



FATEC-SP

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transporte e Obras de Terra

THIAGO LOPES DA ROCHA

**RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: APLICAÇÃO
EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

São Paulo

2014

THIAGO LOPES DA ROCHA

**RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: APLICAÇÃO
EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

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. MSc. Josué Alves Roso

São Paulo

2014

Aos meus pais Salvador e Carmem, que nunca mediram esforços para me oferecer uma boa educação, contribuindo assim, para o meu sucesso profissional. Agradeço, ainda por todo o amor, carinho e dedicação.

AGRADECIMENTO

As nossas conquistas são fruto de grande esforço pessoal e colaboração de muitas pessoas. O apoio de todos foi fundamental para realização deste trabalho e não é possível encerrá-lo sem antes agradecer especialmente a algumas destas pessoas.

Aos meus pais Salvador Antônio da Rocha e Carmem Lopes do Vale, e meus familiares a quem furtei os três últimos anos de convivência e que estiveram a me apoiar. Por vocês e em vocês busquei forças para seguir o meu caminho apesar das dificuldades.

Ao meu orientador Prof. MSc. Josué Alves Roso, pelos ensinamentos, apoio, conselhos, críticas, elogios e, em especial, pela confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores, funcionários e colegas do Departamento de Transporte e Obras de Terra da Faculdade de Tecnologia de São Paulo que contribuíram diretamente na ampliação dos meus conhecimentos duramente os últimos três anos.

Em especial a Antônio Diniz Soares Junior, Guilherme Correa Barbosa, Thyago Eduardo Mattos Brito e Vitor Oliveira Santos Vizini pelo convívio e persistência em incentivar meu crescimento intelectual.

Quero externar os meus agradecimentos a todos vocês cuja colaboração possibilitou a realização deste trabalho.

“Um homem de verdade é aquele que conquista seus objetivos e metas através do seu próprio esforço e dedicação.”

Rahvok

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento mecânico dos materiais alternativos sendo estes os agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) espumado quando empregados como camada de base de um pavimento flexível. Três estruturas de pavimentos hipotéticos foram dimensionadas conforme o método do DER/SP, as estruturas mantiveram as mesmas espessuras e variando apenas os materiais empregados na camada de base e consequentemente seus módulos de resiliência as estruturas foram analisadas conforme o método mecanicista por meio da Teoria dos Sistemas de Camadas Elásticas com o auxílio do programa computacional ELSYM-5. Concluiu-se que os materiais reciclados apresentam vantagens em relação aos materiais convencionais, uma vez que as tensões atuantes nos pontos de superfície do revestimento, fibra inferior do revestimento e topo do subleito apresentaram valores inferiores aos materiais convencionais em ambas as situações de empregabilidade do agregado reciclado, atendendo a legislação vigente. Com base nos resultados da análise mecanicista reduziram-se as espessuras das camadas de RCD e RAP, verificando que há possibilidade técnica para tal redução. Finalmente, pode-se verificar pelo universo amostral utilizado que, os pavimentos com materiais reciclados apresentam comportamento até superiores aos materiais convencionais, podendo assim, serem utilizados nas camadas de um pavimento flexível substituindo os materiais convencionais para composição da estrutura.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição. Agregados Reciclados de RCD. *Reclaimed Asphalt Pavement*. Análise Mecanicista. Comportamento Mecânico. Espuma de asfalto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disposição irregular dos RCD.....	9
Figura 2.2 – Composição dos RSU	10
Figura 2.3 – Composição dos RCD em diversas localidades (%).....	11
Figura 2.4 – Fontes e causas da ocorrência de resíduos de construção	13
Figura 2.5 – Perdas de materiais em processos construtivos	15
Figura 2.6 – Inter-relações dos atores envolvidos com a deposição irregular e fluxos de RCD.....	18
Figura 3.1 – Efeito da energia, intermediária: curva de Proctor	29
Figura 3.2 – Unidades de Reciclagem de RCC por Região do Brasil	33
Figura 3.3 – Porcentagem reutilizada ou reciclada em países da União Europeia.....	34
Figura 3.4 – Preço de base de pavimento executada pela PMSP (janeiro de 2005).....	36
Figura 4.1 – Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	37
Figura 4.2 – Detalhe do processo de fresagem/reciclagem.....	39
Figura 4.3 – Sugestões para a seleção de Métodos para reciclagem	42
Figura 4.4 – Câmara de expansão - Processo de formação da espuma de asfalto	43
Figura 6.1 – Algumas pesquisas realizadas sobre aplicações de RCC	65
Figura 7.1 – Esquema de pavimento da Rua Gervásio da Costa	68
Figura 8.1 – Deslocamentos e deformações da estrutura do pavimento	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALT-MAT – *Alternative Materials in Road Construction*

ARC – Agregado de Resíduo de Concreto

ARM – Agregado de Resíduo Misto

ARRA – *The Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BGS – Brita Graduada Simples

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

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

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EUA – Estados Unidos da América

FAA – *Federal Aviation Administration*

FHWA – *Federal Highway Administration*

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISC – Índice de Suporte Califórnia

ITQC – Instituto Brasileiro de Tecnologia e Qualidade na Construção Civil

MCT – Metodologia de Classificação de Solos

N – Número de repetições do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante a vida útil do pavimento

PMSP – Prefeitura do Município de São Paulo

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RAR – Revestimento Asfáltico Recuperado

RCC – Resíduos de Construção Civil

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

TSCE – Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO.....	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	METODOLOGIA	4
2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	5
2.1	DEFINIÇÃO.....	5
2.1.1	INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	5
2.1.2	NOMENCLATURA	6
2.1.3	LEGISLAÇÃO VIGENTE	6
2.1.4	POLÍTICAS PÚBLICAS	7
2.2	GESTÃO CORRETIVA	8
2.3	RELAÇÃO COM OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	9
2.4	COMPOSIÇÃO	10
2.5	GERAÇÃO	11
2.6	ORIGEM	12
2.7	CONSTRUÇÃO	13
2.8	DEMOLIÇÃO.....	14
2.9	DESPERDÍCIO.....	14
2.10	CONTAMINAÇÃO	15
2.11	COLETA.....	15
2.12	TRANSPORTE	16
2.13	DISPOSIÇÃO.....	16
2.14	BOTA FORA.....	17
2.15	DISPOSIÇÃO IRREGULAR	17
2.15.1	EXPORTAÇÃO.....	18
2.15.2	REMOÇÃO.....	19
2.16	CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O CONAMA	19
2.17	DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO EXTERIOR.....	20
2.18	DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO BRASIL	20
2.19	IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS	21

2.20	REAPROVEITAMENTO E RECICLAGEM	22
3	RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO ...	23
3.1	AGREGADO RECICLADO	23
3.1.1	DEFINIÇÃO	23
3.1.2	HISTÓRIA	23
3.1.3	NORMALIZAÇÃO	24
3.1.3.1	PMSP.....	24
3.1.3.2	ABNT	25
3.1.4	CLASSIFICAÇÃO.....	25
3.1.4.1	QUANTO A PORCENTAGEM DE CIMENTO NO RCD.....	25
3.1.4.1.1	AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO (ARC)	26
3.1.4.1.2	AGREGADO DE RESÍDUO MISTO (ARM).....	27
3.1.4.2	QUANTO A COR.....	27
3.1.5	CARACTERÍSTICAS	28
3.1.6	PESQUISAS.....	30
3.1.7	INCENTIVOS.....	30
3.1.8	REAPROVEITAMENTO/RECICLAGEM	30
3.1.8.1	PROCESSO.....	31
3.1.8.1.1	CONCENTRAÇÃO	31
3.1.8.1.2	BRITAGEM/COMINUIÇÃO	32
3.1.8.1.3	PENEIRAMENTO.....	32
3.1.8.1.4	OPERAÇÕES AUXILIARES.....	32
3.1.8.1.5	USINA RECICLADORA	32
3.1.8.2	NO EXTERIOR	33
3.1.8.3	NO BRASIL	35
3.1.9	UTILIZAÇÃO.....	35
4	RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)	37
4.1	ORIGEM	37
4.2	FRESAGEM.....	38
4.3	RECICLAGEM	39
4.4	TIPOS DE RECICLAGEM.....	40
4.4.1	RECICLAGEM A FRIO.....	40
4.4.2	RECICLAGEM A QUENTE	40
4.4.3	RECICLAGEM A QUENTE IN SITU	40
4.4.4	RECICLAGEM DE CAMADAS DO PAVIMENTO	41

4.5	DETERMINAÇÃO DO METÓDO DE RECICLAGEM.....	42
4.6	ESPUMA DE ASFALTO	43
5	PAVIMENTO.....	45
5.1	DEFINIÇÃO.....	45
5.2	CARGAS E SOLICITAÇÕES	45
5.3	ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	45
5.3.1	CAMADAS.....	46
5.3.1.1	REVESTIMENTO	46
5.3.1.2	SUBLEITO.....	46
5.3.1.3	REFORÇO DO SUBLEITO	47
5.3.1.4	SUB-BASE.....	47
5.3.1.5	BASE.....	47
5.3.2	IMPRIMAÇÕES	48
5.3.2.1	LIGAÇÃO.....	48
5.3.2.2	IMPERMEABILIZAÇÃO	48
5.4	TEORIA DE BOUSSINESQ.....	48
5.5	TEORIA DE SISTEMA DE CAMADAS ELÁSTICAS (TSCE)	50
5.6	EMPREGO TSCE COM O ELSYM 5	53
5.7	ANÁLISE MECANICISTA SEGUNDO O DER/SP.....	54
5.7.1	SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO	54
5.7.2	REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO.....	55
5.7.3	SUBLEITO.....	57
6	APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTAÇÃO	59
6.1	HISTÓRIA	59
6.2	PESQUISAS	59
6.3	INCENTIVOS	61
6.4	CUSTOS	62
6.5	ESPECIFICAÇÕES E REQUISITOS.....	63
6.6	NORMALIZAÇÃO	64
6.7	APLICAÇÃO	64
7	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS	66
7.1	NO EXTERIOR	66
7.2	NO BRASIL.....	67

7.2.1	UTILIZAÇÃO PELA PMSP	67
7.2.1.1	REVESTIMENTO PRIMÁRIO.....	67
7.2.1.2	PRIMEIRA PAVIMENTAÇÃO.....	67
7.2.2	UTILIZAÇÃO EM BELO HORIZONTE/MG.....	68
7.2.3	PISTA EXPERIMENTAL DE GOIÂNIA/GO.....	69
8	EXPERIMENTAÇÃO	70
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
10	CONCLUSÃO.....	79
	REFERÊNCIAS	80
	ANEXO A – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 1.....	84
	ANEXO B – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 2.....	88
	ANEXO C – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 3.....	92
	ANEXO D – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 4.....	96
	ANEXO E – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 5.....	100

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma vasta gama de recursos naturais que podem ser explorados pelo homem, mas com a facilidade de exploração destes recursos também tem aumentado a demanda de forma exponencial, o que num tempo futuro poderá acarretar na escassez dos mesmos. O presente trabalho visa esmiuçar os materiais de construção civil e demolição que podem ser empregados em pavimentos, minimizando os impactos gerados no descarte destes materiais e na extração de novos materiais convencionais.

O saneamento ambiental é um conjunto de ações que tornam uma área sadia, limpa e habitável. Os serviços de saneamento ambiental integram ações de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, drenagem de águas pluviais, controle de vetores e, como seria de se esperar, a coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos. (OPAS, 2002 *apud* SCHENEIDER, 2003)

Tudo que nos cerca um dia será resíduo: casas, automóveis, móveis, pontes, aviões. A este total, devemos somar todos os resíduos do processo de extração de matérias-primas e de produção dos bens. Assim, em qualquer sociedade, a quantidade de resíduos gerados supera a quantidade de bens consumidos. A sociedade industrial, ao multiplicar a produção de bens, agravou esse processo. (ROCHA; JOHN, 2003)

“A correta gestão desses serviços melhora a qualidade de vida do meio urbano pela preservação da saúde e do bem-estar da comunidade. Saúde e ambiente são interdependentes e inseparáveis.” (OPAS, 2002 *apud* SCHENEIDER, 2003)

De acordo com Leite (2007) os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados em quantidades expressivas nas cidades de grande e médio porte no Brasil e são comumente descartados de forma irregular. Com o crescimento e o desenvolvimento das cidades, a indústria da construção civil depara-se com uma questão importante: a geração de resíduos sólidos pelas obras novas e demolições.

