1 resíduos Sólidos Cerâmicos de Construção Civil: constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) de materiais cerâmicos, tais como peças ou fragmentos de tijolos, telhas, manilhas, blocos, revestimentos e assemelhados, confeccionados com argila e submetidos à queima;
- 2.2 resíduos Sólidos Cimentícios de Construção Civil: constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) de materiais compostos por areias com aglomerantes, argamassas, concretos endurecidos, artefatos ou fragmentos de concreto ou argamassa de cimento, tais como blocos, lajes e lajotas, vigas, colunas e assemelhados, tendo como materiais constitutivos básicos às areias, os agregados pétreos, cimentos e cales;
- 2.3 resíduos Sólidos Mistos de Construção Civil: constituídos predominantemente (acima de 70% em massa) dos materiais descritos nos itens 2.1 e 2.2.

A camada de reforço do subleito, sub-base ou base mista de Agregado Reciclado deverá ser executada com materiais que atendam aos seguintes requisitos:

- a. os agregados utilizados, obtidos a partir da britagem e classificação de resíduos sólidos de construção civil deverão ser constituídos por fragmentos duros, limpos e duráveis, livres de excesso de partículas lamelares ou alongadas, macias ou de fácil desintegração, e de outras substâncias ou contaminações prejudiciais;
- b. o Agregado Reciclado deverá apresentar curva granulométrica contínua e bem graduada, com coeficiente de curvatura compreendido entre 1 e 3 e coeficiente de uniformidade $C_u \geq 10$;
- c. a porcentagem que passa na peneira 0,42mm (nº 40) deverá ficar entre 10 e 30%;
- d. os Agregados Reciclados serão classificados quanto ao tipo de emprego possível na execução de camadas de pavimentos, segundo parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (CBR), obtidos por meio do ensaio PMSP/SP ME-09/92, conforme abaixo discriminado:
 - material para execução de reforço de subleito: $CBR \geq 12\%$, Expansão $\leq 1,0\%$ (energia de compactação normal);
 - material para execução de sub-base: $CBR \geq 20\%$, Expansão $\leq 1,0\%$ (energia de compactação intermediária);
 - material para execução de base mista de pavimento: $CBR \geq 60\%$, Expansão $\leq 0,5\%$ (energia de compactação intermediária); será permitido o uso como material



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

de base mista somente para vias de tráfego com $N \leq 10^5$ repetições do eixo padrão de 80 kN no período de projeto.

- e. no caso de materiais que não atendam às exigências do item anterior, estes poderão ser estabilizados granulométrica ou quimicamente. No caso de adição de cimento e/ou cal hidratada, o material deverá ser submetido ao ensaio de resistência à compressão simples, após 7 dias de cura e apresentar resistência de no mínimo 2,1MPa, em corpos de prova moldados na energia de compactação especificada;
- f. para o agregado graúdo, fração retida na peneira 4,8mm ($n^\circ 4$), a porcentagem de grãos de forma lamelar, obtida nas amostras de ensaios não poderá ser superior a 30% e a determinação da forma lamelar dos grãos será feita conforme a fórmula abaixo:

$$\lambda + 1,25g \geq 6e$$

onde:

- λ – maior dimensão do grão entre dois planos paralelos;
- e – afastamento mínimo entre dois planos paralelos, entre os quais pode ficar contido o grão;
- g – a média das aberturas de duas peneiras de malhas quadradas, entre as quais fica retido o grão;
- g. diâmetro máximo dos grãos: 50mm;
- h. materiais indesejáveis de características distintas: máximo de 3% em massa;
- i. materiais indesejáveis de mesma característica: máximo de 2% em massa;
- j. não serão permitidos materiais indesejáveis nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador.

3- EQUIPAMENTOS

O conjunto de equipamentos deverá ser inspecionado pela Fiscalização, devendo dela receber aprovação, sem o que não será dada a autorização para o início dos serviços. Caso necessário, a Fiscalização poderá exigir vistoria desses equipamentos por engenheiro mecânico ou técnico responsável.

O conjunto de equipamentos básicos para execução da camada de Agregados Reciclados compreende:

- a. pá carregadeira;
- b. caminhão basculante;
- c. caminhão-tanque irrigador;
- d. motoniveladora pesada, com escarificador;
- e. distribuidor de agregados autopropulsionado ou rebocável;
- f. rolo compactador do tipo liso vibratório;
- g. rolo compactador pé de carneiro vibratório;



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

- h. compactador portátil, manual ou mecânico;
- i. grade de discos;
- j. ferramentas manuais diversas;
- k. equipamentos de laboratório para o controle tecnológico de recebimento de camada.

Outros equipamentos, desde que aprovados pela Fiscalização, poderão ser utilizados.

4- EXECUÇÃO

A execução das camadas de pavimento compreende as operações de mistura e pulverização, umedecimento ou secagem dos materiais, realizadas na pista ou em central de mistura, bem como o espalhamento, compactação e acabamento na pista devidamente preparada na largura desejada, nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada.

Se a camada de pavimento exigir uma espessura final superior a 20cm, deverá ser subdividida em camadas parciais. A espessura mínima de qualquer camada de base, sub-base ou reforço de subleito será de 10cm, após a compactação.

4.1 Condições Físicas da Superfície de Apoio da Camada de Agregado Reciclado

- a. a camada sobre a qual será executado o reforço do subleito, a sub-base ou a base mista deverá ter sido executada de acordo com as condições fixadas pela respectiva especificação de serviços da PMSP;
- b. a superfície a receber a camada de reforço do subleito, sub-base ou base mista de Agregado Reciclado deverá estar perfeitamente limpa e conformada devendo ter recebido a prévia aprovação por parte da Fiscalização;
- c. eventuais defeitos existentes deverão ser reparados antes da distribuição da camada de Agregado Reciclado;
- d. caso a execução da camada de Agregado Reciclado não seja efetuada imediatamente após a execução da camada de apoio (camada subjacente) e, de modo especial, quando essa camada de apoio estiver exposta à chuva deverão ser efetuadas as seguintes verificações:
 - o Teor de Umidade deverá situar-se dentro do intervalo de $\pm 3\%$ em relação à umidade ótima obtida no ensaio de compactação em laboratório;
 - o Grau de Compactação deverá atender às exigências indicadas no controle de recebimento da camada executada;
 - as áreas nas quais o Teor de Umidade e o Grau de Compactação não atendam aos limites especificados deverão ser reexecutadas.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

4.2 Transporte do Agregado Reciclado

O Agregado Reciclado será transportado para a pista, protegido com lona, em caminhões basculantes.

4.3 Distribuição do Material

- a. a distribuição do material solto deverá ter uma espessura suficiente para que após a compactação atinja a espessura de projeto;
- b. a distribuição do material, sobre a camada subjacente, será realizada com distribuidor de agregados, capaz de distribuir o Agregado Reciclado em espessura uniforme, sem produzir segregação;
- c. excepcionalmente, e a critério da Fiscalização, a distribuição do Agregado Reciclado poderá ser procedida pela ação de motoniveladora. Nesse caso, o Agregado Reciclado será descarregado dos basculantes em leiras, devendo ser estabelecidos os critérios de trabalho que assegurem a qualidade do serviço;
- d. a espessura de cada camada individual acabada deverá se situar no intervalo de 10cm, no mínimo, a 20cm, no máximo;
- e. é vedada a complementação da espessura da camada, após sua compactação, para obtenção da espessura de projeto;
- f. caso a espessura da camada compactada não atenda a espessura de projeto conforme estabelecido nos critérios de recebimento, a camada deverá ser refeita.

4.4 Compressão

- a. tendo em vista a importância das condições de compactação da camada de Agregado Reciclado, recomenda-se a execução de trechos experimentais, com a finalidade de definir os tipos de equipamentos de compressão e a sequência executiva mais apropriada, objetivando alcançar, de forma mais eficaz, a espessura e o Grau de Compactação especificados para a camada;
- b. a energia de compactação a ser adotada na execução da camada de Agregado Reciclado será:
 - camada de Reforço do Subleito – energia normal;
 - camada de Sub-Base ou Base Mista – energia intermediária.
- c. o Teor de Umidade da mistura, por ocasião da compactação da camada de Agregado Reciclado, deverá estar compreendido no intervalo de $\pm 1,5\%$ em relação à Umidade Ótima obtida no ensaio de compactação executado com a energia especificada;
- d. a compactação da camada de Agregado Reciclado será executada mediante o emprego de rolos compactadores do tipo pé-de-carneiro vibratório e liso-vibratório;
- e. nos trechos em tangente a compactação deverá evoluir partindo dos bordos para o eixo e nas curvas partindo do bordo interno para o bordo externo. Em cada passada o equipamento utilizado deverá recobrir, ao menos, a metade da faixa anteriormente comprimida;
- f. durante a compactação, se necessário, deverá ser promovido o umedecimento da superfície da camada por caminhão-tanque irrigador;



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

- g. as manobras do equipamento de compactação que impliquem em variações direcionais prejudiciais à qualidade dos serviços deverão ocorrer fora da área de compressão;
- h. o Grau de Compactação mínimo exigido para a camada acabada será de 100% em relação à massa específica aparente seca máxima obtida em laboratório, na energia especificada. O número de passadas do compactador será definido em função dos trechos experimentais executados;
- i. em lugares inacessíveis aos equipamentos de compressão, ou onde seu emprego não for recomendável, a compactação requerida será feita por meio de compactadores portáteis manuais ou mecânicos.

4.5 Condições Gerais

São aplicáveis à execução da camada de Agregado Reciclado as seguintes recomendações:

- a. não será permitida a execução dos serviços em dia de chuva;
- b. a camada de Agregado Reciclado deverá, quando necessário, ser drenada através de um lastro sob a sarjeta. Esse lastro deverá estar interligado à caixa receptora das “bocas de lobo” ou drenos laterais à via, a fim de permitir o escoamento da água.

5- CONTROLE

5.1 Controle Tecnológico dos Materiais

Serão procedidos os seguintes ensaios:

- a. ensaio de granulometria com determinação de coeficientes de curvatura e uniformidade a cada 700m², sendo no mínimo três determinações;
- b. ensaio para determinação da massa específica aparente seca, Umidade Ótima e Índice de Suporte Califórnia – CBR e expansão para cada 2000m², sendo no mínimo três determinações;
- c. ensaio para determinação da porcentagem de grãos lamelares segundo o item 2.3(f), sempre que houver variação nas características do agregado utilizado ou a cada 700m².

5.2 Controle de Execução

5.2.1 Controle Tecnológico da Camada Executada:

- a. determinação do teor de umidade na pista pelo método expedito da frigideira ou outro método aceito pela Fiscalização, a cada 700m² de pista, imediatamente antes do início das operações de compactação;
- b. determinação da massa específica aparente seca “*in situ*” (PMSP/SP ME – 12/92) imediatamente após a conclusão das operações de compactação a cada 50m de pista, alternando bordo direito, eixo, bordo esquerdo, sendo no mínimo três determinações.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

5.2.2 Controle Geométrico e de Acabamento

- a. controle de espessura: logo após a execução da camada, serão feitos locação e nivelamento do eixo e dos bordos, a cada 20m, envolvendo, no mínimo, cinco pontos da seção transversal;
- b. controle de acabamento da superfície: as condições de acabamento da superfície serão apreciadas pela Fiscalização, em bases visuais. Especial atenção deverá ser conferida à verificação da presença de segregação superficial.

5.3 Controle de Recebimento

5.3.1 Condições de Recebimento com base no Controle Tecnológico dos Materiais

Os serviços serão aceitos, do ponto de vista tecnológico, desde que os valores individuais dos ensaios de granulometria, lamelaridade e Índice de Suporte Califórnia, atendam aos limites definidos nesta especificação.

5.3.2 Condições de Recebimento com base no Controle de Execução da Camada

- a. o Teor de Umidade da camada executada deverá situar-se no intervalo de $\pm 1,5\%$ em relação à Umidade Ótima (hot) obtida no ensaio de compactação, na energia especificada;
- b. no que diz respeito ao Grau de Compactação (calculado com base na massa específica aparente seca "*in situ*", e referida à massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação realizado com amostra retirada imediatamente antes da rolagem da camada), a camada só será aceita:
 - se não for obtido nenhum valor menor que 100%; ou
 - se for satisfeita a seguinte condição:

$$\bar{X} - K.S \geq 100\%$$

onde:

\bar{X} - média aritmética dos Graus de Compactação obtidos

S - desvio padrão

K - coeficiente indicado na Tabela "Valor do Coeficiente K para Controle Estatístico do Grau de Compactação" (a seguir)



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

VALOR DO COEFICIENTE "K" PARA CONTROLE ESTATÍSTICO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO					
N	K	N	K	N	K
3	1,05	10	0,77	30	0,66
4	0,95	12	0,75	40	0,64
5	0,89	14	0,73	50	0,63
6	0,85	16	0,71	100	0,60
7	0,82	18	0,70		
8	0,80	20	0,69		
9	0,78	25	0,67		

Condição necessária:

$$\bar{X} - K.S \geq L$$

onde:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

N - número de elementos da amostra

X_i - valores individuais da amostra

L - valor limite especificado na amostra

\bar{X} - média aritmética dos Graus de Compactação obtidos

S - desvio padrão



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

- 5.3.3. Condições de Recebimento com base no Controle Geométrico e de Acabamento
- a. o serviço executado será aceito, com base no controle geométrico e de acabamento, quanto à espessura da camada acabada, desde que atendidas as seguintes condições:
- a espessura média da camada será determinada pela expressão:

$$e = \bar{X} - \frac{K.S}{N}$$

onde:

\bar{X} - média dos valores medidos

S - desvio padrão do mesmo conjunto de valores

K - coeficiente indicado na Tabela “Valor do Coeficiente K para Controle Estatístico da Espessura da Camada” (a seguir)

N – valores medidos ($N > 3$)

- a espessura média, calculada estatisticamente segundo a expressão acima referida, não deverá ser menor do que a espessura de projeto menos 1cm;
- não serão tolerados valores individuais de espessura fora do intervalo (+)2cm e (-)1cm em relação à espessura de projeto;
- em caso de aceitação, dentro das tolerâncias estabelecidas, de uma camada de Agregado Reciclado com espessura média inferior à de projeto, a diferença será compensada estruturalmente na camada a ser superposta;
- em caso de aceitação, dentro das tolerâncias estabelecidas, da camada de Agregado Reciclado com espessura superior a de projeto, a diferença não será deduzida da espessura da camada superior.

VALOR DO COEFICIENTE "K" PARA CONTROLE ESTATÍSTICO DA ESPESSURA DA CAMADA					
N	K	N	K	N	K
3	1,88	10	1,38	30	1,33
4	1,63	12	1,36	40	1,30
5	1,53	14	1,35	50	1,29
6	1,47	16	1,34	100	1,28
7	1,44	18	1,33		
8	1,41	20	1,33		
9	1,40	25	1,32		



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

Condição necessária:

$$e = \bar{X} - \frac{K.S}{N}$$

onde:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

N - número de elementos da amostra

X_i - valores individuais da amostra

S - desvio padrão

e - valor especificado na norma

- b. as condições de acabamento, apreciadas pela Fiscalização em bases visuais, sejam julgadas satisfatórias.

6- OBSERVAÇÕES DE ORDEM GERAL

A camada de reforço do subleito, sub-base ou base mista de Agregado Reciclado não deverá ser submetida à ação direta do tráfego. Em caráter excepcional, a Fiscalização poderá autorizar a liberação ao tráfego, por curto espaço de tempo e desde que tal fato não prejudique a qualidade do serviço.

Quando for prevista a imprimação impermeabilizante da camada de Agregado Reciclado, a mesma deverá ser realizada após a conclusão da compactação. Antes da aplicação da pintura betuminosa, a superfície deverá ser adequadamente limpa, mediante emprego de processos e equipamentos próprios.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

Integra a presente especificação o ANEXO I, com as Recomendações Técnicas para execução de Camada de Revestimento Primário de ruas em terra (cascalhamento), com utilização de Agregado Reciclado.

7- CRITÉRIOS DE MEDICAÇÃO E PAGAMENTO

7.1 Medição

A camada de Agregado Reciclado, executada e recebida na forma descrita, será medida em metros cúbicos de reforço do subleito, sub-base ou base mista de Agregado Reciclado compactado na pista, segundo a seção transversal de projeto.

No cálculo dos volumes, obedecida a tolerância especificada, será considerada a espessura média “e”, calculada como indicado anteriormente desde que “e” não seja superior à espessura de projeto. Caso “e” seja maior que a espessura de projeto será considerada a de projeto para cálculo do volume.

7.2. Pagamento

O pagamento será feito após a aceitação da medição dos serviços executados, com base no preço unitário contratual, o qual representará a compensação integral para todas as operações, transporte, materiais, perdas, mão-de-obra, equipamentos, encargos e outros gastos eventuais necessários à completa execução da camada de Agregado Reciclado.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

ANEXO I – PMSP/SP ETS 001/2003

ASSUNTO: Recomendações Técnicas para execução de Camada de Revestimento Primário de ruas em terra (cascalhamento), com utilização de Agregado Reciclado.

1- OBJETIVO

O presente **ANEXO** tem como objetivo as recomendações técnicas a serem seguidas na execução de Revestimento Primário de ruas de terra (cascalhamento) com uso de Agregado Reciclado.

2- DEFINIÇÃO

Considera-se Revestimento Primário com Agregado Reciclado o serviço de melhoria das condições de trafegabilidade de vias não pavimentadas, compreendendo a regularização e compactação mecânica, para conformação transversal e longitudinal de greide, bem como a execução de camada de rolamento a partir da utilização de Agregado Reciclado.

3- DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS

Os serviços de Revestimento Primário de ruas de terra com uso de Agregado Reciclado, são:

3.1.1 Preparo de Subleito:

- consiste na conformação geométrica (transversal e longitudinal) do leito da via, bem como sua escarificação, correção de umidade do solo e compactação;
- o preparo do subleito deverá dar-se na profundidade média mínima de 15cm, a contar da cota do leito conformado em toda largura e extensão da plataforma a ser revestida;
- a umidade de compactação do solo de subleito deverá situar-se no intervalo de $\pm 1,5\%$ em relação à Umidade Ótima (h_{ot}) obtida no ensaio de compactação em laboratório (Proctor – Energia Normal);
- o grau mínimo de compactação deverá ser de 100%;
- a superfície acabada do subleito preparado e conformado não deverá apresentar bolsões de solos moles ou saturados, com perda de capacidade estrutural, ou instáveis (borrachudos), devendo nessas ocorrências ser feita a substituição do material existente, por material de boa qualidade.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

Notas importantes:

- a. Caso a via em que forem realizados os serviços seja situada em local de concentração de umidade, onde seja tecnicamente inviável a correção de umidade do solo para fins de compactação, recomenda-se a substituição das etapas de escarificação e compactação do subleito pela execução de camada de cravação e/ou sobreposição de rachão ou fragmentos de resíduos sólidos da construção civil, selecionados, com dimensões compreendidas entre 50 e 100mm, visando à estabilização da camada de apoio do revestimento primário. Caso as cotas de soleiras impeçam essa sobreposição, deverá ser efetuada a remoção da camada de solo proporcional à espessura compactada da camada de rachão ou fragmentos de entulho.
- b. Na presença de redes subterrâneas (água, esgoto, etc.) em profundidades que impeçam a escarificação e/ou compactação para o preparo de subleito, deverá ser verificada a possibilidade de alteamento do greide do leito da via ou então, o rebaixamento da(s) rede(s).