No Brasil, foi aprovada no ano de 2002 a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 307 (CONAMA) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. De acordo com esta resolução, os geradores são responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas. Além disso, eles devem ter como prioridade a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final. (BRASIL, 2002)

O RCD é um material nobre do ponto de vista da engenharia, pois normalmente se apresenta resistente e com baixa expansão. Estas características indicam o seu grande potencial de reciclagem como agregado para pavimentação. Estudos analisando as propriedades físicas, químicas e

mecânicas do RCD para utilização em pavimentação vêm sendo desenvolvidos no Brasil desde a década de 80. (LEITE, 2007)

“Para os milhares de quilômetros de vias urbanas não pavimentadas, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil é uma alternativa aos materiais convencionais de pavimentação.” (LEITE, 2007)

O termo *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) ou concreto de asfalto é usado para identificar qualquer material asfáltico recuperado de um pavimento existente. O tipo de asfalto originalmente utilizado em conjunto com as variações na mistura asfáltica será consequentemente refletido no material do RAP. Quando camadas múltiplas de asfalto com misturas diferentes são recuperadas pela fresagem (ou trituras das lajes), o RAP resultante será uma mistura de todas as misturas do componente. As duas características principais de um material RAP estão associadas ao ligante de betume (o estado, a quantidade e a consistência do betume do material) e a granulometria. (WIRTGEN, 2012)

Em relação aos materiais convencionais o emprego dos materiais reciclados em pavimentação gera as seguintes vantagens e atrativos. (LEITE, 2007)

- i. Os custos de um pavimento diminuem, conforme aumenta a porcentagem de emprego de agregados reciclados desconsiderando os gastos com transportes;
- ii. Baixa ou nula expansibilidade, com a entrada de água ou **saturação** não ocorre a expansão das camadas compactadas;
- iii. As atividades pozolânicas naturais dos agregados reciclados RCD, propiciam um potencial de auto cimentação;
- iv. Conforme aumenta a utilização dos agregados reciclados, diminuem a porcentagem de resíduos descartados nos aterros com a consequente diminuição dos custos de operação;
- v. Menor impacto na implantação e manutenção de aterros e bota-foras, em função do prolongamento da vida útil dos existentes;
- vi. Menor impacto de saneamento nos municípios;
- vii. Menor custo com a limpeza urbana, considerando o menor descarte de resíduos de construção civil junto aos resíduos sólidos;

- viii. Reserva de jazidas minerais naturais, devido à menor necessidade de exploração das mesmas, e consequentemente, menor agressão ao meio ambiente.

O propósito desta pesquisa é possibilitar por meio da apresentação de seus resultados o estímulo a utilização do agregado reciclado, quando possível, em substituição ao material natural não-renovável, como britas graduadas ou materiais estabilizados granulometricamente.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo, apresentar as características dos agregados reciclados de construção e demolição (RCD) e o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), no emprego desses em camadas na estrutura do pavimento. Utilizando parâmetros das análises mecânicas será realizada a comparação entre metodologias tradicionais de construção e os materiais propostos RCD e RAP, buscando por intermédio dos resultados desses parâmetros um perfil comparativo entre esses materiais, a fim de verificar a viabilidade do seu uso, quanto aos parâmetros propostos.

1.2 JUSTIFICATIVA

“A preocupação com passivos ambientais e com um destino adequado para a grande quantidade de resíduos provenientes da construção civil, incentiva as pesquisas na área de reciclagem destes materiais.” (LEITE, 2007)

É certo que, dadas a variedade enorme de resíduos existentes em diferentes regiões do país e a complexidade do tema, muitas outras pesquisas serão necessárias para enfrentar o problema de forma significativa. Mas também é certo que a difícil fase inicial já se encontra superada. (ROCHA; JOHN, 2003)

Devido a intensa expansão do setor da construção civil, é notório e alarmante o aumento do volume de resíduos gerados por esta indústria. Esta pesquisa visa aumentar o campo de conhecimento sobre o uso de agregados reciclados de construção civil, bem como incentivar seu uso em obras de pavimentação.

1.3 METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão bibliográfica para obter conhecimento sobre os materiais alternativos oriundos de resíduos de construção civil e seu emprego em camadas de pavimentos, por meio desta foi observado a uma vasta gama de materiais disponíveis no mercado e diversos casos de sucessos quando são empregados nesta finalidade.

Dimensionou-se uma estrutura de pavimento flexível, pelo método do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), variando os materiais, na camada de base, sendo estes o agregado de resíduo de construção e demolição, *reclaimed asphalt pavement* espumado e o material convencional brita graduada simples.

Realizar análise mecanicista, de acordo com o método estipulado na IP-DE-P00/001, publicada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) em 2006.

Após o dimensionamento e a análise de tensões realizadas por programa computacional, esses resultados serão tabulados para a análise comparativa e verificação da viabilidade técnica do emprego desses materiais.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 DEFINIÇÃO

De acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) os resíduos da construção civil são os 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 entre outros. Geralmente estes materiais são denominados como entulhos, calça ou metralha. (BRASIL, 2002)

Para Leite (2001) os resíduos de construção civil são materiais pesados e de grande volume que quando depositados indiscriminadamente são verdadeiros focos para depósitos de outros tipos de resíduo, que podem gerar contaminações devido à lixiviação ou solubilização de certas substâncias nocivas.

Na Europa os resíduos de construção civil são definidos como “todo resíduo que surge da construção, renovação e demolição, incluindo-se os materiais excedentes, os produtos danificados e materiais decorrentes da execução da construção ou da utilização temporária das atividades locais de construção”. (MELO, 2011)

2.1.1 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com Schneider (2003) a indústria da construção civil que engloba os serviços de construção, manutenção, reforma e demolição. Gera entre outros impactos os decorrentes da extração de matérias primas naturais necessárias a realização destas atividades e conseqüentemente há uma elevada porcentagem de resíduos gerados que impactam diretamente nos resíduos urbanos.

Para Leite (2001) a indústria da construção é uma das mais antigas e utiliza materiais e técnicas que não se alteraram tanto com o decorrer do tempo. Por exemplo, temos o concreto que hoje é produzido com os mesmos materiais de anos atrás, variando apenas com a utilização de aditivos, que alteram algumas de suas propriedades. Com as novas exigências ambientais as indústrias devem, rever seus métodos e técnicas a fim de mitigar seus impactos.

A indústria da construção civil tem grande importância na economia brasileira. De acordo com Silva (2009) “[...] além de impulsionar o crescimento e desenvolvimento do país, tem criado inúmeras oportunidades de empregos e contribuindo diretamente para o desenvolvimento social”.

O conjunto de atividades que acompanha a construção civil contribui com importantes impactos ambientais que degradam significativamente a qualidade de vida do ambiente urbano, entre estas atividades pode-se considerar a extração de matéria prima para uso da construção civil. (SCHNEIDER, 2003)

2.1.2 NOMENCLATURA

De acordo com Ângulo (2000) alguns autores preferem o termo Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para resíduos de construção e demolição, já outros utilizam o termo entulho que pode parecer bastante amplo, sendo preferível a utilização do termo RCD, que remete diretamente à ideia da natureza dos resíduos, provenientes, portanto, de atividades da construção e demolição.

2.1.3 LEGISLAÇÃO VIGENTE

Segundo Leite (2007) em 2003, a Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP), publicou a especificação técnica de serviço, PMSP/SP ETS-001, que define critérios para orientar a execução de camadas de pavimento com agregado reciclado. (PMSP, 2003)

No Brasil, as primeiras normalizações, que tratam sobre agregados reciclados, foram publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em 2004. Foram publicadas quatro normas, que tratavam desde a instalação para recebimento de resíduos da construção civil até sua aplicação em pavimentos. (LEITE, 2007)

Conforme Leite (2007) as normas nacionais, referentes aos resíduos de construção civil estão apresentadas abaixo:

- NBR 15113 (2004): Resíduos sólidos de construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação; (ABNT, 2004a)
- NBR 15114 (2004): Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação; (ABNT, 2004b)

- NBR 15115 (2004): Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos; (ABNT, 2004c)
- NBR 15116 (2004): Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. (ABNT, 2004d)

Segundo Levy (2001); Nataatmadja e Tan (2001); Kuo (2002) e Motta (2005) *apud* Leite (2007) são apresentadas a seguir as principais normas internacionais referentes a utilização dos agregados reciclados em serviços de pavimentação:

- Norma Britânica – BS 6543 (1985): *Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering*;
- Especificação técnica holandesa – *Standard RAW bepalingen (1995): Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek*;
- Especificação técnica alemã – TL RC-TOB (1995): *Technischen Lieferbedingungen für Recyclingbaustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel*;
- Especificação técnica do estado de Victoria (*Road Authority of Victoria*), Austrália – *Section 820 (2006): Recycled crushed concrete for pavement subbase and light duty base*;
- Especificações técnicas dos Departamentos de Transportes dos estados da Florida e Minnesota (FDOT e Mn/DOT).

“A elaboração de normas e de especificações técnicas colabora para que seja difundido e consolidado o uso de agregado reciclado em camadas de pavimentos.” (LEITE, 2007)

2.1.4 POLÍTICAS PÚBLICAS

De acordo com Schneider (2003) até o ano de 2002 o município de São Paulo estava no caminho contrário de experiências vigentes em outros países, a legislação municipal limitava-se a proibir a deposição em vias e logradouros públicos e estabelecia a responsabilidade do poder público na coleta, transporte e destinação de RCD de até 50 kg por

gerador. A coleta era realizada conjuntamente com os resíduos domiciliares, quando se ultrapassava o limite estabelecido, o gerador era responsabilizado pela remoção e destinação dos mesmos, a qual poderia ser realizada por transportadores privados.

Para Schneider (2003) a discussão das políticas públicas de resíduos tem como objetivo minimizar os resíduos no âmbito da União. A opção pela atração gratuita de RCD, adotada pela administração pública tem um preço custoso para a mesma, esta acaba por subsidiar o gerador e o transportador de RCD.

A eficácia da estratégia de atração de RCD pela oferta gratuita de áreas públicas para os geradores e transportadores privados indica que, se mais áreas públicas fossem ofertadas para a deposição de RCD sua captação seria maior e, portanto, seria menor a deposição irregular. (SCHNEIDER, 2003)

Para Schneider (2003) a partir de 2002 é notável a produção de políticas públicas, normas e especificações técnicas voltadas aos problemas provocados pelos resíduos da construção civil. A Constituição de 1998 criou ainda condições para a população atuar na defesa do meio ambiente mediante ação civil pública que pode ser apresentada ao Ministério Público, que pode ajuizar diretamente uma ação em nome do interesse geral.

2.2 GESTÃO CORRETIVA

Para Pinto (1999) a **gestão corretiva** caracteriza-se por englobar atividades não preventivas, repetitivas e custosas das quais não surtem resultados adequados, por isso profundamente ineficientes. Esta pratica aumenta conforme a disponibilidade de áreas com deposições irregulares degradando o ambiente urbano, e se sustenta enquanto houver a disponibilidade de áreas de aterramento nas proximidades das regiões fortemente geradoras de RCD.

Conforme Schneider (2003) no município de São Paulo fica a cargo das empresas de limpeza pública contratadas pela administração pública, a ação de coleta corretiva, que consiste em remoção para o aterro público dos resíduos de construção civil depositados irregularmente em vias e logradouros públicos.

Acontece, no entanto, que grandes quantias dos RCD continuarão sendo inevitavelmente geradas nas áreas urbanas centrais, por processos de renovação de espaços e edificações, tornando cada vez mais custosa e complexa a **gestão corretiva**. (PINTO, 1999)



Figura 2.1 – Disposição irregular dos RCD
Fonte: PINTO (1999)

Uma característica comum aos sistemas de aterros nos municípios é a extrema “volatilidade” das áreas utilizadas para deposição de resíduos inertes. Como já afirmado, seu esgotamento é extremamente rápido, tanto pela elevada geração de RCD verificada em cada município, como pelo fato de que muitas das áreas são de pequeno porte, inseridas integralmente na malha urbana, nas proximidades das regiões geradoras dos resíduos...> (PINTO, 1999)

2.3 RELAÇÃO COM OS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com Pinto (2003) *apud* Leite (2007) os resíduos de construção e demolição representam uma porcentagem em massa de aproximadamente 67% da massa total de resíduos sólidos gerados nas cidades.

Conforme Pinto (1999) uma referência da presença dos RCD na massa total dos resíduos sólidos urbanos pode ser obtida por meio da análise da carga transportada pelos veículos envolvidos com a coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e inertes, onde vem predominando a presença dos RCD.

Podemos observar na figura 2.2 que os RCD estão predominantes nas composição dos RSU nos municípios verificados.

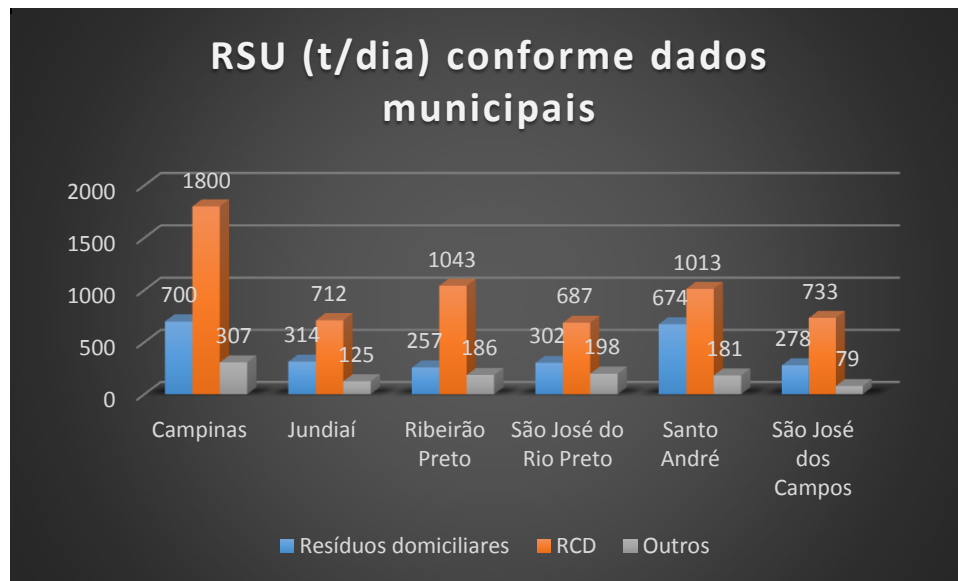


Figura 2.2 – Composição dos RSU
Fonte: Adaptado de PINTO (1999)

2.4 COMPOSIÇÃO

Para Motta (2005) a composição dos resíduos de construção civil pode variar significativamente e está condicionada a características específicas da região geradora.