3.2 Execução da Camada de Revestimento Primário com uso de Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil

A execução da camada de Revestimento Primário com emprego de Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil deverá obedecer às exigências contidas na Especificação Técnica PMSP/SP ETS - 001/2003 – Camadas de Reforço de Subleito, Sub-base e Base Mista de Pavimento com Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil.

4- CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS PARA O AGREGADO RECICLADO PARA FINS DE EXECUÇÃO DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO (CASALHAMENTO)

- diâmetro máximo dos grãos: 50mm;
- granulometria: contínua e bem graduada, com Coeficiente de Curvatura (C.c.) compreendido entre 1 e 3 e Coeficiente de Uniformidade (C.u.) maior ou igual a 10;
- porcentagem de material que passa na peneira de 0,42mm (nº 40): entre 10 e 30%;
- Índice de Suporte Califórnia – CBR \geq a 20% e expansão \leq 1,0% - Energia de Compactação Normal;
- porcentagem de grãos de forma lamelar: deverá ser \leq a 30%;
- porcentagem máxima de materiais indesejáveis, de mesma característica: 2% em massa;
- porcentagem máxima de materiais indesejáveis de características distintas: 3% em massa;
- deverá ser isento de materiais indesejáveis (plásticos, papéis/papelões, borrachas, vidros, gesso, etc.) ou nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador (produtos químicos, amianto, etc.).



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviço
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-Base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

5- CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS PARA A CAMADA DE REVESTIMENTO PRIMÁRIO (CASCALHAMENTO) COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO

- espessuras mínima e máxima da camada compactada de Revestimento Primário: 8cm e 20cm, respectivamente;
- umidade de compactação do material: compreendida entre (-)1,5% e (+)1,5%, em relação à Umidade Ótima obtida no ensaio de Proctor, do mesmo material, realizado em laboratório e na mesma energia de compactação;
- o Grau de Compactação G.C.(%): deverá ser de, no mínimo, 100%.

6- EXECUÇÃO, CONTROLE E DEMAIS INSTRUÇÕES

São os discriminados na Especificação Técnica PMSP/SP ETS - 001/2003 – Camadas de Reforço, Sub-base e Base Mista de Pavimento com Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil.

ANEXO B



PMSP ETS-02/2009 BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

1. OBJETIVO

O objetivo deste documento é a definição dos critérios que orientam a dosagem, usinagem e execução de base proveniente da reciclagem a frio em usina com espuma de asfalto do material fresado de camadas asfálticas do pavimento, em obras sob a jurisdição da Prefeitura do Município de São Paulo.

2. DESCRIÇÃO

Os serviços consistem no fornecimento, carga, transporte, descarga, usinagem, mão-de-obra, materiais e equipamentos necessários à execução e controle de qualidade da camada de Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto.

A Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto é uma mistura reciclada a frio obtida em usina que utiliza como agregado material proveniente da fresagem de pavimentos asfálticos (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) - em uma porcentagem mínima de 75% em relação à massa total de agregados e filer - agregados adicionais provenientes de britagem, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, ou outro filer, cimento asfáltico de petróleo (CAP) sob forma de espuma (Espuma de Asfalto) e água em proporções previamente determinadas em laboratório pelo ensaio Proctor, misturada, espalhada e compactada, de forma a compor uma nova camada de base do pavimento e executada em conformidade com a presente instrução. A camada de base constituída por material fresado com espuma de asfalto deverá ser empregada em vias que apresentam $N_{\text{CARACTERÍSTICO}} = 10^5$ repetições de carga do eixo padrão de 80 kN no período de projeto.

2.1 Definições

As seguintes definições foram adotadas na presente norma, com base na norma do DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes DNER ES-405/2000 e na ET-DE-P00/033 do Departamento de Estradas de Rodagem/SP:

Espuma de Asfalto é o estado temporário obtido a partir da injeção de ar sob pressão e pequena quantidade de água no cimento asfáltico de petróleo (CAP) aquecido à temperatura definida pelo fabricante do equipamento de reciclagem como a mais adequada para o tipo de CAP selecionado para a execução da obra, o que ocasiona forte expansão do ligante. Nesta condição, o produto é trabalhável à temperatura ambiente.

Taxa de Expansão é a relação entre o volume máximo do cimento asfáltico de petróleo no estado de “espuma” e o volume do cimento asfáltico de petróleo remanescente, após a espuma estar completamente assente.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

Meia-vida é o tempo em segundos necessário para a espuma assentar à metade do volume máximo alcançado.

Relação de Resistências: Relação entre a resistência à tração indireta úmida (após condicionamento obtido por imersão do corpo de prova por 24 horas), sobre a resistência à tração indireta seca (sem condicionamento prévio). Estas resistências devem ser obtidas à temperatura de 25°C, através do ensaio de compressão diametral dos corpos-de-prova Marshall (DNER ME 138/94) moldados com 50 golpes em cada uma das faces, e mantidos após desmoldagem pelo período de 72 horas em estufa a 60°C.

3. MATERIAIS PARA A MISTURA

3.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

Os ligantes asfálticos deverão ser cimento asfáltico de petróleo do tipo CAP-50/70 ou CAP-85/100 atendendo às exigências contidas na norma da Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis em vigor (ANEXO A). Todo carregamento de ligante asfáltico que chegar à obra deve apresentar certificado de análise, além de trazer indicação clara da procedência, tipo e quantidade do conteúdo e distância de transporte entre a refinaria/fornecedor e a usina.

A temperatura de aquecimento do ligante asfáltico para espumação deverá ser definida pelo fabricante da usina como a mais adequada para cada tipo de ligante, limitada ao máximo de 175°C.

3.2 Espuma de asfalto

A espuma de asfalto deve ser adequada em termos de expansão, meia vida e fluidez, para permitir uma mistura reciclada homogênea e possibilitando boa trabalhabilidade em temperatura ambiente.

Durante a execução da camada de Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto, a meia-vida e a taxa de expansão devem respeitar os limites indicados na dosagem da mistura pelo fabricante.

3.3 Material Fresado

O material fresado será constituído em sua totalidade de material resultante do processo de fresagem de camadas de pavimentos asfálticos.

O material fresado para fins de execução de camada de mistura reciclada com espuma de asfalto deverá ser isento de materiais indesejáveis (plásticos,



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

papéis/papelões, borrachas, vidros, gesso etc.) ou nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador (produtos químicos, amianto, etc...).

O material fresado deverá ser estocado em área coberta e drenada, de forma a evitar excesso de umidade.

3.4 Agregados

3.4.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo, assim considerado o material retido na peneira de 4,8 mm (n° 4), será constituído por produtos de britagem provenientes de rochas sãs (granitos, gnaisses, basalto, etc), apresentando partículas limpas e duráveis, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas, atendendo aos seguintes requisitos:

- a) Quando submetidos à avaliação da durabilidade com solução de sulfato de sódio, em cinco ciclos (método DNER-ME 89/94), os agregados deverão apresentar perdas inferiores a 12%;
- b) Para o agregado retido na peneira de 2,0 mm (n° 10), a porcentagem de desgaste no ensaio de abrasão "Los Angeles" (PMSP/SIURB ME-23/92) não deverá ser superior a 40%;
- c) Deve apresentar boa adesividade com material asfáltico (PMSP/SIURB ME-24/92). Caso isto não ocorra, deve ser empregado um melhorador de adesividade;
- d) Deve apresentar índice de forma superior a 0,5 (DNER-ME 086/94) e porcentagem de partículas lamelares não superior a 10% (ABNT NBR 6954).

3.4.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo, assim considerado o material que passa na peneira de 4,8 mm (n° 4), será constituído por areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos, apresentando partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. Deverão ser atendidos, ainda, os seguintes requisitos:

- a) O equivalente de areia (PMSP/SIURB ME-12/92) de cada fração componente do agregado miúdo (pó-de-pedra e/ou areia) deverá ser igual ou superior a 55%;
- b) É vetado o emprego de areia proveniente de cavas e/ou barrancas de rio, sem o devido beneficiamento. Sua utilização só será possível após análises e liberações pela Fiscalização.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

3.5 Material de Enchimento (Filer)

O material de enchimento deverá ser constituído pela parte fina do pó-de-pedra, cimento Portland, cal hidratada ou pó-calcário. Quando da aplicação, o filer deverá estar seco e isento de grumos. A granulometria a ser atendida deverá obedecer os limites indicados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1

Limites para granulometria do filer

PENEIRA	%EM PESO QUE PASSA
0,420mm (Nº 40)	100
0,175 mm(Nº 80)	95-100
0,075 mm(Nº200)	65-100

4. MISTURA RECICLADA

O material fresado deve ser corrigido com adição de agregados virgens para que sua curva granulométrica resulte contínua e bem graduada, obedecendo as faixas granulométricas indicadas na Tabela 1.