A composição dos RCD é gerada durante novas construções, reformas/manutenção e demolições. Considera-se que, em razão da natureza da atividade, a composição dos resíduos de reformas/manutenção deve se assemelhar a de resíduos de demolição, porém não há informação a respeito. (ÂNGULO, 2000)

Composição Percentual (discriminação conforme as fontes)	Composição dos RCD em obras brasilei- ras típicas(1)	Composição Típica RCD em Hong Kong (2)	Composição Típica dos RCD na Bélgica (3)	Composição Típica dos RCD em Toronto (4)
Argamassas	64,0	--	--	--
Asfalto	--	2,2	--	--
Materiais asfálticos	--	--	10,2	--
Concreto	4,2	31,2	38,2	--
Alvenaria	--	--	45,2	--
Madeira	0,1	7,9	2,1	34,8
Entulho, agreg. e cerâmicos	--	--	--	24,1
Entulho	--	7,7	--	--
Componentes cerâmicos	11,1	--	2,9	--
Blocos de concreto	0,1	0,8	--	--
Tijolos	18,0	5,2	--	--
Ladrilhos de concreto	0,4	--	--	--
Pedra	1,4	11,5	--	--
Areia	--	3,2	--	--
Cimento amianto	0,4	--	--	--
Gesso	--	--	0,2	--
Metais	--	3,3	0,2	7,7
Vidro	--	0,3	--	2,8
Papel cartão	--	--	--	4,3
Papel	--	--	--	3,5
Papel e orgânicos	0,2	--	--	--
Outros orgânicos	--	1,7	--	0,6
Plástico	--	--	0,4	2,5
Tubos plásticos	--	0,6	--	--
Acessórios	--	0,1	--	--
Têxteis	--	--	--	0,7
Borracha e couro	--	--	--	0,5
Finos	--	--	--	1,9
Outros mat. de construção	--	--	--	16,6
Solo	0,1	--	--	--
Lixo, solo e barro	--	23,8	--	--
Bambu e árvores	--	0,4	--	--
Sucata	--	0,1	--	--
Outros	--	--	0,6	--
TOTAL	100	100	100	100

(1) Dados coletados em canteiros de obras convencionais em São Carlos / SP (PINTO, 1986) e Santo André / SP (I&T, 1990)

(2) Dados coletados na área de destinação final (HONG KONG POLYTECHNIC, 1993)

(3) INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, 1995

(4) Dados coletados na área de destinação final (SWANA, 1993)

Figura 2.3 – Composição dos RCD em diversas localidades (%)

Fonte: PINTO (1999)

Considerando o exposto na figura 2.3, conclui-se que a maior parte dos resíduos de construção e demolição, tanto no Brasil quanto na Bélgica ou em Hong Kong, é composta por materiais que possuem origem mineral como argamassas, concreto e cerâmicas. (PINTO, 1999; EC, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

2.5 GERAÇÃO

Alguns anos atrás não havia quaisquer indicadores para a ocorrência de perdas na construção civil e pouco se conhecia sobre a intensidade da geração de resíduos de construção e demolição, senão a frequência com que iam se formando **montanhas** de entulho nos ambientes urbanos. (PINTO, 1999)

“Países desenvolvidos e em desenvolvimento, que ampliam sempre o seu ambiente construído, tendem a consumir uma elevada quantidade de material e, por consequência, gerar uma quantidade grande de resíduos.” (JOHN, 1996 *apud* LEITE, 2001)

“Nos últimos anos, vêm sendo realizados levantamentos para definir a quantidade de resíduos gerados pela construção civil no Brasil. Estima-se que sejam geradas anualmente 68,5 milhões de toneladas destes resíduos no país.” (ÂNGULO *et al.*, 2003 *apud* LEITE, 2007)

De acordo Poon (1997) *apud* Motta (2007) na China, os dados apontam para uma geração diária de 22.000 toneladas de resíduos de construção no ano de 1991, que incluem as 16.000 toneladas dispostas em aterros, em vias públicas e em canais de deposição marinha.

De acordo com Leite (2005) a geração de resíduos de construção e demolição, alcançou números alarmantes e a tendência mundial é que estes valores aumentem ainda mais. É uma obrigação viabilizar uma utilização a estes resíduos.

Para Motta (2005) em diversos lugares no mundo o aumento da geração destes resíduos, vem gerando preocupações.

Nos Estados Unidos, calcula-se que, no ano de 1996, a produção de resíduos chegou a aproximadamente 136 milhões de toneladas, perfazendo um total per capita de 1,27 kg de material por habitante por dia, lembrando que não estão incluídos neste montante os resíduos de pavimentos e pontes. (EPA, 1998 *apud* MOTTA, 2005)

Observando que uma parte significativa dos dados relacionados às quantidades geradas são resultados diretos da definição de resíduos de construção e demolição em cada local, além da possibilidade de variação em função da estrutura industrial, de suas características tecnológicas de construção, de seu nível de desenvolvimento etc. (ÂNGULO *et al.*, 2002)

2.6 ORIGEM

A origem dos RCD e sua classificação são determinadas conforme as seguintes atividades, material de obras viárias, material de escavação, demolição de edificações, construção e renovação de edifícios e limpeza de terrenos, a composição dos RCD derivados destas atividades é diferente para cada país, devido à diversidade das tecnologias construtivas. (PINTO, 1999)

2.7 CONSTRUÇÃO

Segundo Ângulo (2000) nos serviços de construção civil, os resíduos de novas construções são originados pelas perdas físicas oriundas de canteiros de obras. Há também uma parcela das perdas que permanece incorporada na forma de espessuras, além de perdas usuais.

Andrade (1999) *apud* Ângulo (2000) caracteriza como desperdício a fração das perdas que excede o limite mínimo característico da tecnologia, considerada inevitável para determinado nível tecnológico. Já para Souza *et al.* (1999) *apud* Ângulo (2000) são as perdas de materiais como um consumo de materiais além do necessário à produção ou manutenção de um bem.

O processo de construção artesanal, predominante na construção civil brasileira, contribui para a existência de perdas consideráveis de materiais e mão de obra. Predominando o princípio da baixa produtividade e mau gerenciamento. (ZORDAN, 1997 e PINTO, 1986 *apud* ÂNGULO, 2000)

Fonte	Causa
Projeto	<ul style="list-style-type: none"> - Erro nos contratos. - Contratos incompletos. - Modificações de projeto.
Intervenção	<ul style="list-style-type: none"> - Ordens erradas, ausência ou excesso de ordens. - Erros no fornecimento.
Manipulação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> - Danos durante o transporte. - Estoque inapropriado.
Operação	<ul style="list-style-type: none"> - Erros do operário. - Mau funcionamento de equipamentos. - Ambiente impróprio. - Dano causado por trabalhos anteriores e posteriores. - Uso de materiais incorretos em substituições. - Sobras de cortes. - Sobras de dosagens. - Resíduos do processo de aplicação.
Outros	<ul style="list-style-type: none"> - Vandalismo e roubo. - Falta de controle de materiais e de gerenciamento de resíduos.

Figura 2.4 – Fontes e causas da ocorrência de resíduos de construção
Fonte: GALIVAN e BERNOLD (1994) *apud* ÂNGULO (2000)

2.8 DEMOLIÇÃO

Atualmente, há técnicas de demolição seletiva que preparam os processos de demolição para a retirada de certos materiais indesejáveis ou reaproveitamento de outros. Esta técnica pode ser empregada para obtenção de agregados reciclados de resíduos de demolição de melhor qualidade, retirando possíveis contaminantes, como o gesso. (WAHLSTROM *et al.*, 1996; RUCH *et al.*, 1997; SCHULTMANN *et al.*, 1997 *apud* ÂNGULO, 2000)

Para Leite (2007), o Brasil ainda possui um baixo índice de demolições de obras de construção civil, se comparados ao processo construtivo destas obras, e assim a predominância dos resíduos de construção civil, são oriundos do processo de construção.

Segundo Lauritzen (1998) *apud* Ângulo (2000) nos resíduos de construção e demolição oriundos de desastres naturais em cidades, tais como terremotos, podem conter resíduos tóxicos, como o amianto, incorporados em partículas finas.

2.9 DESPERDÍCIO

Conforme Leite (2001), o alto índice de desperdício, ocorrido na indústria da construção civil implicam em redução da disponibilidade futura de materiais e energia, criam demandas desnecessárias ao sistema de transporte e geram transtornos nos panoramas urbanos, principalmente dos grandes centros.

De acordo com Ângulo (2000) o Instituto Brasileiro de Tecnologia e Qualidade na Construção Civil (ITQC), obteve dados recentes de perdas de materiais nos processos construtivos, por meio da pesquisa nacional **Alternativas para redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras**, realizada com recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Perdas Materiais	Mediana	Mínimo	Máximo
Concreto usinado	9%	2%	23%
Aço	11%	4%	16%
Blocos e tijolos	13%	3%	48%
Cimento	56%	Nd	Nd
Cal	36%	Nd	Nd
Areia	44%	Nd	Nd

Figura 2.5 – Perdas de materiais em processos construtivos
Fonte: ÂNGULO (2000)

2.10 CONTAMINAÇÃO

Conforme EC (2000) *apud* Leite (2007) devem ser realizados estudos para poder avaliar o potencial e o impacto de contaminação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), tanto nos aterros como para outras finalidades, devem ser realizados já que a composição dos resíduos varia muito de um lugar para outro. É afetada por uma série de fatores, como, por exemplo, os materiais e as técnicas de construção e demolição empregadas.

Outro fator importante é a contaminação que o resíduo pode sofrer. No Brasil, caçambas colocadas junto ao meio fio são contaminadas por outros tipos de resíduos, como restos de comida, móveis velhos, plantas e vegetais em geral, entre outros. Além disso, o tempo de estocagem do resíduo é importante, pois pode possibilitar transformações como a hidratação das escórias e das cinzas de resíduo urbano, e que frequentemente torna ainda mais aguada a contaminação ambiental. (JOHN; ROCHA, 2003 *apud* LEITE 2007)

De acordo com Leite (2007) quando se trata da composição do resíduo de construção, deve ser dada atenção especial à existência de impurezas ou contaminantes. Este tipo de material pode provocar efeitos prejudiciais, tanto nas propriedades mecânicas do concreto reciclado, quanto na sua durabilidade.

“A variabilidade e a contaminação são grandes obstáculos no desenvolvimento das pesquisas e na difusão da reciclagem dos RCD.” (VON STEIN, 2000 *apud* LEITE, 2007)

2.11 COLETA

Conforme Pinto (1999) o conhecimento detalhado das características dos agentes coletores de RCD, da sua intensidade de atuação e de suas limitações de ação, torna-se

premissa para a essencial compreensão dos fluxos cumpridos pelos resíduos de construção e para a definição de metodologias adequadas para a sua gestão.

A geração intensa de RCD e outros resíduos, como os volumosos, que tem recebido a mesma solução de coleta e destinação, tem levado algumas municipalidades a desenvolverem ações especiais como operações **Cata-Treco**, **Cata-Bagulho**, **Bota-Fora**, e outras denominações. (PINTO, 1999)

2.12 TRANSPORTE

Um dos fatores, que elevam o custo do processo de reciclagem, é o custo do transporte do resíduo de construção civil, até a unidade de reciclagem. Para Leite (2001), o ideal é que as unidades de reciclagem sejam instaladas mais próximas a aterros, onde toda a infraestrutura de coleta e reciclagem deve estar presente. Assim facilitaria o transporte, consequentemente diminuindo custos, além de contribuir beneficemente para que os coletores de resíduos não percorram grandes distâncias para descartar os resíduos recicláveis.

2.13 DISPOSIÇÃO

No Brasil, quando coletados de forma legal, os resíduos da construção civil são encaminhados para disposição final adequada em aterros, que apresentam altos custos de operação, tanto econômicos como ambientais. Além disso, os RCD são um dos principais responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte. (ÂNGULO *et al.*, 2003 *apud* LEITE, 2007; MOTTA, 2005)

De acordo com Motta (2005) em diversos países do continente europeu, é cada vez menos tolerada a destinação de resíduos de construção civil em aterros, como forma de inibir essa ação e incentivar a reciclagem, novas leis vêm sendo instauradas e uma política de taxação de aterros vem sendo adotada.

Para Hendricks e Janssen (2001) *apud* Motta (2005) a destinação dos resíduos de construção para a disposição final não é uma alternativa correta. Para os pesquisadores, esses procedimentos resultam em desperdício de matéria-prima, emissão de poluentes indesejáveis e perdas de energia e espaço, embora essa seja a alternativa mais comum na gestão destes resíduos.