A mistura reciclada deve atender aos seguintes requisitos:

- a) a curva granulométrica da mistura de materiais deve ser contínua e enquadrar-se em uma das faixas da Tabela 1;

TABELA 1
FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DA MISTURA

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa Passando		
ASTM	mm	A	B	TOLERÂNCIAS
2"	50,0	100	100	
1 ½"	37,5	86-100	83-100	+/- 8
1"	25,0	72-100	76-100	+/- 8
¾"	19,0	64-100	70-94	+/- 8
½"	12,7	53-84	62-86	+/- 8
3/8"	9,5	46-76	58-80	+/- 8
Nº 4	4,8	34-62	42-68	+/- 8
Nº 10	2,0	23-50	32-54	+/- 5
Nº 40	0,42	11-32	16-35	+/- 5
Nº 80	0,42	8-25	10-26	+/- 5
Nº 200	0,075	8-20	8-20	+/- 3



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

- b) a mistura deve possuir um mínimo de 5% de finos passantes na peneira nº 200, para que a espuma se disperse convenientemente na mistura;
- c) no caso de uso de cimento como filer, a porcentagem deve ser preferencialmente 1%, e no máximo 2%;
- d) o teor de asfalto a ser utilizado deve ser determinado no laboratório, tendo como referência a faixa de 2% a 4%;
- e) a quantidade de água adicionada ao asfalto, usualmente está compreendida entre 1% e 2%, sobre o peso do asfalto, respeitando os valores mínimos para taxa de expansão e meia-vida indicados no projeto de mistura, que deverá ser fornecido pelo contratado;
- f) a mistura deve apresentar resistência média à tração indireta seca mínima de 0,28 MPa (3 corpos-de-prova para o cálculo da média) e resistência média à tração indireta saturada mínima de 0,20 MPa (3 corpos-de-prova para o cálculo da média). Estas resistências devem ser obtidas a 25°C por meio do ensaio de compressão diametral (DNER ME 138/94) dos corpos-de-prova Marshall moldados com 50 golpes por face. Todos os corpos-de-prova após moldagem deverão ser colocados pelo período de 72 horas em estufa a 60°C. Após permanência em estufa, os corpos-de-prova devem ser retirados da mesma e resfriados até a temperatura de equilíbrio de 25°C para então serem submetidos ao ensaio de ruptura por tração por compressão diametral – o valor de resistência à tração obtido é chamado de resistência à tração indireta seca. A média de resistências de três corpos-de-prova é denominada resistência média à tração indireta seca.
- Outro conjunto de corpos-de-prova moldados e mantidos em estufa nas mesmas condições que a anterior, serão levados ao condicionamento constituído por imersão dos corpos-de-prova por 24 horas em água a 60°C. Após retirada do banho e retirada da umidade em excesso da superfície dos corpos-de-prova, o conjunto formado por pelo menos 3 corpos-de-prova deverá ser levado ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral a 25°C. O valor de resistência à tração obtido é chamado de resistência à tração indireta saturada. A média de resistências de três corpos-de-prova é denominada resistência média à tração indireta saturada.
- g) a mistura deve apresentar relação de resistências - definida como a relação entre a resistência média à tração indireta saturada e a resistência média à tração indireta seca – de no mínimo 70%;

Para definição do projeto de mistura e porcentagem dos agregados adicionais é necessário que seja feita uma dosagem criteriosa da granulometria dos materiais e do



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

teor de betume. É fundamental que a coleta de amostras seja executada de forma a cobrir as possíveis variações dos materiais fresados disponíveis.

A dosagem da mistura reciclada - a ser fornecida pelo contratado - deve indicar as seguintes características:

- Composição granulométrica de projeto e faixa de trabalho;
- Cimento asfáltico de petróleo a ser utilizado;
- Teor do cimento asfáltico de petróleo a ser adicionado na mistura para formação da espuma, bem como a porcentagem de água necessária;
- Temperatura de aquecimento do cimento asfáltico de petróleo;
- Umidade ótima da mistura reciclada;
- Massa específica aparente seca máxima da mistura reciclada;
- Energia de compactação especificada (no mínimo Proctor Intermediário);
- Taxa de expansão e meia-vida;
- Resistência média à tração indireta, para as condições seca e saturada;
- Relação de resistências.

5. EQUIPAMENTOS

Todo equipamento deverá ser inspecionado pela Fiscalização, devendo dela receber aprovação, sem o que não será dada a autorização para o início dos serviços. Caso necessário, a Fiscalização poderá exigir a vistoria do equipamento por engenheiro mecânico ou técnico qualificado.

5.1 Usina de Reciclagem

A usina utilizada deverá apresentar condições de produzir o material descrito nesta norma com capacidade mínima de 200 ton/hora, sendo constituída por dois silos (um para RAP e outro para material de correção granulométrica), dosador para filer, com pesagem dinâmica via células de carga, barra espargidora para produção de asfalto espumado com aquecimento elétrico integrado na linha de CAP e barra para injeção de água, ambas com controle computadorizado, misturador tipo “*pug-mill*” e correia de carregamento do material reciclado.

Especial atenção deverá ser conferida à segurança dos operadores da usina, particularmente em relação à eficácia dos corrimãos das plataformas e escadas, à proteção de peças móveis e à de circulação dos equipamentos de alimentação de silos e transporte da mistura, devendo ser seguida a legislação de segurança do trabalho pertinente.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

5.2 Caminhões para o transporte da mistura

O transporte da mistura deverá ser efetuado através de caminhões basculantes com caçambas metálicas limpas e lubrificadas com óleo mineral ou similar caso seja necessário, providas de lona para proteção da mistura reciclada.

5.3 Equipamentos para distribuição

- a) A distribuição da mistura reciclada será normalmente efetuada através de vibro-acabadora automotriz, capaz de espalhar e conformar a mistura no alinhamento, cotas e abaulamento requeridos;
- b) A acabadora deverá ser preferencialmente equipada com esteiras metálicas para sua locomoção;
- c) A acabadora deverá possuir, ainda:
 - sistema composto por parafuso de rosca-sem-fim, capaz de distribuir adequadamente a mistura, em toda a largura da faixa de trabalho;
 - sistema rápido e eficiente de direção, além de marchas para a frente e para trás;
 - alisadores e vibradores, de modo que não ocorra irregularidade na distribuição da massa;
 - dispositivo eletrônico de nivelamento;
 - sistema de vibração que permita pré-compactação na mistura espalhada.
- d) Excepcionalmente, a critério da fiscalização, poderá ser autorizada distribuição através de motoniveladora.

5.4 Equipamentos para compressão

- a) A compressão da mistura reciclada será efetuada pela ação combinada de rolo de pneumáticos e rolo liso, ambos autopropelidos;
- b) O rolo pneumático deverá ser dotado de dispositivos que permitam a mudança automática da pressão interna dos pneus, na faixa de 35 a 120 lb/pol² (250 kPa à 850 kPa). É obrigatória a utilização de pneus uniformes, de modo a se evitar marcas indesejáveis na mistura comprimida;



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

- c) A compressão através do emprego de rolo vibratório de rodas lisas, quando admitida pela fiscalização, deverá ser testada experimentalmente na obra, de forma a permitir a definição dos parâmetros mais apropriados à sua aplicação (número de coberturas, frequência e amplitude de vibrações), bem como estiver comprovado que sua utilização não incorra em prejuízo às edificações lindeiras.
- d) Em qualquer caso, os equipamentos utilizados deverão ser eficientes no que se refere à obtenção do grau de compactação preconizado para a camada..

5.5 Ferramentas e equipamentos acessórios

Serão utilizados, complementarmente, os seguintes equipamentos e ferramentas:

- a) Soquetes mecânicos ou placas vibratórias, para a compressão de áreas inacessíveis aos equipamentos convencionais;
- b) Pás, enxadas, garfos, rodos, vassourões, carrinhos de mão e ancinhos, para operações complementares;
- c) Pá carregadeira, grade de disco ou "Pug Mill"
- d) Caminhões-tanque para abastecimento de água.

6. EXECUÇÃO

Não será permitida a execução dos serviços durante dias de chuva;

6.1 Preparo da superfície

- a) A superfície que irá receber a camada de mistura reciclada deverá se apresentar limpa, isenta de pó ou outras substâncias prejudiciais, devendo ter recebido a prévia aprovação por parte da fiscalização;
- b) A camada sobre a qual a Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto será executada deverá ter sido previamente recebida de acordo com a respectiva Instrução de Execução;
- c) Caso a camada de mistura reciclada não seja executada imediatamente após a execução da camada de apoio subjacente e de modo especial quando a mesma esteve exposta a chuvas, devem ser realizadas na camada de apoio, que pode ser constituída pelo subleito, Macadame Hidráulico, Brita Graduada, Agregado Reciclado ou solo estabilizado, as determinações pertinentes para liberação, a critério da fiscalização;



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

d) Eventuais defeitos existentes na superfície deverão ser adequadamente reparados previamente à execução da Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto.

6.2 Mistura do material em Usina

A mistura e incorporação dos materiais devem ser feitas nas seguintes condições:

- a) abastecimento com auxílio de pá carregadeira de um dos dois silos com material resultante da fresagem de pavimentos (RAP);
- b) abastecimento com auxílio de pá carregadeira do segundo silo com material pétreo virgem com a finalidade de correção da granulometria final do material usinado;
- c) introdução de filer na mistura através de sistema de injeção da própria usina;
- d) introdução de água e Espuma de Asfalto.

6.3 Espuma de Asfalto

Devem ser atendidas as recomendações do projeto de mistura no que se refere à qualidade da espuma, medidas pela taxa de expansão e meia-vida, em conformidade com o item 4.

6.4 Espalhamento do Material na Pista

O material usinado deve ser transportado para o local de espalhamento através de caminhões basculantes e despejado na mesa do equipamento, no caso do espalhamento com auxílio de vibroacabadora, atendendo às cotas e espessuras especificadas em projeto; no caso de opção de espalhamento com auxílio de motoniveladora, o material será despejado diretamente na pista.

Em função da espessura projetada de material usinado o espalhamento deve ser executado em uma ou mais camadas para que seja possível realizar e atingir a compactação requerida.

6.5 Compactação

Considerando a importância das condições de compactação da camada de base de material fresado com espuma de asfalto, recomenda-se a execução de panos experimentais, com a finalidade de definir os tipos de equipamentos de compressão e a seqüência executiva mais apropriada objetivando alcançar, de forma mais eficaz, o grau de compactação especificado.

A energia de compactação a ser adotada como referência para execução da camada de Base de material fresado com espuma de asfalto será, no mínimo, a da energia correspondente ao Proctor Intermediário (PMSP/SIURB ME-08/92).