2.14 BOTA FORA

“Os bota-foras são áreas de pequeno e grande porte, privadas ou públicas, que vão sendo designadas oficial ou oficiosamente para a recepção dos RCD e outros resíduos sólidos.” (PINTO, 1999)

O quadro mais comumente encontrado nos municípios de médio e grande porte é a adequada disposição dos grandes volumes de RCD em aterros de inertes, também denominados de bota-foras. Constitui o problema mais significativo na destinação dessa parcela dos resíduos o inexorável e rápido esgotamento das áreas designadas para disposição. (PINTO, 1999)

Conforme Pinto (1999), os bota-foras formam, em conjunto com os aterros sanitários ou controlados para resíduos domiciliares (quando esta solução está presente), o sistema de aterros dos municípios.

2.15 DISPOSIÇÃO IRREGULAR

Um problema enfrentado nos municípios brasileiros é a alarmante quantidade de RCD que é depositada em aterros ilegais, entende-se como deposição irregular a realizada de forma contrária a lei, em áreas não autorizadas ou licenciadas a este fim. (SCHNEIDER, 2003)

Segundo Motta (2005) a preocupação com os imensos montantes de resíduos de construção gerados no Brasil vai além, em função de um agravante que é a disposição irregular, que ocorre principalmente em locais como vias, rios, córregos terrenos baldios e áreas de mananciais, o que contribui para a degradação urbana.

A deposição irregular decorre de uma lógica econômica que, para reduzir custos de produção, externaliza os custos de transporte e destinação dos RCD à toda a comunidade, pelo uso dos espaços comuns como vazadouros. A mera intensificação dos serviços de remoção dos RCD de vias e logradouros públicos, como aconteceu nos últimos dez anos, manteve a deposição irregular. (SCHNEIDER, 2003)

De acordo com Motta (2005) um volume aproximadamente de 70% do volume produzido acabou sendo descartado ilegalmente.

“O reaproveitamento e a reciclagem são soluções ideais para estes grandes volumes de resíduos da construção civil. Contudo, o destino final para os RCD nem sempre é o mais adequado. Muitas vezes os RCD são dispostos de forma ilegal, tanto no Brasil como no exterior.” (LEITE, 2007)

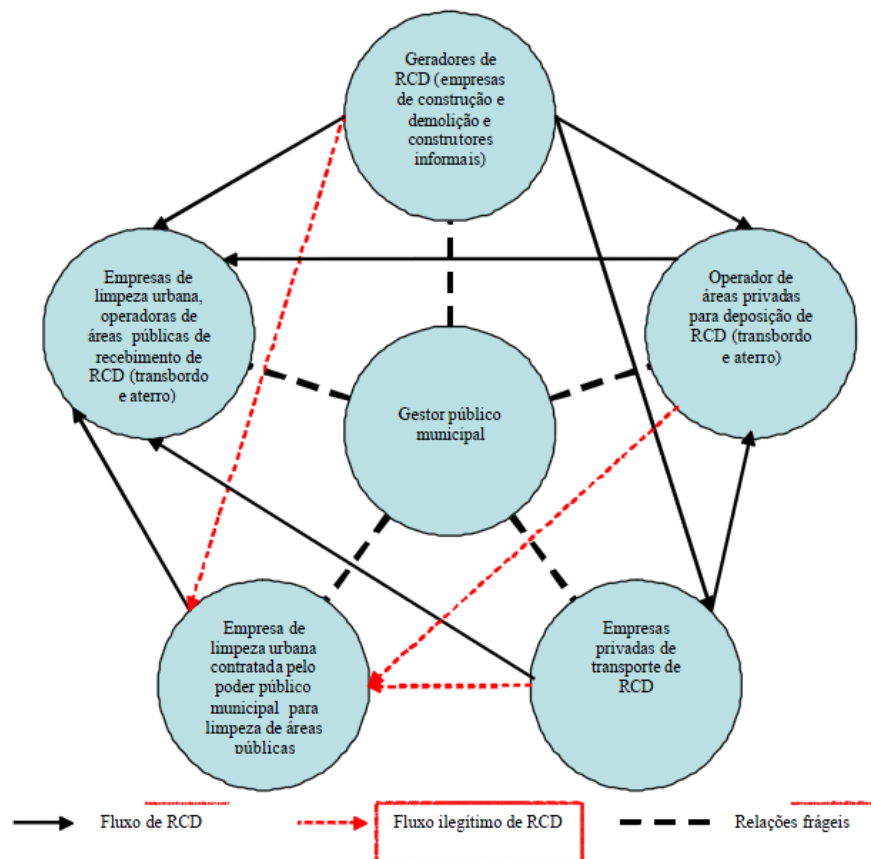


Figura 2.6 – Inter-relações dos atores envolvidos com a deposição irregular e fluxos de RCD
Fonte: SCHNEIDER (2003)

Conforme Schneider (2003) a lógica da deposição irregular do RCD verifica-se que a busca de menores custos por parte dos transportadores privados com a externalização dos custos de transportes e destinação delegando estas funções a outros atores e, a busca por lucros crescentes pelas empresas de limpeza urbana determinariam, direta e indiretamente, as ações que resultam na deposição irregular.

De acordo com Spencer (1989) *apud* Pinto (1999) as deposições ilegais de resíduos de construção e demolição alcançaram proporções epidêmicas no nordeste dos Estados Unidos da América (EUA), devido ao encerramento de aterros em algumas áreas e dificuldades de aceitação dos resíduos em instalações de incineração.

2.15.1 EXPORTAÇÃO

“Em São Paulo, uma parte significativa dos resíduos de construção chega a ser ‘exportada’ e depositada irregularmente em outras municipalidades da área metropolitana, e

esta distância adicional é somada aos custos de transportes e disposição.” (ÂNGULO *et al.*, 2002 *apud* MOTTA, 2005)

2.15.2 REMOÇÃO

De acordo com Schneider (2003) no município de São Paulo diferentes governos vêm enfrentando o problema da deposição irregular, com o investimento na remoção de RCD dos pontos críticos. Porém esse investimento não tem mostrado resultados satisfatórios, até pode estar agravando e contribuindo para a desordem urbana.

2.16 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O CONAMA

Segundo a resolução nº 307 do CONAMA os resíduos de construção civil são classificados de acordo com as seguintes classes. (BRASIL, 2002)

Classe A

Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Classe B

Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.

Classe C

Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

Classe D

Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

2.17 DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO EXTERIOR

A Holanda, a Bélgica e a Dinamarca introduziram medidas simples e consistentes para melhorar o sistema de tratamento de seus resíduos e hoje se destacam na questão de reaproveitamento e reciclagem dos RCD. (EC, 2000 *apud* LEITE, 2007)

De acordo com Leite (2007) nestes países somente de 10% a 20% dos resíduos de construção civil são destinados a disposição em aterros.

“Os países do sul da Europa, como Itália, Espanha e Portugal, possuem uma pequena parcela de reaproveitamento de seus RCD. As reservas naturais destes países fornecem qualidade e quantidade de agregados para a construção civil, por custos moderados. Assim, não existe nestes lugares um mercado desenvolvido para consumir estes materiais reciclados.” (EC, 2000 *apud* LEITE, 2007)

“Os estados americanos possuem autonomia para determinar as regulamentações e políticas de gerenciamento de seus resíduos, a destinação de construção e demolição em aterros tem sido cada vez menos tolerada pelos norte-americanos.” (EPA, 1998 *apud* LEITE, 2007)

De acordo com Pinto (1999) a Europa e o Japão devido a sua densidade demográfica e a falta de espaços para o alojamento de resíduos sólidos, possuem as políticas mais elaboradas e consolidadas, e em função de sua elevada industrialização e carência de recursos naturais, foram os pioneiros no desenvolvimento de esforços para o conhecimento e controle dos resíduos de construção e demolição.

De acordo com Pinto (1999) no Japão foi estabelecida a Lei de Reciclagem, que estabelece há alguns ramos industriais a necessidade de reciclagem dos seus resíduos, prevendo políticas específicas e o papel a ser desempenhado pelo estado. Entre estas indústrias está presente a indústria da construção civil.

2.18 DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS NO BRASIL

De acordo com Motta (2005), após coletados para disposição final adequada, os resíduos de construção são encaminhados para unidades de aterro. Segundo Ângulo *et al* (2003) *apud* Motta (2005), os resíduos de construção civil são os principais responsáveis pelo

esgotamento destes locais de destinação em cidades de médio e grande porte, uma vez correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos.

No Brasil, as políticas públicas voltadas ao gerenciamento de Resíduos de Construção Civil (RCC) buscam impulsionar as empresas geradoras de resíduos a tomarem uma nova postura gerencial e implementar medidas que visem a redução da quantidade de resíduos produzidos. Estas medidas, via de regra, ainda são consideradas como não usuais ou mesmo como desconhecidas no setor. (GESTÃO..., [20--])

Conforme Pinto (1999), no Brasil quando os RCC são depositados em aterros a porcentagem dos resíduos de construção civil em relação aos resíduos sólidos urbanos pode chegar a 70% em massa.

Muitas vezes, o esgotamento dos aterros pode implicar em dois tipos de problemas: um relacionado a gastos adicionais dos recursos públicos com desapropriações que visam a criação de novas áreas de destinação de resíduos, e outro à dificuldade de se encontrar locais adequados nas grandes cidades para a implementação destes novos aterros de resíduos, uma vez que áreas livres estão localizadas em distâncias remotas e, muitas vezes, pertencem a locais ambientalmente protegidos. (BODI *et al*, 1995 *apud* MOTTA, 2005)

2.19 IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS

Para Schneider (2003) os RCD gerados no Brasil não representam um alto risco ambiental em razão de suas propriedades químicas serem semelhantes aos agregados naturais e solos. Porém podem conter certos resíduos como óleos de maquinários ou pinturas e asbestos de telhas de cimento amianto, que diferem dessas características.

Os RCD dispostos inadequadamente poluem o solo, degradam paisagens que poderiam estar tornando nossas vidas mais significativas e constituem uma séria ameaça à saúde pública. O acúmulo de RCD em local inadequado atrai resíduos não inertes, oferecendo, simultaneamente, água, alimento e abrigo. Torna-se nicho ecológico de muitas espécies de vetores de patógenos, como ratos, baratas, moscas, vermes, bactérias, fungos e vírus. (SCHNEIDER, 2003)

“Já é notório que os RCD são de baixa periculosidade, mas o que as informações analisadas confirmam é que seu impacto se dá muito mais pelo excessivo volume gerado, mostrando que os municípios brasileiros de médio e grande porte vivem situação similar à das áreas urbanas densas da Comunidade Europeia, Japão e América do Norte.” (PINTO, 1999)

“Já os impactos em relação à drenagem urbana são mais extensos, ocorrendo desde a drenagem superficial, como visível, até a obstrução de córregos, um dos componentes do sistema de drenagem, tal como demonstrado.” (PINTO, 1999)

2.20 REAPROVEITAMENTO E RECICLAGEM

O reaproveitamento e a reciclagem são soluções ideais para estes grandes volumes de resíduos da construção civil. Contudo, o destino final para os RCD nem sempre é o mais adequado. Muitas vezes os RCD são dispostos de forma ilegal, tanto no Brasil como no exterior. (PINTO, 1999; EPA, 1998; EC, 2000 *apud* LEITE, 2007)

Para Von Stein (2000) *apud* Leite (2007) os resíduos de construção e demolição, apesar de suas particularidades tem chamado a atenção de muitos países devido a geração de grandes volumes destes materiais. A partir das décadas de 70 e 80 os custos para depositar estes resíduos em aterros aumentou muito, assim o setor público começou a buscar soluções alternativas como reaproveitamento e reciclagem.

A partir de 1984 a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) buscou novas alternativas para os resíduos da construção civil, a principal preocupação era assegurar uma sobrevida aos aterros existentes quando estes se encontravam praticamente esgotados, diante disso desenvolveram-se estudos para verificar a viabilidade da reciclagem dos resíduos da construção civil. (BODI *et al.*, 1995 *apud* LEITE, 2007)

3 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

3.1 AGREGADO RECICLADO

Conforme Leite (2007) a partir da reciclagem dos resíduos de construção e demolição, um novo produto é obtido, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil.

3.1.1 DEFINIÇÃO

De acordo com a resolução nº 307 do CONAMA o agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários e outras obras que requeiram materiais granulares. (BRASIL, 2002)

3.1.2 HISTÓRIA

O reaproveitamento de resíduos de construção já é praticado há muito tempo, pois os romanos já empregavam tijolos, telhas e louça cerâmica moída como pozolanas. (SANTOS, 1975 *apud* MOTTA, 2005)

Para Lima (1999) a reciclagem de resíduos de construção no Brasil iniciou-se nos anos 80, com a utilização de pequenos moinhos instalados durante a construção de edifícios, onde os resíduos de alvenaria eram reaproveitados para a produção de argamassas.

“Ao longo da década de 90, algumas usinas recicladoras foram implementadas em municípios brasileiros, sendo gerenciadas pelas prefeituras ou por particulares.” (MOTTA, 2005)

Para Lima (1999) *apud* Motta (2005) no século passado ocorreram grandes catástrofes, como exemplo, as guerras mundiais e terremotos, que intensificaram a prática de utilização do material reciclado.

Após a segunda guerra mundial a Alemanha possuía uma alta quantidade de destroços decorrentes dos bombardeiros em seu território, ao mesmo tempo que o governo alemão decretou ser prioridade a utilização destes resíduos na reconstrução da infraestrutura,

tornado o país pioneiro, na reciclagem de resíduos de construção civil utilizados em pavimentação. (LUND, 1993 *apud* MOTTA, 2005)

3.1.3 NORMALIZAÇÃO

Para Motta (2005) mesmo com a implantação das usinas recicladoras a partir da década de 90, a publicação das primeiras normas nacionais relacionadas aos agregados reciclados de resíduos de construção só ocorreu no ano de 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou quatro normas referentes aos agregados reciclados.

3.1.3.1 PMSP

De acordo com PMSP (2014), no município de São Paulo, a lei proíbe a deposição de entulho em vias e logradouros públicos e permite que cada imóvel gerador encaminhe o máximo de 50 kg de entulho por dia para ser recolhido pela Prefeitura através da coleta domiciliar convencional, desde que os resíduos estejam devidamente acondicionados. Outra opção é encaminhar o entulho para os **Ecopontos**, que são unidades para o descarte gratuito diário de até 1m³ (um metro cúbico) de entulhos, madeiras, podas de árvores e grandes objetos.

“Na medida em que são geradas quantidades superiores à estabelecida em lei, o gerador é o responsável pela remoção e pela destinação do entulho. Portanto, se faz necessário contratar o serviço legalizado das empresas transportadoras que operam com caçambas.” (PMSP, 2014)

Segundo a PMSP (2014), antes de contratar o serviço, é importante verificar, a lista das empresas cadastradas pela administração municipal, porque somente as regularizadas podem descartar o entulho em aterros de resíduos da construção, dando disposição final ambientalmente adequada aos materiais.

A nova política de gestão dos resíduos da construção civil da Prefeitura de São Paulo é implementada pelo **Plano Municipal de Gestão Sustentável de Entulho**. O plano – que já atende as novas diretrizes federais exigidas pelo governo federal dos municípios brasileiros pela Resolução N° 307/2002 do CONAMA – está aumentando a oferta de áreas para deposição regular dos resíduos da construção e demolição de pequenos geradores, além de facilitar e incentivar a reciclagem desses materiais. (PMSP, 2014)

O CONAMA por meio da resolução N° 307/2002 determina que, as construtoras devem adotar programas de gestão de resíduos e apresenta-los à Prefeitura no processo de licenciamento de obras de construção civil. (BRASIL, 2002)

Conforme a PMSP (2014), se o gerador adequar-se, estará fazendo a sua parte para colaborar com a construção de uma cidade mais bonita e evitará ser responsabilizado pela deposição irregular de entulho na cidade.

3.1.3.2 ABNT

Conforme Leite (2007) a normalização da ABNT tratam sobre os aterros para resíduos sólidos de construção civil, a área de reciclagem para resíduos sólidos de construção civil, os procedimentos para execução de camadas de pavimentação com agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil e os requisitos destes agregados para utilização em pavimentação e concreto sem função estrutural.

3.1.4 CLASSIFICAÇÃO

Segundo Motta (2005) no Brasil são produzidos dois tipos de agregado reciclados os tipo concreto e argamassa **denominado como cinza ou branco, composto basicamente por concreto e argamassa** e o misto **muitas vezes denominado de vermelho, cuja composição inclui diversos materiais pertencentes à Classe A** da Resolução n° 307 do CONAMA de 2002.

3.1.4.1 QUANTO A PORCENTAGEM DE CIMENTO NO RCD

De acordo com Lima (1999) *apud* Leite (2001) a classificação pode ser feita, também, com base no teor de impurezas existente nas partidas de resíduos que chegam nas usinas, como acontece nas recicladoras implantadas no país. Ou, ainda, com base no tipo de **componente predominante** no resíduo.

Conforme Lima (1999) *apud* Leite (2001) após pesquisas foi sugerida uma classificação para o resíduo de construção e demolição no qual está baseada nos seguintes fatores: os tipos diferentes de resíduo disponíveis para a reciclagem; as especificações para os agregados reciclados em seus atuais e potenciais; sistemas de classificação já disponíveis no Brasil e no exterior; condições de operação das centrais de reciclagem; experiências

estrangeiras onde a reciclagem já está implantada a mais tempo; necessidade de consumir quantidades significativas de resíduos. O autor elaborou uma proposta com seis classes de resíduos de construção e demolição, sendo estas:

Classe 1: Resíduo de concreto sem impurezas – material composto de concreto estrutural, simples ou armado, com teores limitados de alvenaria, argamassa e impurezas;

Classe 2: Resíduo de alvenaria sem impurezas – material composto de argamassas, alvenaria e concreto, com presença de outros inertes como areias, pedras britadas, entre outros, com teores limitados de impurezas;

Classe 3: Resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas – material composto de argamassa, concreto e alvenaria com baixo teor de materiais cerâmicos, podendo conter outros materiais inertes como areia e pedra britada, entre outros, com teores limitados de impurezas;

Classe 4: Resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação – material composto basicamente pelos mesmos materiais do resíduo classe 2, porém admite a presença de determinada porcentagem em volume de terra ou terra misturada à vegetação. Admite maior teor de impurezas.

Classe 5: Resíduo composto por terra e vegetação – material composto basicamente por terra e vegetação, com teores acima do admitido no resíduo de classe 4. Admite presença de argamassa, alvenarias e concretos, e outros materiais inertes, além de maior teor de impurezas que os anteriores;

Classe 6: Resíduo com predominância de material asfáltico – material composto basicamente de material asfáltico, limitando-se a presença de outras impurezas como argamassas, alvenarias, terra, vegetação, gesso, vidros e outros.

De acordo com ABNT (2004c), os resíduos sólidos de construção civil, que são classificados conforme a classe A da resolução N° 307 do CONAMA, oriundos de área de reciclagem de acordo com a ABNT NBR 15114, na forma de agregados destinados às aplicações pavimentação e concreto sem função estrutural, deverão ser classificados conforme as categorias apresentadas nos itens 3.1.4.1.1 e 3.1.4.1.2.

3.1.4.1.1 AGREGADO DE RESÍDUO DE CONCRETO (ARC)

“É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de **no mínimo** 90% em massa de fragmentos à base de cimento *Portland* e rochas.” (ABNT, 2004d)

Segundo a ABNT (2004d) considera-se agregado tipo Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) aquele que apresenta a soma dos percentuais de fragmentos que apresentam

pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume e fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume, maior ou igual a 90%.

3.1.4.1.2 AGREGADO DE RESÍDUO MISTO (ARM)

“É o agregado de reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.” (ABNT, 2004d)

De acordo com a ABNT (2004d), o agregado tipo Agregado de Resíduo Misto (ARM), e aquele que apresenta a soma dos percentuais de fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume e fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume, menor que 90 %.

Os resíduos com maior composição de materiais cerâmicos, ao serem quebrados, possuem uma maior área específica, necessitando por vezes de teores mais elevados de água para sua lubrificação e perfeita compressão do material, além de serem geralmente mais porosos que os cimentícios, requerendo maior quantidade de água, para determinar a umidade ótima de compactação, uma vez que o agregado absorve parte da água introduzida para a execução do ensaio, que irá simular o comportamento do material na execução de camadas de pavimentos. (BEJA, 2013)

3.1.4.2 QUANTO A COR

Conforme a origem dos resíduos de construção civil, os agregados reciclados apresentam **cores**. Quando há uma maior predominância de resíduos de concretos e argamassas de cimento *Portland* na composição do agregado, este se aproxima da cor **cinza** ou **branco**, já quando há predominância de solos e materiais cerâmicos, há predominância da cor **vermelha**. Este é um dos critérios de classificação de agregados reciclados de RCC.

Ângulo *et al.* (2003) *apud* Motta (2005) após estudos e comparações dos agregados reciclados da usina recicladora da PMSP, constataram características físicas similares entre os agregados branco e vermelho, chegando à conclusão que esta classificação de cores é pouco precisa.

3.1.5 CARACTERÍSTICAS

De acordo com Beja (2013), uma característica dos resíduos de construção civil e demolição, é a heterogeneidade, tanto nas frações granulométricas produzidas, com variados tamanhos e graduações, quanto em sua natureza de composição que, por muitas vezes, devido ao processo de desconstrução, ou de descarte, e também pela cultura construtiva, podem encontrar-se contaminados por materiais inorgânicos metais e/ou ligas metálicas ou orgânicos por exemplo madeira, papel e outros.

Com grande relevância no que tange às características de agregados convencionais, como a BGS, para uso principalmente em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito, a forma e a resistência das partículas mais graúdas (maior que 4,8 mm) envolvidas no material contribui significativamente no comportamento ao cisalhamento quando submetidos às cargas aplicadas a uma determinada estrutura de pavimento. (BEJA, 2013)

As partículas de forma cubica de agregado reciclado, resultam em misturas com maior resistência ao efeito das cargas e conseqüentemente, maior desempenho do material. Os agregados reciclados que possuem maior porosidade, tendem a apresentar menor resistência ao cisalhamento, influenciando as misturas recicladas. (LEITE, 2007; MOTTA, 2005)

Segundo Beja (2013), um fator preponderante para um bom desempenho de materiais de pavimentação, é a curva granulométrica no Brasil, os procedimentos normativos presentes na PMSP ETS 001 e ABNT NBR 15115 referentes aos agregados reciclados utilizados em pavimentação não impõe faixas (superior e inferior), os critérios são quanto à sua distribuição, reservando-se a parâmetros de controle granulométrico como:

- (i) Coeficiente de uniformidade (Cu);
- (ii) Coeficiente de curvatura (Cc);
- (iii) Diâmetro máximo dos grãos (D_{máx});
- (iv) Porcentagem de passantes na peneira 0,42 mm (porcentagem abaixo da peneira n°40).

O processo de cominuição (britagem ou moagem) e o tipo de dispositivo utilizado na redução de tamanho (britadores de impacto, mandíbula, cônicos, moinhos de rolo, entre outros) interfere diretamente na graduação dos agregados reciclados. (BEJA, 2013)

Segundo Tseng (2001) *apud* Beja (2013), ao analisar as curvas granulométricas de agregados reciclados, produzidos de RCD oriundos da demolição de pavimentos de concreto, constatou semelhança ao tipo de britador (mandíbula e impacto), não evidenciando um melhor desempenho quanto ao uso de determinado tipo de britador em face ao outro.

O processo de compactação é usado por vários segmentos da engenharia e pode ser entendido como o processo introduzido por solicitação mecânica para redução dos vazios de um material qualquer, ocorrendo à expulsão do ar nos vazios dos poros. Este difere do adensamento, que se estende pelo processo de densificação de um material, por expulsão lenta da água dos vazios. (BEJA, 2013)

A energia utilizada no processo de compactação aplicado ao RCD de categoria mista em laboratório resulta em variações na forma, graduação, no peso específico seco e no teor e umidade. Conforme há o incremento da energia (intermediária ou modificada), mais esta se desloca para a esquerda, aumentando a inclinação do pico. (LEITE, 2007)

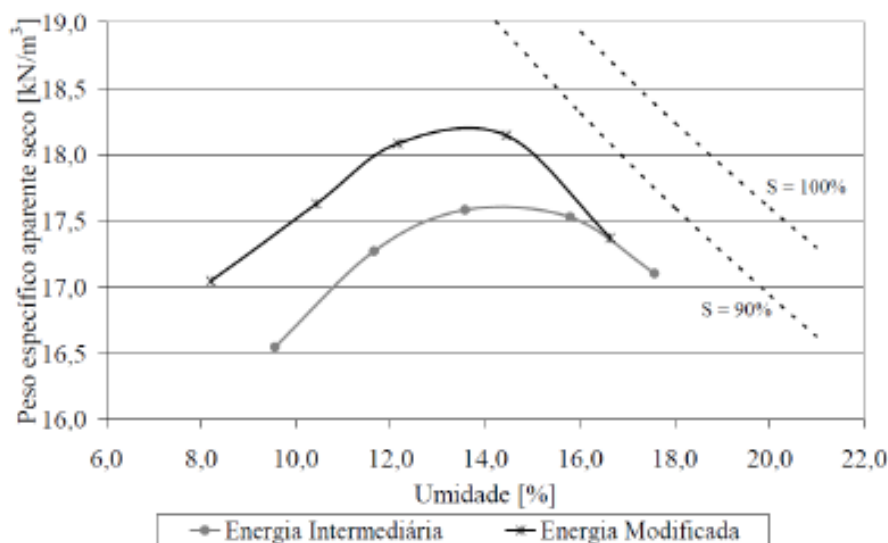


Figura 3.1 – Efeito da energia, intermediária: curva de Proctor
Fonte: LEITE (2007)

Segundo Beja (2013), o fato reforça a importância da energia de compactação elevada, obtendo-se uma maior quebra dos grãos durante a execução e com a consequente diminuição dos vazios. Minimizando o problema de degradação durante a vida útil de um pavimento e evitando possíveis afundamentos, ou mesmo rupturas indesejadas.

3.1.6 PESQUISAS

Para Motta (2005) conforme há o aumento na implantação de novas usinas recicladoras e com a criação de normas para a produção e utilização dos agregados reciclados, os investimentos e pesquisas relacionados ao tema vem sendo feitos em todo o mundo.