Deverão ser executados os seguintes procedimentos:



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

- a) Os equipamentos de compactação devem ter dimensões, forma e peso adequados, de modo a se obter a massa específica aparente máxima prevista para a mistura. O andamento das operações deve ser estabelecido, de modo que a faixa em execução seja uniformemente compactada em toda a largura;
- b) A compactação deve ser iniciada e concluída preferencialmente com um emprego de rolos lisos;
- c) As coberturas dos equipamentos de compressão utilizados deverão seguir as seguintes orientações gerais:
 - I. A compressão será executada em faixas longitudinais, sendo sempre iniciada pelo ponto mais baixo da seção transversal, e progredindo no sentido do ponto mais alto;
 - II. Em cada passada, o equipamento deverá recobrir, ao menos, a metade da largura rolada na passada anterior.
- d) A compactação deve ser feita, de preferência, com o emprego de rolos pneumáticos que assegurem a obtenção da massa específica aparente indicada no projeto da mistura reciclada, em toda a espessura da camada compactada;
- e) A operação de compactação deve ser conduzida de modo que a espessura a ser compactada na fase final, pelos rolos pneumáticos ou lisos não seja inferior a 10,0 cm, após compactação, sendo a espessura máxima admitida de 15,0 cm por camada compactada;
- f) Durante as operações finais de compactação, devem ser tomadas as medidas necessárias para que a camada superficial seja mantida na umidade ótima, recorrendo-se, caso necessário, a pequenas adições de água e procedendo-se à nova homogeneização com equipamento adequado;
- g) Antes da fase final de compactação, caracterizada pela existência de certa quantidade de material solto superficial, deve ser feita a conformação do trecho ao greide e ao abaulamento desejados, com o emprego de equipamento adequado;
- h) A compactação da camada deverá evoluir até que se obtenha o grau de compactação médio de no mínimo mínimo de 100% em relação à massa específica aparente seca máxima da energia especificada. Não será aceito nenhum ponto com grau de compactação inferior a 95%. O número de passadas do compactador será definido em função dos panos experimentais executados.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

- i) Após a conclusão da compactação, é feito o acerto final da superfície, de modo a satisfazer o projeto, pela eliminação de saliências, com o emprego da motoniveladora. Não é permitida a correção de depressões pela adição de material. A superfície da base é comprimida até que se apresente lisa e isenta de partes soltas ou sulcadas;
- j) A camada de base de material fresado com espuma de asfalto, executada de acordo com esta especificação, deverá ser submetida a um período de perda do excesso de umidade por 72 horas, antes da execução do revestimento asfáltico;
- k) A camada de base de material fresado com espuma de asfalto não deverá ser submetida à ação do tráfego. Em caráter excepcional, a fiscalização poderá autorizar a liberação ao tráfego, por curto espaço de tempo, e desde que tal fato não prejudique a qualidade do serviço;
- l) Quando for prevista a imprimação da camada de Base de Material Fresado com Espuma de Asfalto, a mesma deverá ser realizada após a conclusão da compactação, tão logo se constate a evaporação do excesso de umidade. Antes da aplicação da pintura betuminosa, a superfície deverá ser perfeitamente limpa, mediante o emprego de processos e equipamentos adequados.

7. MANEJO AMBIENTAL

Os cuidados a serem observados para fins de preservação do meio ambiente envolvem a produção e aplicação de agregados, o estoque e operação da usina e a execução da camada.

Devem ser observadas as determinações estabelecidas no Decreto nº 48.184/2007 para procedimentos de controle ambiental quanto à aquisição de agregados pétreos virgens.

As usinas utilizadas produção da mistura reciclada deverão estar devidamente licenciadas pelo órgão ambiental competente.

8. CONTROLES

8.1 Controle Tecnológico dos Materiais

8.1.1 Cimento Asfáltico

Para todo carregamento que chegar à usina devem ser realizados:

- a) um ensaio de penetração a 25 °C, conforme PMSP/SIURB ME-25/92;
- b) um ensaio de viscosidade de Saybolt-Furol, conforme PMSP/SIURB ME-31/92.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

Para todo carregamento de cimento asfáltico que chegar à usina deve-se retirar uma amostra que será identificada e armazenada, para possíveis ensaios posteriores.

8.1.2 Agregados Adicionais

- a) um ensaio de abrasão Los Angeles (PMSP/SIURB ME-23/1992) no início da utilização do agregado na usina e sempre que houver variação da natureza do material;
- b) Um ensaio de índice de forma e porcentagem das partículas lamelares, conforme DNER-ME 086/94 e NBR 6954, respectivamente, no início da utilização do agregado na usina e sempre que houver variação da natureza do material;
- c) um ensaio de durabilidade conforme DNER-ME 089/94 no início da utilização do agregado na usina e sempre que houver variação da natureza do material.

8.2 Controle Tecnológico da Mistura Reciclada

O controle das características da mistura reciclada e de execução deve ser feito através das seguintes determinações:

- a) Moldagem de seis corpos de prova Marshall, com 50 golpes por face para determinação da resistência à tração indireta por compressão diametral para condições seca e saturada, a 25°C, determinada conforme DNER-ME 138/94, após período de 72 horas em estufa a 60 °C, uma determinação por jornada de 8 horas de trabalho;
- b) Determinação do teor de cimento asfáltico incorporado à mistura, obtido através da diferença entre o teor obtido no ensaio de extração da mistura reciclada e o teor existente no material fresado utilizado, sendo este teor obtido na fase de dosagem, conforme DNER-ME 053/94 ou extração por refluxo Soxhlet de 1.000 ml, uma determinação a cada 150m;
- c) Determinação do teor de umidade na pista pelo método expedito da frigideira ou outro método aceito pela fiscalização a cada 700m² de pista, alternando bordo direito, eixo, bordo esquerdo;
- d) Determinação da massa específica aparente seca "*in situ*" imediatamente após a compactação da camada conforme PMSP/SP ME-12/92 e o respectivo do grau de compactação, a cada 1000 m² de pista, a partir dos resultados da dosagem - item 4 - sendo no mínimo três determinações;
- e) Extração de corpos de prova com sonda rotativa de 6" de diâmetro, para análise visual da integridade e homogeneidade da camada, uma extração a cada 500 m de pista;



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

8.3 Controle Geométrico e de Acabamento

- a) controle de espessura: logo após a execução da camada, serão feitas locação e nivelamento do eixo e dos bordos, a cada 20m, envolvendo, no mínimo, cinco pontos da seção transversal;
- b) controle de acabamento da superfície: as condições de acabamento da superfície serão apreciadas pela Fiscalização, em bases visuais. Especial atenção deverá ser conferida à verificação da presença de segregação superficial.

9. CONDIÇÕES DE RECEBIMENTO

9.1 Recebimento com base no Controle Tecnológico dos Materiais e da Mistura

- a) Os agregados pétreos adicionais serão aceitos, sob o ponto de vista tecnológico, desde que os valores individuais dos ensaios de abrasão Los Angeles, durabilidade, lamelaridade, índice de forma e equivalente de areia e atendam aos limites definidos nesta especificação, conforme item 3.4.
- b) A mistura reciclada será recebida com base na resistência à tração média por compressão diametral seca e saturada desde que os valores atendam no mínimo 95% do especificado no item 4.f; os corpos de prova deste controle serão aqueles obtidos conforme item 8.2 a).

9.2 Recebimento com base no Controle de Compactação

- a) O teor de umidade da camada executada deverá estar compreendido entre 0,9 e 1,1 vezes a umidade ótima determinada do ensaio de compactação;
- b) No que diz respeito ao Grau de Compactação (calculado com base na massa específica aparente seca "*in situ*", e referida à massa específica aparente seca máxima obtida no processo de dosagem, conforme item 4.), a camada só será aceita:

- se não for obtido nenhum valor isolado menor que 95%; e
- se for satisfeita a seguinte condição:

$\bar{X} - K.S \geq 100\%$, onde:

\bar{X} - média aritmética dos Graus de Compactação obtidos

S - desvio padrão

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

K - coeficiente indicado na Tabela “Valor do Coeficiente K para Controle Estatístico do Grau de Compactação”

VALOR DO COEFICIENTE “K” PARA CONTROLE ESTATÍSTICO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO					
N	K	N	K	N	K
3	1,05	10	0,77	30	0,66
4	0,95	12	0,75	40	0,64
5	0,89	14	0,73	50	0,63
6	0,85	16	0,71	100	0,60
7	0,82	18	0,70		
8	0,80	20	0,69		
9	0,78	25	0,67		

9.3 Recebimento com base no Controle Geométrico e de Acabamento

O serviço executado será aceito, com base no controle geométrico e de acabamento, quanto à espessura acabamento da camada acabada, desde que atendidas as seguintes condições:

a) Quanto à espessura da camada

A espessura média da camada será determinada pela expressão:

$e = \bar{X} - (K.S)/N$, onde:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

\bar{X} - média dos valores medidos

S - desvio padrão do mesmo conjunto de valores

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

K - coeficiente indicado na Tabela “Valor do Coeficiente K para Controle Estatístico da Espessura da Camada”

N - número de valores medidos (N>3)

- a espessura média, calculada estatisticamente segundo a expressão acima referida, não deverá ser menor do que a espessura de projeto menos 1,0 cm;
- não serão tolerados valores individuais de espessura fora do intervalo (+)1,0cm e (-)1,0 cm em relação à espessura de projeto;



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

- em caso de aceitação, dentro das tolerâncias estabelecidas, de uma Camada de Base Reciclada com espessura média inferior à de projeto, a diferença será compensada estruturalmente na camada a ser superposta;
- em caso de aceitação, dentro das tolerâncias estabelecidas, da camada de Base Reciclada com espessura superior à de projeto, a diferença não será deduzida da espessura da camada superior;

b) as condições de acabamento, apreciadas pela Fiscalização em Bases visuais, sejam julgadas satisfatórias.

VALOR DO COEFICIENTE “K” PARA CONTROLE ESTATÍSTICO DA ESPESSURA DA CAMADA					
N	K	N	K	N	K
3	1,88	10	1,38	30	1,31
4	1,63	12	1,36	40	1,30
5	1,53	14	1,35	50	1,29
6	1,47	16	1,34	100	1,28
7	1,44	18	1,33		
8	1,41	20	1,33		
9	1,40	25	1,32		

10. OBSERVAÇÕES DE ORDEM GERAL

a) A camada de base de material fresado com espuma de asfalto, executada e recebida na forma descrita não deverá ser submetida à ação direta do tráfego. Em caráter excepcional, a Fiscalização poderá autorizar a liberação ao tráfego, por curto espaço de tempo e desde que não prejudique a qualidade do serviço;

b) Quando for prevista a imprimação da camada de Base de material fresado com espuma de asfalto, a mesma deverá ser realizada após a conclusão da compactação, tão logo se constate a evaporação do excesso de umidade superficial. Antes da aplicação da imprimação, a superfície deverá ser perfeitamente limpa, mediante emprego de processos e equipamentos adequados.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

11. CRITÉRIOS DE MEDIÇÃO E PAGAMENTO

11.1 Medição

A camada de base e material fresado com espuma de asfalto, executada e recebida na forma descrita, será medida em metros cúbicos de base reciclada compactada na pista, segundo a seção transversal de projeto. No cálculo dos volumes, obedecida a tolerância especificada, será considerada a espessura média “e”, calculada como indicado anteriormente desde que “e” não seja superior à espessura média de projeto. Caso “e” seja maior que a espessura de projeto será considerada a de projeto para cálculo do volume.

11.2 Pagamento

O pagamento será feito após a aceitação da medição dos serviços executados, com base no preço unitário contratual, o qual representará a compensação integral para todas as operações, materiais, transporte, perdas, mão-de-obra, equipamentos, encargos e outros gastos eventuais necessários à execução da camada de base de material fresado com espuma de asfalto.



PMSP ETS-02/2009
BASE DE MATERIAL FRESADO COM ESPUMA DE ASFALTO

ANEXO A

Características	Unidade	Limites		Métodos	
		CAP 50-70	CAP 85-100	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 a 70	85 a 100	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	46	43	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt – Furol					
a 135°C, mín.	s	141	110	NBR 4950	E 102
a 150°C, mín.		50	43		
a 177°C		30 a 150	15 a 60		
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, mín. SP21, 20rpm, mín.	cP	274	214	NBR 5184	D 4402
a 150°C, mín.		112	97		
a 177°C, SP 21		57 a 285	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutidade a 25°C, mín.	cm	60	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos					
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5		D 2872
Dutidade a 25°C, mín.	cm	20	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	55	55	NBR 6576	D 5

(*)Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e do ar.

ANEXO C

DNIT

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA GERAL
DIRETORIA EXECUTIVA
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS

Rodovia Presidente Dutra, km 163
Centro Rodoviário – Vigário Geral
Rio de Janeiro – RJ – CEP 21240-330
Tel/fax: (21) 3545-4600

Novembro/2012

NORMA DNIT xxx/2012-ES

Pavimentação – Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto – Especificação de serviço

Autor: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR

Processo: 50607.003481/2012-04

Origem: Revisão da norma DNER-ES 405/2000

Aprovação da Diretoria Colegiada do DNIT na Seção xx, de xx/xx/xxxx

Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.

Palavras chave:

Pavimentação, reciclagem, espuma de asfalto.

Nº total de páginas

9

Resumo

Este documento normativo define a sistemática a ser adotada na execução de reciclagem a frio “in situ” do pavimento, com a utilização de espuma de asfalto, agregado mineral, cimento Portland, água e incorporação de espuma de asfalto. São também encontrados os requisitos relativos a materiais, equipamentos, execução, controle da qualidade, condicionantes ambientais, condições de conformidade e não conformidade e critérios de medição dos serviços.

Abstract

This technical standard defines the methods and procedures to be used in the “in situ” manufacturing of a pavement by cold recycling, with the use of mineral aggregate, Portland cement, water and foamed bitumen as an incorporated item. It also presents requirements concerning materials, equipment, execution, quality control, environmental management, conformity and non conformity conditions and the criteria for services measurement.

Sumário

Prefácio

1 Objetivo	1
2 Referências normativas.....	2

3 Definições.....	2
4 Condições gerais.....	3
5 Condições específicas.....	3
6 Condicionantes ambientais.....	5
7 Inspeções.....	6
8 Critérios de medição.....	8
Índice geral.....	9

Prefácio

Esta Norma estabelece a sistemática empregada na execução e no controle da qualidade do serviço de reciclagem de pavimento a frio com espuma de asfalto.

1 Objetivo

Esta Norma fixa as condições a serem adotadas para execução e controle de reciclagem a frio “in situ” de pavimento, de forma a se obter uma camada de “base reciclada”, utilizando-se material removido do pavimento (proveniente da fresagem de revestimento asfáltico e base), produtos de britagem e cimento Portland, de acordo com o projeto estabelecido, com a incorporação de espuma de asfalto. A execução compreende a fresagem do pavimento existente, incorporação de materiais novos a serem espalhados sobre a pista, mistura e homogeneização na pista e compactação, de conformidade

com os alinhamentos e cotas definidos no projeto de restauração e com o traço da mistura reciclada.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta Norma. Para referências datadas aplicam-se somente às edições citadas. Para referências não datadas aplicam-se as edições mais recentes do referido documento.

- a) DNER-EM 036: Cimento Portland - Recebimento e aceitação - Especificação de material. Rio de Janeiro: IPR.
- b) DNER-ME 035: Agregados - determinação da "Abração Los Angeles" - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- c) DNER-ME 054: Equivalente de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- d) DNER-ME 086: Agregado - Determinação do índice de forma - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- e) DNER-ME 089: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- f) DNER-ME 092: Solo - Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- g) DNER-PRO 277: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços - Procedimento. Rio de Janeiro: IPR.
- h) DNIT 011-PRO: Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento. Rio de Janeiro: IPR.
- i) DNIT 070-PRO: Condicionantes ambientais das áreas de uso de obras - Procedimento. Rio de Janeiro: IPR.
- j) DNIT 095-EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro: IPR.
- k) DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- l) DNIT 145-ES: Pavimentação - Pintura de ligação com ligante asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR.
- m) DNIT 155-ME: Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- n) NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.

o) NBR 11579 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) - Método de ensaio.

p) NBR 14756 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade cinemática.

q) NBR 14950 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol.

3 Definições

Para os efeitos desta Norma aplicam-se as seguintes definições:

3.1 Base reciclada "in situ"

É a mistura realizada no local com o emprego de equipamentos próprios para esta finalidade, utilizando-se agregados removidos do pavimento existente, agregados adicionais, cimento asfáltico de petróleo, cimento Portland e água, em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, misturada, espalhada e compactada, de forma a compor a camada de base do pavimento.

3.2 Espuma de asfalto

É a mistura de cimento asfáltico de petróleo e água realizada em condições específicas de temperatura e pressão.

3.3 Taxa de expansão

Relação entre o volume máximo do cimento asfáltico (CAP) no estado de "espuma" e o volume do CAP remanescente, após a espuma estar completamente assente.

3.4 Meia vida

Tempo, em segundos, necessário para a espuma assentar à metade do volume máximo alcançado.

3.5 Relação de tensão

Relação entre a resistência à tração indireta úmida e a resistência à tração indireta seca, obtidas através do ensaio de compressão diametral dos corpos de prova Marshall, a 25°C.

4 Condições gerais

- a) Não é permitida a execução dos serviços nos dias de chuva.
- b) Todo carregamento de ligante asfáltico que chegar à obra deve apresentar, por parte do distribuidor, certificado de resultados de análise dos ensaios de caracterização exigidos nesta Norma, correspondente à data de fabricação ou ao dia de carregamento para transporte com destino ao canteiro de serviço, se o período entre os dois eventos ultrapassar de 10 dias. Deve trazer também indicação clara da procedência, do tipo e quantidade do conteúdo e distância de transporte entre o distribuidor e o canteiro de serviço.

5 Condições específicas

5.1 Insumos

5.1.1 Cimento asfáltico de petróleo - CAP

Os cimentos asfálticos de petróleo utilizados na produção de espuma devem ser do tipo CAP 50/70, CAP 85/100 ou CAP 150/200, de acordo com a Norma DNIT 095/2006-EM.

5.1.2 Espuma de asfalto

A espuma de asfalto deve apresentar as seguintes características:

- a) Expansão ≥ 10 (em relação ao volume original)
- b) Meia vida ≥ 6 segundos

5.1.3 Cimento Portland

- a) Deve atender aos requisitos das Normas DNER-EM 036/95 e ABNT NBR-6118:2007.
- b) Todo carregamento de cimento que chegar à obra deve vir acompanhado de certificado de fabricação com as informações sobre a data de fabricação, origem, classe, denominação normalizada, massa líquida entregue etc.
- c) Deve ser realizado um ensaio de finura de acordo com a Norma NBR 11.579/91 a cada 250 m de extensão de faixa de tráfego ou quando houver dúvida sobre sua sanidade.

5.1.4 Água

Deve ser isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis, de matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais.