Em alguns países como Holanda, Alemanha, Dinamarca e a própria Bélgica, já há um conhecimento consolidado sobre o material e/ou normas avançadas para sua aplicação em vários serviços que podem variar em função de características particulares como ofertas de materiais de construção e de resíduos, disponibilidade de locais para disposição final ou rigor das normas relativas ao tipo de obra. (LIMA, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

3.1.7 INCENTIVOS

Na Inglaterra e na Bélgica, há incentivo por intermédio de subsídios financeiros nesta área, onde estes são disponibilizados para a compra de equipamentos, no caso dos ingleses, e para o investimento em companhias de reciclagem que processam resíduos, para os belgas. (SCHNEIDER, 2003 *apud* MOTTA, 2005)

“Na Holanda, o uso de materiais reciclados é amplamente promovido pelas autoridades e indústrias do país, principalmente em função do custo de disposição final de resíduos e das limitações impostas à extração de materiais naturais”. (HENDRICKS; JANSSEN, 2001 *apud* MOTTA, 2005)

3.1.8 REAPROVEITAMENTO/RECICLAGEM

De acordo com a resolução do CONAMA (2002) somente os resíduos da classe A podem ser reciclados para a transformação em agregados. Os resíduos das classes B, C e D não podem ser utilizados para a produção de agregados reciclados. (BRASIL, 2002)

Para Bodi *et al.* (1995) *apud* Motta (2005) cerca de 80% de todo resíduo de construção gerado é possível ocorrer a reciclagem. Para a ALT-MAT (1999) *apud* Motta (2005) esse número aumenta para cerca de 90% dos resíduos produzidos.

“De forma geral, os números relacionados à reciclagem no Brasil não são significativos, pois equivalem a menos de 5% dos resíduos de construção gerados.” (CIOCCHI, 2003 *apud* MOTTA, 2005)

No mundo há lugares, onde a reciclagem destes materiais atinge números expressivos, como no caso da cidade de Sidney na Austrália onde 80% dos resíduos de demolição são reciclados. (UTS, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

3.1.8.1 PROCESSO

O tratamento e reciclagem de resíduos da construção e demolição, as técnicas de processamento estão intimamente ligadas às técnicas de mineração ou produção de agregados naturais. (ÂNGULO, 2005 *apud* BEJA, 2013)

Comumente no Brasil, existe uma série de procedimentos que convencionalmente são empregadas as plantas de reciclagem. A norma NBR 15114 (ABNT, 2004b) descreve os principais requisitos para instalação das plantas de reciclagem. (BEJA, 2013)

Para o uso de agregados reciclados de construção e demolição, as especificações, tanto nacionais quanto internacionais, preconizam requisitos importantes para manutenção das características funcionais e estruturais de uma camada de pavimento com o uso destes agregados, principalmente como camada granular de comportamento mecânico similar à de uma BGS. No entanto, tais recomendações apenas podem ser atingidas caso o RCD seja processado, beneficiado e reciclado. (BEJA, 2013)

Segundo a bibliografia em geral, os procedimentos de reciclagem demandam a realização das seguintes etapas: (i) coleta ou concentração das fases e sua caracterização inicial quanto à sua natureza, (ii) separação manual ou mecanizada para retirada de contaminantes orgânicos, como papéis e madeira, (iii) separação magnética, ou remoção de contaminantes inorgânicos, como materiais metálicos ferrosos, (iv) cominuição por britagem (esforços compressivos ou de impacto), a depender do dispositivo de cominuição, (v) classificação por tamanho, com o emprego de peneiras e correias transportadoras e (vi) concentração do produto final em pilhas ou baias, a depender do tamanho máximo nominal do agregado. (ÂNGULO, 2005; LEITE, 2007; MOTTA, 2005; TSENG, 2010 *apud* BEJA, 2013)

3.1.8.1.1 CONCENTRAÇÃO

A operação de concentração se caracteriza como a separação dos diferentes componentes do resíduo de construção de acordo com as classes estipuladas pelo CONAMA por processos como catação ou separação magnética, podendo ocorrer antes e ou depois da operação de redução. (MOTTA, 2005)

3.1.8.1.2 BRITAGEM/COMINUIÇÃO

A operação de britagem ou cominuição, consiste em reduzir as dimensões do material para adequar o tamanho dos grãos à sua finalidade ou as operações subsequentes, após este processo os grãos se tornam mais resistentes a compressão. (MOTTA, 2005)

Conforme Lima (1999) *apud* Motta (2005) existem diferentes equipamentos utilizados no processo de britagem, sendo os mesmos muitas vezes uma adaptação dos utilizados no processo de mineração. De acordo com o tipo de britagem podemos influenciar nas características do agregado reciclado como graduação, forma e resistência dos grãos.

3.1.8.1.3 PENEIRAMENTO

A operação de peneiramento separa os grãos granulometricamente, através de sua passagem por peneiras. (MOTTA, 2005)

“A operação de peneiramento pode ser suprimida do processo de reciclagem nos casos em que haja o interesse por material sem classificação granulométrica, sendo este comumente denominado como **brita corrida**.” (MOTTA, 2005)

3.1.8.1.4 OPERAÇÕES AUXILIARES

De acordo com Motta (2005) as operações auxiliares consistem nos procedimentos que visam dar assistência ao processo de reciclagem como exemplo, o uso de esteira para transporte de material e os sistemas nebulizadores.

3.1.8.1.5 USINA RECICLADORA

De acordo com Motta (2005) na década de 90, foram implantadas algumas usinas recicladoras em municípios brasileiros, geralmente sendo gerenciados pelas prefeituras ou por particulares.

Usinas de reciclagem de RCC realizam o processo de recuperação que evita o desperdício de matéria prima mineral passível de reutilização na construção civil. A distribuição das usinas de reciclagem de RCC, no Brasil, em 2009, apresentou concentrações na região Sudeste, particularmente no estado de São Paulo. (MELO, 2011)

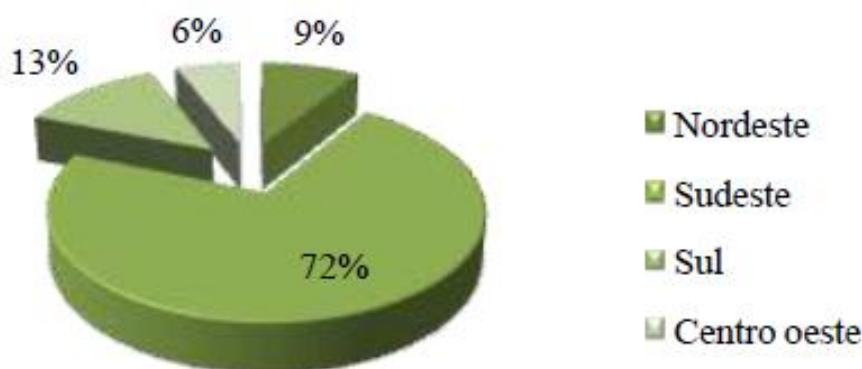


Figura 3.2 – Unidades de Reciclagem de RCC por Região do Brasil
 Fonte: MIRANDA *et al.* *apud* MELO (2011)

Conforme Moreira (2001) *apud* Melo (2011) a determinação do local de implantação de uma usina de reciclagem de RCC é uma decisão estratégica e faz parte do processo de planejamento, independente do agente financiador. A iniciativa privada, visa os requisitos de maior rentabilidade com menor custo, parâmetro que pode fugir ao setor público em virtude do caráter social ou das necessidades de crescimentos regionais.

Segundo Muther (1978) *apud* Melo (2011) o local para implantação das usinas de reciclagem de RCC deve permitir minimizar o transporte, eliminar pontos críticos da produção e suprimir demoras entre as operações. Descuidar estas etapas do planejamento significa perder tempo, provocar ociosidade dos equipamentos e interrupção no trabalho dos empregados. O produto a gerar e a quantidade a produzir são vistos como elementos fundamentais para a análise.

As usinas de reciclagem de RCC são compostas por combinações de equipamentos de britagem, promovendo a rebitagem, fricção e lavagem, que visam atender aos requisitos técnicos solicitados para os agregados reciclados de RCC quando do seu emprego. (MELO, 2011)

3.1.8.2 NO EXTERIOR

De acordo com EC (2000) *apud* Leite (2007) há levantamentos que afirmam que 25% dos resíduos de construção e demolição gerados na Europa são reciclados.

De acordo com o EPA (1998) *apud* Motta (2005) os Estados Unidos da América (EUA), possui aproximadamente 3500 unidades de reciclagem.

Na tabela abaixo encontram-se as porcentagens reutilizadas ou recicladas dos resíduos de construção civil em países da União Europeia, de acordo com a EC (1999) *apud* Motta (2005)

País	Porcentagem reutilizada ou reciclada [%]
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Austria	41
Suécia	21
Alemanha	17
França	15
Itália	9
Espanha	< 5
Grécia	< 5
Irlanda	< 5
Portugal	< 5

Figura 3.3 – Porcentagem reutilizada ou reciclada em países da União Europeia
Fonte: EC (1999) *apud* MOTTA (2005)

Conforme Melo (2011) os objetivos internacionais para a produção do agregado reciclado são voltados para a relação de igualdade entre os requisitos técnicos e comerciais dentre os produtos naturais e reciclados, incentivando a certificação dos produtos e a paridade entre os componentes **reciclados** ou **naturais**. Principalmente normalizar a proporção de agregado reciclado a ser adicionada para uso, observando-se as condições de exposição do material impostas pelo ambiente. A recomendação está em observar a matéria prima (RCC) e o produto a comercializar.

3.1.8.3 NO BRASIL

O Brasil de acordo Affonso (2005) *apud* Silva (2009) encontra-se ainda em um estágio incipiente em se tratando de reciclagem de resíduos.

De acordo com Melo (2011) os agregados reciclados são vistos de modelo significativamente diferente entre as nações, uma vez que devem apresentar o mesmo desempenho dos agregados naturais apesar das diversidades geográficas e ambientais. Nacionalmente, o agregado reciclado produzido em usinas de reciclagem está associado à imagem de produto reciclado, possuindo terminologia normatizada pouco difundida. Seu critério de identificação se refere ao teor da substância que predomina na composição, referência que também determina o seu emprego.

Segundo Melo (2011) as diretrizes brasileiras não estabelecem relações com as necessidades de consumo do agregado reciclado *in natura* ou sob forma de artefatos. No Brasil, falta uma legislação que obrigue a utilização do agregado reciclado na incorporação de construções sempre que existam procedimentos de demolição. Em particular, essas ausências contribuem para a reduzida percepção de responsabilidade do gerador quanto aos impactos ambientais negativos **urbanos ou não** provocados pelo RCC.

3.1.9 UTILIZAÇÃO

Conforme o ALT-MAT (1999) *apud* Motta (2005) o uso de materiais alternativos deve aumentar consideravelmente no futuro em virtude de legislações ambientais mais severas e da escassez de agregados naturais.

Para Motta (2005) os agregados reciclados têm a função de substituir parcialmente ou totalmente o material natural empregado.

De acordo com a UTS (1999) *apud* Motta (2005) as maiores diferenças entre o agregado natural e reciclado são a forma do grão, textura superficial, densidade e absorção de água.

De acordo com ALT-MAT (1999) *apud* Motta (2005) a utilização de materiais reciclados deve aumentar consideravelmente no futuro em virtude de legislações ambientais mais severas e da escassez de agregados naturais. O processo de reciclagem pode ser separado em quatro etapas, concentração, cominuição, peneiramento e auxiliares.

“Os agregados reciclados podem ser utilizados em diversos serviços de engenharia como camadas drenantes **como ausência de finos**, lastro para assentamento de tubos ou de guias, envelopamento de galerias e estilização de solos expansíveis ou com baixa capacidade de suporte.” (BRITO FILHO, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

“Os agregados reciclados também podem ser empregados em regularização e cascalhamento de ruas de terra, sendo vantajosos tecnicamente neste tipo de situação em relação às britas corridas comuns em virtude de sua coesão proveniente de reações pozolânicas que o tornam menos erodíveis.” (BRITO FILHO, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

Os agregados reciclados de resíduos de construção são empregados em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimentos. (MOTTA, 2005)

De acordo com Motta (2005) após pesquisa de mercado com os preços dos materiais para a camada de base para pavimentos praticados pela PMSP, com base na tabela vigente de janeiro de 2005 foi realizado um comparativo entre os valores por metro cúbico com os agregados reciclados e de outros materiais convencionais utilizados em pavimentos, com uma distância de transporte de 8 km.

Material empregado	Preço [R\$/m ³]
Brita graduada	52,74
Brita corrida comum	45,03
Agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil	43,50 ^(e)

^(e) Não é especificado se o preço se refere a agregados reciclados mistos ou de concreto. Sabe-se somente que o preço engloba o fornecimento de material e o serviço para uma distância de transporte de até 8,00km.

Figura 3.4 – Preço de base de pavimento executada pela PMSP (janeiro de 2005)

Fonte: PMSP (2005) *apud* MOTTA (2005)

4 RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

De acordo com *Federal Highway Administration* (FHWA) (1997) *apud* BARRETA e FORTES (2011) a reciclagem a quente com mistura asfáltica consiste em, um processo no qual ao pavimento asfáltico recuperado, conhecido como ***Reclaimed Asphalt Pavement*** (RAP) acrescentam-se novos materiais, gerando assim uma nova mistura asfáltica.

Conforme WIRTGEN (2012) os procedimentos de remoção das camadas de revestimento asfáltico existente num pavimento com uma ruptura em determinada profundidade do revestimento, no Brasil é chamado de **Revestimento Asfáltico Recuperado** (RAR) equivalente ao RAP.

4.1 ORIGEM

De acordo com Balbo (2007) devido ao aumento da produção de material fresado, é cabível uma solução para sua destinação final, e essa alternativa envolve as obras que utilizam misturas asfálticas como material de construção. Com essa realidade nasce a reciclagem de pavimentos asfálticos como opção econômica e ambiental sustentável, visto que apresenta uma finalidade para o material fresado, e em certos casos reaproveitamento de ligantes e também apresenta economia de energia.