5.1.5 Agregados adicionais

Caso necessário a correção granulométrica do material fresado para enquadramento na faixa definida no projeto, os agregados adicionais devem atender aos requisitos a seguir:

- a) Agregado graúdo – consiste em agregado pétreo ou seixo rolado, britados, e devem se constituir em fragmentos sãos, duráveis, sem torrões de argila ou substâncias nocivas e apresentar as características seguintes:
 - desgaste Los Angeles igual ou inferior a 55% (DNER-ME 035/98), admitindo-se agregados com valores maiores, no caso de desempenho satisfatório comprovado, ou quando submetidos a ensaios tecnológicos específicos;
 - índice de forma superior ou igual a 0,5 (DNER-ME 086/94);
 - durabilidade, perda inferior a 12% (DNER-ME 089/94).
- b) Agregado miúdo – constituído de pó de pedra com partículas individuais resistentes, sem torrões de argila e outras substâncias nocivas, devendo seu equivalente de areia (DNER-ME 054/97) ser igual ou superior a 40%.

5.1.6 Mistura reciclada

São necessárias as seguintes providências:

- a) Deve ser feito um poço de sondagem a cada 500 metros de extensão de pista, para verificação de:
 - espessura das camadas existentes;
 - granulometria e teor de umidade do conjunto revestimento + base;
 - teor de betume do revestimento.
- b) O projeto da mistura deve ser definido e submetido à aprovação da Fiscalização do DNIT antes do início da execução dos serviços.
- c) A composição final da mistura reciclada deve satisfazer aos requisitos do projeto e ao estabelecido a seguir:
 - apresentar o valor mínimo de 0,25 MPa para a resistência à tração indireta seca e de 0,15 MPa para a resistência à tração indireta saturada, a 25 °C;
 - possuir composição granulométrica satisfazendo à faixa da Tabela 1.

Tabela 1 – Composição granulométrica

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando em massa (%)
ABNT	Abertura (mm)	
2"	50	100
1 ½"	37,50	87 - 100
1"	25	77 - 100
¾"	19	66 - 99
½"	12,50	67 - 87
3/8"	9,50	49 - 74
¼"	6,3	40 - 62
Nº 4	4,75	35 - 56
Nº 8	2,36	25 - 42
Nº 16	1,18	18 - 33
Nº 30	0,600	14 - 28
Nº 40	0,425	12 - 26
Nº 50	0,300	10 - 24
Nº 100	0,150	7 - 17
Nº 200	0,075	4 - 10

5.2 Equipamentos

Todo equipamento, antes do início da execução da obra, deve ser examinado e estar de acordo com esta Norma. Os equipamentos requeridos são discriminados nas subseções 5.2.1 a 5.2.4.

5.2.1 Equipamento para espalhamento

Para o espalhamento dos materiais adicionais, como cimento e agregados de correção, podem ser utilizados equipamentos específicos dotados de controle eletrônico ou do tipo "spreader", para melhor controle das taxas de aplicação e garantia de distribuição homogênea. No caso do cimento, este pode ser espalhado manualmente, desde que se garanta a taxa prevista em projeto.

5.2.2 Equipamento para reciclagem

O equipamento para reciclagem deve ter as seguintes características e dispositivos:

- Autopropulsão com tração nas quatro rodas e potência motor mínima de 600 HP, para empurrar carreta de CAP e rebocar caminhão pipa de água simultaneamente, além de fresar profundidades de, pelo menos, 30 mm em uma única passada.
- Sistema automático de profundidade e nivelamento, para manter a espessura de corte nivelada e uniforme.
- O equipamento deve ter dispositivo de regulagem de espessura da camada do pavimento que será removida.
- Largura mínima efetiva de 2,5 m, em uma única passada.

e) Tambor misturador/fresador equipado com ferramentas de cortes especiais e que permita operação em quatro velocidades.

f) Dispositivo eletrônico para ajustar com precisão a taxa de aplicação de CAP, independentemente da velocidade de avanço.

g) Sistema de injeção de asfalto, água e ar, para formação de espuma, controlado por microprocessador, para assegurar a precisão e a uniformidade nas taxas de aplicação.

h) Bico de teste, para obter amostras de espuma de asfalto.

i) Acessório específico para injeção e dosagem para a água utilizada para a compactação, em sistema separado do de espuma.

5.2.3 Equipamento para acabamento

Motoniveladora para acabamento e nivelamento do material reciclado, autopropelida, com largura mínima de lâmina de 3,6 m e potência de motor suficiente para espalhar, aplicar e nivelar o material reciclado.

Precauções devem ser tomadas a fim de serem evitados processos de segregação da mistura reciclada.

5.2.4 Equipamentos para compressão

Rolo pneumático, rolo metálico liso, rolo tipo tandem vibratório e rolo tipo pé de carneiro (pata curta), para compactação da camada reciclada. Os rolos pneumáticos, autopropulsores, devem ser dotados de dispositivos que permitam a calibragem de variação da pressão dos pneus de 0,25 MPa a 0,84 MPa (35 a 120 psi).

O equipamento em operação deve ser suficiente para comprimir a mistura à densidade requerida, enquanto esta se encontrar em condições de trabalhabilidade.

5.3 Execução

Antes da execução dos serviços deve ser implantada a adequada sinalização de obra, visando à segurança do tráfego no segmento rodoviário, e efetuada sua manutenção permanente durante a execução dos serviços.

5.3.1 Mistura

5.3.1.1 A reciclagem "in situ" do pavimento deve ser executada nas seguintes condições e sequência:

- a) Espalhamento do agregado adicional, quando indicado no projeto da mistura reciclada, sobre a pista de rolamento, na espessura determinada;
- b) Espalhamento do cimento Portland sobre o pavimento existente, se indicado no projeto da mistura reciclada;
- c) Reciclagem na seção e espessura de corte indicadas em projeto. Nesta operação o cimento Portland, agregados adicionais (caso necessário), espuma de asfalto e água para compactação são simultaneamente incorporados e homogeneizados com parte do pavimento existente na câmara de mistura da recicladora. O processo é realizado por meio de um trem de reciclagem composto pelo tanque de asfalto, recicladora e um caminhão tanque de água, nesta ordem.

5.3.1.2 Na incorporação de água é tolerada na mistura a umidade compreendida entre 0,9 e 1,1 vezes a determinada para o trecho no ensaio de compactação.

5.3.1.3 Para execução de juntas longitudinais entre cortes adjacentes deve ser efetuada uma superposição mínima de 15 cm entre passadas da recicladora. Não deve ser aplicada espuma de asfalto ou água para compactação nessa largura de superposição, pois ela já foi tratada anteriormente.

5.3.2 Compactação, proteção e cura

Aplicar os procedimentos seguintes:

- a) o equipamento de compactação deve ter dimensões, forma e massa adequadas, de modo a se obter a massa específica aparente máxima prevista para a mistura. O andamento das operações deve ser estabelecido de modo que a faixa em execução seja uniformemente compactada em toda a largura da faixa reciclada;
- b) a compactação deve ser iniciada com o emprego de rolo pé de carneiro (pata curta);
- c) a compactação deve ser finalizada com o emprego de rolo pneumático e liso, que assegurem a obtenção da massa específica aparente indicada no projeto da mistura reciclada, em toda a espessura da camada compactada;

d) a operação de compactação deve ser conduzida de modo que a espessura a ser compactada na fase final seja a maior possível e nunca inferior a 5 cm, após compactação;

e) durante as operações finais de compactação devem ser tomadas as medidas necessárias para que a camada superficial seja mantida na umidade ótima, ou ligeiramente acima, recorrendo-se a pequenas adições de água, se preciso for, e procedendo-se à nova homogeneização com equipamento adequado;

f) antes da fase final de compactação, caracterizada pela existência de certa quantidade de material solto superficialmente, deve ser feita a conformação do trecho ao greide e à declividade desejados com o emprego de equipamento adequado;

g) após a conclusão da compactação deve ser feito o acerto final da superfície, de modo a satisfazer o projeto, pela eliminação de saliências, com o emprego da moto-niveladora. Não é permitida a correção de depressões pela adição de material. A superfície da base deve ser comprimida até que se apresente lisa e isenta de partes soltas ou sulcadas;

h) a energia de compactação deve ser no mínimo a do ensaio de Proctor Modificado correspondente à massa específica aparente seca máxima;

i) todo trecho, logo após a sua execução deve ser submetido a um processo de cura, devendo para este fim ser protegido contra a perda rápida de umidade pela aplicação da pintura de ligação, em conformidade com a Norma DNIT 145/2012-ES;

j) a pintura de proteção só pode ser considerada como pintura de ligação (*tack-coat*) no caso de, por ocasião da aplicação do revestimento asfáltico, se encontrar em condições de cumprir os requisitos necessários e estar livre de pó ou material estranho; caso contrário deve ser executada nova aplicação de pintura de ligação;

k) os trechos reciclados só podem ser abertos ao tráfego após a conclusão da pintura de proteção, em conformidade com a subseção 5.3 da Norma DNIT 145/2012-ES.

6. Condicionantes ambientais

6.1 Condicionantes ambientais gerais

Devem ser devidamente observados a legislação ambiental vigente e os procedimentos prescritos no instru-

mental técnico normativo pertinente do DNIT, especialmente a Norma DNIT 070/2006 – PRO, e cumprido o estabelecido na documentação vinculada à execução do empreendimento, constituída pelo projeto de engenharia, estudos ambientais e o licenciamento ambiental.

6.2 Condicionantes ambientais específicos

Devem ser obedecidos os procedimentos a seguir:

- a) A executante deve encaminhar à Fiscalização do DNIT cópia da licença para a operação da pedreira estabelecida no projeto e planejar sua exploração, visando à minimização dos impactos ambientais. Terminada a operação da pedreira, deve ser realizada a reabilitação da área, de modo a não gerar nenhum passivo ambiental.
- b) Evitar o tráfego de equipamentos fora do corpo estradal.
- c) Controlar a emissão de poeira, ruído e vibração, principalmente em área urbana.
- d) As operações na instalação de britagem e de manuseio e transporte de materiais devem ser efetuadas em condições adequadas e de forma a não intervir com o processo natural de escoamento de águas superficiais e com os dispositivos instalados de drenagem.

7 Inspeções

7.1 Controle dos insumos

Todos os materiais a serem aplicados na obra devem ser examinados em laboratório obedecendo à metodologia indicada pelo DNIT e satisfazer às normas e o prescrito a seguir:

7.1.1 Cimento Portland

Deve ser realizado um ensaio de finura (NBR 11579:1991) a cada 250 m de faixa ou quando houver dúvida sobre sua sanidade.

7.1.2 Agregados adicionais

- a) Para os agregados graúdos devem ser realizados os seguintes ensaios:

- um ensaio de "Abrasão Los Angeles" (DNER-ME 035/98) antes do início da utilização do agregado na obra e sempre que houver variação da natureza do material;
 - um ensaio de índice de forma (DNER-ME 086/94) antes do início da utilização do agregado na obra e sempre que houver variação da natureza do material; e
 - um ensaio de durabilidade (DNER-ME 089/94) antes do início da utilização do agregado na obra e sempre que houver variação da natureza do material.
- b) Para o agregado miúdo deve ser realizado o seguinte ensaio:
 - uma determinação do equivalente de areia (DNER-ME 054/97) em cada dia de trabalho.

7.1.3 Cimento asfáltico de petróleo - CAP

Para todo carregamento que chegar à obra devem ser realizados os ensaios a seguir:

- 1 ensaio de penetração a 25 °C (DNIT 155/2010-ME);
- 1 ensaio de viscosidade Saybolt-Furol (NBR 14950:2003) ou Brookfield a 135 °C (NBR 14756:2001).

7.1.4 Água

Deve ser examinada sempre que houver dúvida sobre sua qualidade.

7.2 Controle da execução

7.2.1 Controle da mistura reciclada

Os controles de confecção da mistura devem ser realizados a cada 250 metros de extensão de faixa de tráfego, como a seguir:

- a) verificação da quantidade do cimento incorporado por massa ou volume;
- b) ensaio de compactação, para determinação da massa específica aparente seca máxima, com a energia do ensaio Proctor Modificado;
- c) determinação do teor de umidade, depois da adição de água e homogeneização da mistura;
- d) ensaios de granulometria e teor de betume, para verificação das características do material reciclado;
- e) moldagem de dois corpos de prova Marshall (75 golpes/face), para determinação da resistência à tração indireta por compressão diametral seca e saturada

(DNIT- 136/2010-ME), após 72 horas de cura em estufa a 60 °C, com material coletado na pista;

f) moldagem de dois corpos de prova Marshall (75 golpes/face), para determinação da massa específica aparente após 72 horas de cura em estufa a 60 °C, com material coletado na pista;

g) determinação da densidade "*in situ*", após a compactação final da mistura.

7.2.2 Controle da espuma de asfalto

A cada 500 metros de faixa reciclada ou por jornada de 8 horas de trabalho devem ser realizados ensaios de taxa de expansão e meia vida do CAP espumado.

7.2.3 Compactação

a) Os ensaios de densidade "*in situ*" para verificação do grau de compactação pelo método DNER-ME 092/94 (determinação da massa específica aparente "*in situ*", com emprego do frasco de areia) devem ser realizados a cada 250 metros de extensão de faixa de tráfego, ou por jornada de 8 horas de trabalho.

b) O grau de compactação deve ser de, no mínimo, 100% em relação à maior massa específica aparente seca obtida, decorrente dos procedimentos de compactação pelo padrão Proctor Modificado e compactação Marshall (75 golpes/face).

7.3 Controle geométrico do produto

Após a execução da base reciclada, proceder à relocação e ao nivelamento do eixo e das bordas, permitindo-se as tolerâncias seguintes:

- a) até 10 cm em excesso quanto à largura da plataforma;
- b) até 20% em excesso para a flecha de abaulamento, ou até 0,5% em excesso para a declividade transversal de caimento simples, não se tolerando falta nos dois casos;
- c) $\pm 10\%$ quanto à espessura de projeto.

NOTA: Em caráter complementar, pode ser realizado o controle deflectométrico, para garantia da qualidade na execução do serviço. Procede-se à determinação de deflexões sobre a superfície acabada segundo o método DNER-ME 024/94,

com o auxílio de viga Benkelman, ou FWD (*Falling Weight Deflectometer*) segundo a Norma DNER-PRO 273/96. Executa-se pelo menos uma medida da deflexão máxima a cada 100 metros, alternando-se, aleatoriamente, entre as bordas (direita e esquerda) e o centro da pista.

A deflexão obtida sobre cada camada deve ser inferior ao valor considerado no dimensionamento do pavimento constante do projeto. Os segmentos que apresentarem valores superiores aos considerados no projeto devem ser pesquisados individualmente, para se tentar definir a causa do aumento nos valores da deformabilidade elástica. Caso o aumento tenha sido causado por falha executiva, ou uso de material inadequado, ou presença de material com excesso de umidade, o serviço deve ser refeito e corrigido o problema, antes da execução da camada seguinte.

7.4 Controle da qualidade

7.4.1 Plano de amostragem

O número e a frequência de determinações correspondentes a diversos ensaios e verificações para o controle dos insumos, da execução e do produto devem ser estabelecidos segundo um Plano de Amostragem elaborado de acordo com os preceitos da Norma DNER-PRO 277/97 e previamente aprovado pela Fiscalização do DNIT.

7.4.2 Condições de conformidade e não conformidade

Todos os ensaios de controle e determinações realizados de acordo com o Plano de Amostragem citado na subseção 7.4.1 devem cumprir as Condições Gerais e Específicas estabelecidas, respectivamente, nas seções 4 e 5 desta Norma e observados os critérios e disposições seguintes:

a) Quando especificado valor(es) mínimo(s) e/ou máximo a ser(em) atingido(s) devem ser verificadas as seguintes condições:

- Condições de conformidade:

$$\bar{X} - ks \geq \text{valor mínimo especificado};$$

$$\bar{X} + ks \leq \text{valor máximo especificado}.$$

- Condições de não conformidade:

$$\bar{X} - ks < \text{valor mínimo especificado};$$

$$\bar{X} + ks > \text{valor máximo especificado}.$$

Sendo:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Onde:

x_i - valores individuais.

\bar{X} - média da amostra.

s - desvio padrão da amostra.

k - coeficiente tabelado em função do número de determinações.

n - número de determinações (tamanho da amostra).

b) Os resultados do controle estatístico devem ser registrados em relatórios periódicos, na frequência previamente definida, de acordo com a Norma DNIT 011/2004-PRO, a qual prescreve que o executante da obra deve estabelecer e manter procedimentos documentados para implementar as ações corretivas e preventivas na execução da obra, com o objetivo de detectar e eliminar as causas das não conformidades.

c) Os serviços só devem ser aceitos se atenderem às prescrições desta Norma.

Qualquer serviço corrigido só deve ser aceito se as correções efetuadas o colocarem em conformidade com o disposto nesta Norma; caso contrário deve ser rejeitado.

8 Critérios de medição

Os serviços considerados conformes devem ser medidos de acordo com os critérios estabelecidos no edital de licitação, ou na falta desses critérios em conformidade com as disposições a seguir:

a) O serviço deve ser medido em metros cúbicos de pavimento de asfalto reciclado, considerando o volume efetivamente executado, de acordo com a espessura média e obedecidos os alinhamentos e cotas de projeto, admitidas as tolerâncias estabelecidas nesta Norma.

b) Não devem ser motivo de medição em separado o fornecimento e aplicação de materiais, transporte, mão de obra, encargos sociais incidentes, custos com a utilização de equipamentos, despesas fiscais e eventuais necessárias à execução e ao controle da qualidade da obra, devendo os mesmos ser incluídos na composição do preço unitário do serviço.

c) Volumes superiores aos indicados no projeto para os segmentos só devem ser medidos se previamente justificados pela Fiscalização do DNIT e após a competente aprovação e autorização.

d) As medições de serviço só devem ser processadas se a elas estiverem anexados os certificados dos ensaios e demais registros de controle estabelecidos nesta Norma e nos projetos da obra e da mistura, com parecer conclusivo da Fiscalização do DNIT.

Índice Geral

Abstract		1	Equipamentos	5.2	4
Agregados adicionais	5.1.5, 7.1.2	3, 6	Equipamento para espalhamento	5.2.1	4
Água	5.1.4, 7.1.4	3, 6	Equipamento para reciclagem	5.2.2	4
Base reciclada "in situ"	3.1	2	Equipamento para acabamento	5.2.3	4
Cimento asfáltico de petróleo – CAP	5.1.1, 7.1.3	3, 6	Equipamentos para compressão	5.2.4	4
Cimento Portland	5.1.3, 7.1.1	3, 6	Espuma de asfalto	3.2, 5.1.2	2, 3
Compactação	7.2.3	6	Execução	5.3	4
Compactação, proteção e cura	5.3.2	5	Índice geral		9
Condicionantes ambientais	6	5	Inspeções	7	6
Condicionantes ambientais específicos	6.2	6	Insumos	5.1	3
Condicionantes ambientais gerais	6.1	5	Meia vida	3.4	2
Condições de conformidade e não conformidade	7.4.2	7	Mistura	5.3.1	5
Condições específicas	5	3	Mistura reciclada	5.1.6	3
Condições gerais	4	3	Plano de amostragem	7.4.1	7
Controle da espuma de asfalto	7.2.2	7	Prefácio		1
Controle da execução	7.2	6	Objetivo	1	1
Controle da mistura reciclada	7.2.1	6	Referências normativas	2	2
Controle da qualidade	7.4	7	Relação de tensão	3.5	2
Controle dos insumos	7.1	6	Resumo		1
Controle geométrico do produto	7.3	7	Sumário		1
Critérios de medição	8	8	Tabela 1 – Composição granulométrica		4
Definições	3	2	Taxa de expansão	3.3	2