Figura 4.1 – Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
Fonte: FHWA (2014)

Conforme demonstrado o resíduo de asfáltico de petróleo é obtido por meio da fresagem de camadas de pavimentos flexíveis, que no processo de reciclagem este material passa por um processo de beneficiamento, onde sofre uma britagem para se adequar a legislação vigente. O produto final é o agregado de RAP que apresenta um comportamento ímpar, pois muitas vezes o mesmo se comporta como uma camada granular, e outras como uma camada asfáltica.

4.2 FRESAGEM

O termo fresagem define à técnica de desbaste ou corte de metais, ou outras peças, por intermédio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de múltiplos ângulos, em sucessivo movimento giratório. (BONFIM, 2000)

O conceito de fresagem, no meio rodoviário, pode ser entendido como o corte de uma ou mais camadas do pavimento com o uso de equipamento denominado fresadora, dotado de cortador giratório, por processo mecânico contínuo.

Conforme Alvim (2001) *apud* Araújo (2004) os primeiros registros de serviços de fresagem de revestimentos asfálticos, com estudos que viabilizam o reaproveitamento do material fresado, datam a década de 60, nos países europeus, se destacando a Alemanha Ocidental, que no período pós-guerra encontrava-se com sua malha viária praticamente deteriorada, malha esta recuperada anos após por intermédio do Plano Marshall.

De acordo com Araújo (2004) novas fresadoras e usinas de reciclagem surgiram e consequentemente diminuíram os problemas decorrentes do processo de reciclagem dos pavimentos e atualmente estão disponíveis verdadeiros comboios de reciclagem *recycling train*, equipamentos sofisticados e de grande desempenho, que fresam, corrigem a granulometria do fresado, incorporam os aditivos como, emulsão, cimento, cal etc. e executam a compactação da camada reciclada.

Outro meio para obtenção do RAP é por intermédio do desmonte com martelos, que pode ser pelo simples arranque do material com utilização de equipamentos mecânicos, como retroescavadeiras, tratores ou pás carregadeiras e etc., ou equipamentos de mão, como picaretas e alavancas. (DAU, 2001)

4.3 RECICLAGEM

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação onde toda, ou parte da camada do pavimento existente, é reaproveitada na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais, permitindo assim obter um pavimento com características semelhantes ou superiores ao pavimento antigo e que atendam as especificações de projeto.

É essencial observar a diferença entre reciclagem e fresagem. A reciclagem de pavimento é uma técnica de restauração, enquanto a fresagem do pavimento é uma operação onde o pavimento, ou parte dele, é cortado através de um equipamento dotado de um cortador giratório empregando movimento rotativo. A fresagem pode ser feita a frio ou a quente. Dá-se o nome de termo-reperfilagem quando o revestimento é aquecido e compactado para corrigir a deformação nele existente, e o termo regeneração quando há aquecimento do revestimento, seguido de escarificação e nivelamento. (ALVIM, 1999)

Ao longo dos anos, desde o seu surgimento, a reciclagem tem se mostrado como uma boa alternativa de reabilitação de pavimento. Diferentes métodos de reciclagem foram desenvolvidos especificamente para a situação do pavimento existente.

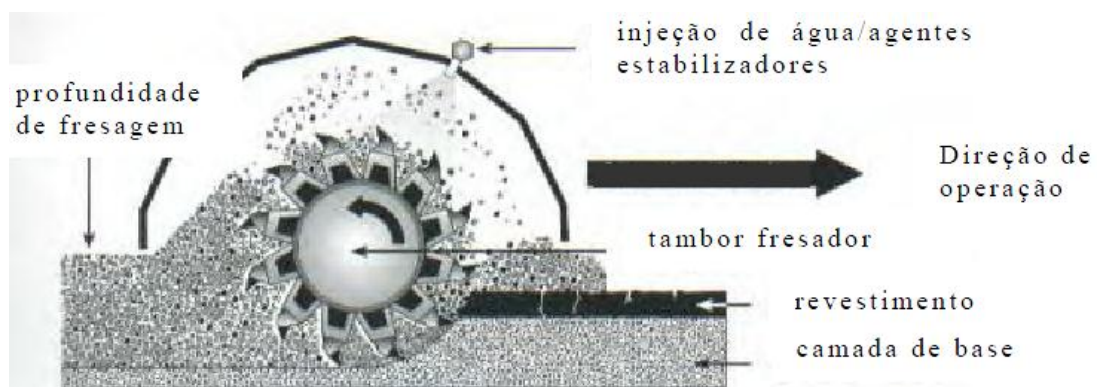


Figura 4.2 – Detalhe do processo de fresagem/reciclagem

Fonte: ARAÚJO (2004)

4.4 TIPOS DE RECICLAGEM

De acordo com Araújo (2004) a operação de reciclagem de pavimentos é classificada de diversas maneiras, entre outras por meio do tipo de pavimento existente, do uso da mistura, da profundidade de corte, do tipo de fresagem, do local de processamento etc.

Geralmente, os autores classificam as técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos em duas modalidades, que são as técnicas de reciclagem a quente e a frio, que por sua vez podem ser processadas no próprio local, ou seja, *in situ*, ou em usina apropriada.

4.4.1 RECICLAGEM A FRIO

A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento asfáltico existente é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado por meio da confecção de uma nova camada superficial. Este método permite a correção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações na camada superficial. Permite também a possibilidade de se corrigir problemas de rugosidade superficial, melhorando o atrito entre a superfície de rolamento e os pneus dos veículos. As máquinas utilizadas na reciclagem a frio são autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura pré-determinada. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

4.4.2 RECICLAGEM A QUENTE

A reciclagem a quente consiste no método no qual o pavimento asfáltico existente é removido por intermédio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente determinada que é depois transportada para um local de estocagem para que seja reciclada em usina.

4.4.3 RECICLAGEM A QUENTE IN SITU

Conforme Lima (2003) o processo de reciclagem de misturas asfálticas a quente realizada *in situ* pode ser estipulada como um processo de correção da superfície asfáltica do pavimento existente. Este processo é realizado conforme as seguintes etapas remoção mecânica da superfície asfáltica, por meio de aquecimento e consequente amolecimento (fresagem a quente). Após estas etapas a superfície é misturada com o ligante asfáltico,

agregados virgens e agentes rejuvenescedores. Concluído até o presente, a mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento restante.

A reciclagem a quente *in situ* pode ser feita com uma operação de uma passagem única do equipamento reciclador, que combina o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é recompactado, seguido da aplicação de uma nova mistura asfáltica. (TERREL *et al.*, 1997 *apud* LIMA, 2003)

Para Lima (2003) há três processos básicos de reciclagem a quente *in situ*:

- (i) Escarificação com aquecimento (*Heater-scarification*), no qual o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado;
- (ii) Repavimentação (*Repaving*), onde é utilizado o mesmo procedimento citado acima, com a adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada;
- (iii) *Remixing*, processo similar aos anteriores, porém com um aquecimento mais efetivo, permitindo a colocação de revestimento mais espesso, e uma melhoria no revestimento velho com correções na granulometria do agregado ou ajustes nas propriedades do ligante.

4.4.4 RECICLAGEM DE CAMADAS DO PAVIMENTO

De acordo com Lima (2003) o processo é constituído da reciclagem incorporando as camadas estruturais do pavimento e a camada asfáltica de rolamento, com ou sem adição de novos materiais, produzindo uma nova camada de base estabilizada tem sido indicada na reabilitação de pavimentos deteriorados. A técnica consiste em uma variação do método de reciclagem a frio, diferenciando-se deste pelo fato de se incorporar diferentes tipos de aditivos tais como: cal hidratada, cimento, agregados, emulsões, agentes químicos como exemplo polímeros e fibras sintéticas entre outros.

Estes aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo (Araújo *et al.*, 2001). Estudos realizados por Soares *et al.* (1999, 2000) mostram que a incorporação de brita as camadas de base tem quase sempre aumentado o desempenho à resistência a deformação permanente, porém não indicando necessariamente aumento de módulo de resiliência. (LIMA, 2003)

A reciclagem com a incorporação de material, na maioria das vezes atinge profundidades entre 250 mm a e 305 mm conforme Huffman *et al.* (1997) e Kandhal (1997) respectivamente. A maior vantagem deste procedimento é a possibilidade reparar os defeitos

estruturais presentes na estrutura do pavimento, principalmente nas camadas abaixo do revestimento e somando todas as outras vantagens dos métodos anteriormente mencionados. (LIMA, 2003)

4.5 DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE RECICLAGEM

Conforme Lima (2003) o profissional de reabilitação de pavimentos precisa determinar o melhor método de reciclagem a ser adotado ao seu caso, este método vai depender dos tipos de defeitos que o mesmo apresenta e quanto a extensão e a severidade dos mesmos. Fundamentados em defeitos de superfície, deformações, trincamentos, correções de afundamentos do tipo trilha-de-roda, problemas nas camadas de base e/ou sub-base, e problemas relacionados à rugosidade da superfície de rolamento como auxílio o *The Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)* realizou um guia de sugestões para escolha da alternativa de reciclagem.

Condição do Pavimento		Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente "in situ"	Reciclagem a frio "in situ"
Defeitos de superfície				
	Desagregação	x	x	
	Exsudação	x	x	
	Empolamento	x	x	
Deformação				
	Corrugações	x	x	
	Afundamento de trilha de roda	x	x	
	Depressões	x		x
Trincamento (associado a carga)				
	Couro de jacaré	x		x
	Longitudinal(na trilha de roda)	x	x	x
	Trinca de borda	x		x
	Trincamento parabólico	x	x	
Trincamento (não associado à carga)				
	Blocos (retração)	x		x
	Longitudinal (juntas)	x	x	
	Transversal (térmica)	x		x
Reflexão de trincas		x		x
Remendos de manutenção		x		x
Qualidade de rolamento				
	Desnível generalizado	x	x	
	Adensamentos	x	x	
	Afundamentos localizados	x	x	

Figura 4.3 – Sugestões para a seleção de Métodos para reciclagem

Fonte: Adaptado de LIMA (2003)

4.6 ESPUMA DE ASFALTO

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

“Um grupo de tecnologias de misturas mornas e semimornas considera a adição de uma pequena quantidade de água na mistura para a formação de uma espuma com o asfalto quente.” (MOTTA, 2011)

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. (PMSP, 2009)

De acordo com Bonfim (2012) 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.

A figura 4.4 ilustra o esquema da câmara de expansão durante o processo da obtenção da espuma de asfalto.

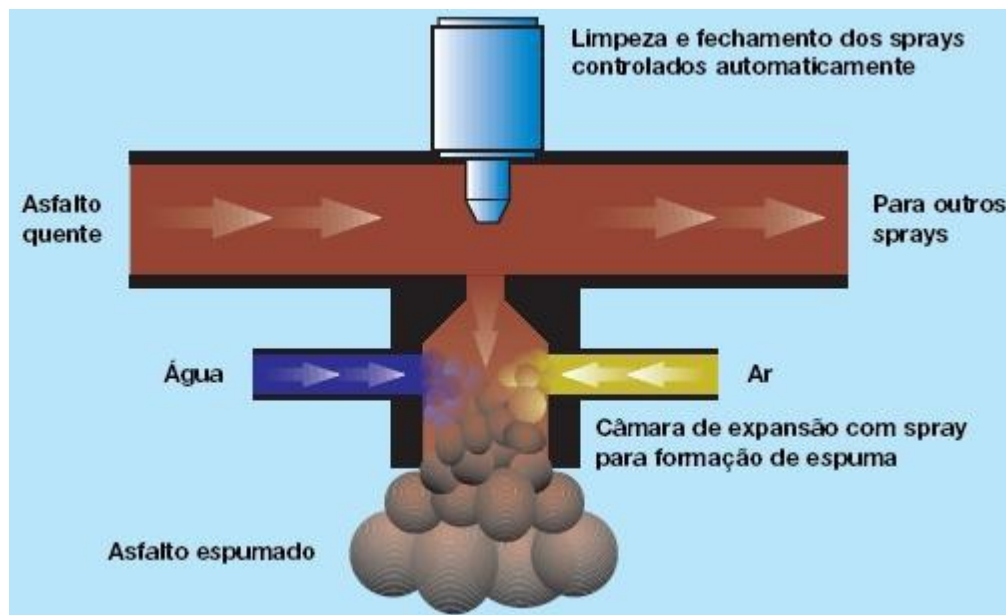


Figura 4.4 – Câmara de expansão - Processo de formação da espuma de asfalto
Fonte: BONFIM (2012)

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. (PMSP, 2009)

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 5 segundos, 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. (PMSP, 2009)

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 antiespumantes como derivados de silicone.

5 PAVIMENTO

5.1 DEFINIÇÃO

Segundo Balbo (2007) o pavimento pode ser definido com uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

“Estrutura constituída por diversas camadas superpostas, de materiais diferentes, construídas sobre o subleito, destinada a resistir e distribuir simultaneamente esforços horizontais e verticais, bem como melhorar as condições de segurança e conforto ao usuário.” (DER/SP, 2006)

5.2 CARGAS E SOLICITAÇÕES

De acordo com Balbo (2007) as cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento geram determinado estado de tensões na estrutura, que muito dependerá do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto destas. Recorda-se que as cargas são aplicadas por veículos e também pelo ambiente geralmente de modo transitório, são portanto, cíclicas ou repetitivas, o que não implica repetição constante de suas respectivas magnitudes.”

Em linhas gerais, pode-se dizer que as cargas externas geram esforços solicitantes verticais e horizontais. Os esforços verticais podem ser reduzidos a solicitações de compressão e de cisalhamento, já os esforços horizontais podem inclusive solicitar certos materiais à tração ou simplesmente atuar confinando outros materiais. (BALBO, 2007)

5.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO

De acordo com Balbo (2007), a estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir os esforços oriundos do tráfego de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores do pavimento, que geralmente são menos resistentes, embora isso não seja tomado como regra geral para que a estrutura do pavimento funcione adequadamente, todas as camadas que a compõe devem trabalhar de acordo com as deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portanto, isto é, de

modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que as constituem.

5.3.1 CAMADAS

“Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.” (BALBO, 2007)

5.3.1.1 REVESTIMENTO

Conforme o DER/SP (2006) o revestimento é definido como a camada situada sobre a base, constituindo a superfície definida para o rolamento dos veículos. Pode ser constituído por tratamento superficial ou concreto asfáltico.

O revestimento deverá, dentre outras funções, receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação, sendo necessário, portanto, ser composto de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal. (BALBO, 2007)

5.3.1.2 SUBLEITO

Segundo o DER/SP (2006) o subleito é definido como a camada incluída entre a superfície da plataforma de terraplenagem e a superfície paralela, situada no limite inferior da zona de influência das pressões aplicadas na superfície do pavimento.

Quanto ao subleito, os esforços impostos sobre sua superfície serão aliviados em sua profundidade, normalmente se dispersam no primeiro metro. Deve-se, portanto, ter maior preocupação com seus estratos superiores, onde os esforços solicitantes atuam com maior magnitude. O subleito será constituído de material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado e compactado, no caso dos aterros. Eventualmente, será também aterro sobre corte de características medíocres para subleito. (BALBO, 2007)

5.3.1.3 REFORÇO DO SUBLEITO

Conforme o DER/SP (2006) é uma camada de presença opcional, requerida por imposição técnico-econômica, situada imediatamente acima do subleito. É constituída basicamente por material de empréstimo ou jazida.

Para Balbo (2007) o emprego de camada de reforço de subleito pode ser descartado pelo projetista, pois espessuras maiores de camadas superiores poderiam, em tese, aliviar as pressões sobre um subleito medíocre. Contudo, procura-se utilizá-lo em tais circunstâncias por razões econômicas, pois subleitos de resistência baixa exigiriam, para alguns tipos de pavimentos, especialmente aos flexíveis, do ponto de vista de projeto, camadas mais espessas de base e sub-base. Logicamente, o reforço do subleito por sua vez resistirá a solicitações de maior ordem de grandeza, respondendo parcialmente pelas funções do subleito e exigindo menores espessuras de base e sub-base sobre si, sendo em geral menos custoso o emprego de solos de reforço, em vez de maiores espessuras de camadas granulares ou cimentadas, quaisquer que sejam.

5.3.1.4 SUB-BASE

O DER/SP (2006) define a camada de sub-base como camada obrigatória por imposição técnico-econômica, situada entre o subleito ou reforço do subleito e a base. Pode ser constituída por materiais granulares graúdos, como pedregulhos, cascalhos, produtos de britagem que, embora selecionados, não atendam a todos os requisitos necessários à constituição de base de pavimento ou solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal, ou simplesmente por material selecionado de empréstimo ou jazida.

5.3.1.5 BASE

De acordo com DER/SP (2006) é uma camada obrigatória na estrutura do pavimento e situa-se acima da sub-base. Pode ser constituída por materiais granulares, como pedregulhos, cascalhos e produtos de britagem, estabilizados com a adição de cimento ou material asfáltico quando necessário, solos estabilizados mecanicamente mediante mistura com produtos de britagem, ou solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal.

5.3.2 IMPRIMAÇÕES

Entre algumas das camadas de pavimentos mencionadas, faz-se necessária a execução de um filme asfáltico, que será denominado **pintura de ligação**, com função de aderir uma camada à outra ou **imprimação impermeabilizante**, com a função de impermeabilizar uma camada à outra de solo ou granular antes do lançamento da camada superior. Entre quaisquer camadas de revestimento asfáltico, sempre é aplicada uma pintura de ligação. As pinturas de ligação são aplicadas com emulsões asfálticas, e as imprimações impermeabilizantes, com asfaltos diluídos. (BALBO, 2007)

5.3.2.1 LIGAÇÃO

De acordo com o DER/SP (2006) a pintura de ligação consiste na aplicação de material asfáltico sobre a superfície da base ou do revestimento asfáltico, a fim de promover a aderência com a camada subjacente, antes da execução de nova camada asfáltica.

5.3.2.2 IMPERMEABILIZAÇÃO

Aplicação de material asfáltico sobre a superfície da base, antes da execução do revestimento asfáltico, a fim de aumentar a coesão da superfície da base decorrente da penetração da imprimação na parte superior desta camada, impermeabilizando-a proporcionando condição de aderência entre o revestimento e a base. (DER/SP, 2006)

5.4 TEORIA DE BOUSSINESQ

Em 1885, Joseph Boussinesq publicou o trabalho *Application des potentiels a l'équilibre et du mouvement des solides élastiques* Goodier (1980) *apud* Timosshenko (1951). Daí por diante, suas equações, que apresentavam as inter-relações entre forças de contato sobre o contorno de um sólido semi-infinito, foram utilizadas e expandidas para outras formas geométricas de aplicação de forças e fomentaram de fundamento para o estabelecimento da Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), proposta por Burmister em 1945. (BALBO, 2007)

As equações de Boussinesq tratam de uma particularização da Teoria da Elasticidade formalizada por Cauchy em 1822, sendo ainda hoje e de grande aplicação em diversos estudos relacionados à Engenharia Geotécnica. Para o estudo do equilíbrio dos semiespaços elásticos, sob condições de carregamento estático, as forças internas são desprezadas, e as forças de

superfície são decompostas em componentes de tensão paralelas a eixos coordenados preestabelecidos. (BALBO, 2007)

De acordo com SEVERI; BALBO; RODOLFO (1998) as soluções de Boussinesq para determinar as tensões e deslocamentos em sistemas de camadas, tais como em pavimentos de concreto asfáltico, simula uma aplicação prática da teoria da elasticidade. As equações de Boussinesq, para pressão exercida em um ponto dentro de um maciço devido a uma carga aplicada pontualmente na superfície, assumiram as seguintes hipóteses:

(i) **a camada de suporte deve ser homogênea para uma extensão infinita.**

Descontinuidades na estrutura do solo, tal como a presença de rocha em uma certa profundidade ou a existência de interface entre uma areia e uma argila mole são incompatíveis com estas hipóteses.

(ii) **a Lei de Hooke deve ser satisfeita, isto é, a fundação deve ser linearmente elástica e isotrópica.** Para isto o solo tem que ser capaz de resistir a tensões de tração, uma propriedade geralmente inexistente em meios granulares. Similarmente, siltes e argilas variegadas são anisotrópicos e, apenas alguns solos apresentam uma linear e reversível resposta tensão-deflexão. A região próxima à superfície do solo é muitas vezes uma região de escoamento plástico.

(iii) **a carga deve ser normal à superfície do sólido elástico.** O que usualmente acontece, mas, o solo tenta sair de baixo da carga lateralmente, causando forças de atrito tangenciais. A força resultante aplicada é na realidade oblíqua.

(iv) **a carga deve ser aplicada na superfície da fundação.** Isto exclui aplicação da teoria para os casos de carregamentos causados por escavações.

$$\sigma_z = n P / 2 \pi R^2 (z / R)^n$$

Onde:

σ_z = tensão vertical no subleito em qualquer profundidade z ;

P = carga concentrada aplicada na superfície;

R = distância entre a carga aplicada e o local do cálculo da tensão no subleito;

n = fator de concentração, assumido como sendo 3 para as análises de Boussinesq.

“A partir de integrações e outras técnicas, por volta dos anos 30, a teoria foi adaptada e expandida para acomodar áreas de carregamento circulares e retangulares e também eventuais áreas de forma arbitrária.” (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

5.5 TEORIA DE SISTEMA DE CAMADAS ELÁSTICAS (TSCE)

Conforme Severi e Balbo e Rodolfo (1998) ultimamente foram observadas muitas mudanças e avanços na filosofia de projeto de pavimentos asfálticos, sendo que atualmente pode-se afirmar que os mesmos rompem por diversas causas. Entre as que estão mais intimamente ligadas a repetição de cargas sobre as estruturas de pavimentos, destacam-se:

- (i) o fenômeno de fadiga, responsável pelo trincamento de revestimentos betuminosos e de bases cimentadas;
- (ii) o acúmulo de deformações plásticas (permanentes) devido à ação das deformações cisalhantes em camadas granulares e no subleito.

Segundo Severi e Balbo e Rodolfo (1998) na década de 40 surgiram as soluções relatadas para depósitos de camadas de solo, encontradas em trabalhos de fundação e em projeto de aeroportos. A solução para sistemas de duas camadas sob uma carga circular, foi primeiramente apresentado por Burmister em 1943. A solução para sistemas de duas camadas necessitava assumir, além da teoria da elasticidade, as seguintes hipóteses:

(i) Cada uma das duas camadas consiste em um sólido homogêneo, isotrópico, linearmente elástico, obedecendo a Lei de Hooke;

(ii) O topo da camada não tem peso e tem espessura finita, e a segunda camada pode tender ao infinito no plano vertical. Ambas as camadas são assumidas como sendo infinitas no plano horizontal;

(iii) As condições de aderência do sistema são:

- A superfície do topo da camada está livre de tensões normais e cisalhantes fora dos limites da área carregada;
- Tensões e deslocamentos no fundo da camada desaparecem com o aumento da profundidade;

(iv) As condições de continuidade do sistema são:

- Existe um total contado entre o topo da camada e o suporte da fundação;
- Tensões normais e cisalhantes, bem como deslocamentos verticais e horizontais são contínuos de um lado a outro da interface entre duas camadas, às vezes as tensões radiais horizontais qualquer lado da interface podem, em geral, ser desiguais. Isto muitas vezes é referido como sendo uma condição de total atrito entre as duas camadas.

Um dos grandes saltos na análise qualitativa de pavimentos ocorreu em razão dos trabalhos de pesquisa analíticos desenvolvidos por Donald Burmister, professor da *Columbia University*, em Nova York. Entre suas contribuições mais famosas, estão três artigos nos quais estabelecia as bases para o que veio a ser chamado de Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), apresentando soluções analíticas para duas e três camadas. Esses artigos foram publicados no *Journal of Applied Physics*, nos meses de fevereiro, março e maio de 1945, e o primeiro deles intitulado *General theory of stresses and displacements in layered system*. Contudo, ele havia anteriormente exposto tal assunto no 23º. Encontro Anual do *Highway Research Board* atualmente denominado *Transportation Research Board* em Washington, D.C. (BALBO, 2007)

Conforme os artigos de Burmister anteriormente apresentados onde, o primeiro deles tratou do problema de duas camadas com aderência plena. No segundo, o autor investigou o problema da ausência de aderência plena entre duas camadas, na interface de contato. No terceiro artigo, Burmister amplia sua TSCE para o caso de três camadas, já fazendo referência explícita a análises de pavimentos com revestimento, base e subleito. Emprega também o termo **deflexão** para se referir a deslocamento. (BALBO, 2007)

As contribuições de Burmister renderam várias extensões para a teoria de sistemas de múltiplas camadas. Os resultados de sua teoria foram aplicados para avaliação e interpretação dos dados de campo. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Os dados de retorno oferecidos pela TSCE são as deformações, as tensões e as deflexões no pavimento. Em geral, há poucas posições críticas que são comumente avaliadas em pavimentos flexíveis, em comparação ao caso de pavimentos de concreto, sendo as mais comuns indicadas no quadro 5.1. (BALBO, 2007)

POSIÇÃO	RESPOSTA	EMPREGO DA RESPOSTA
Revestimento (superfície)	Deflexão	Projetos de reforço de pavimentos
Revestimento (fundo)	Deformação horizontal	Análise de fadiga
Fundo de camadas tratadas	Tensão horizontal	Análise de fadiga
Meia altura de camadas	Deformação vertical de compressão	Análise de deformação plástica
Topo do subleito	Deformação vertical de compressão	Análise de deformação plástica

Quadro 5.1 - Posições críticas de análises em pavimentos flexíveis

FONTE: BALBO (2007)

A solução para sistemas de três camadas requeria tediosas simulações dos modelos, em uma época que computadores não eram disponíveis, sendo necessária a adoção de faixas de variação para os diversos parâmetros. Muitos engenheiros, como Peattie, Jones e Ahvin, apresentaram soluções gráficas clássicas para as equações de Burmister, para que o uso prático da TSCE fosse disseminado em projetos e análises de pavimentos, em uma época que a informática disseminava vislumbra um sonho ainda distante, razão pelas quais tais ábacos faziam sentido de utilidade nos anos 1950. (BALBO, 2007)

Segundo Balbo (2007) ultimamente vários programas, foram desenvolvidos baseados na TSCE. Esses programas foram disseminados na formulação de análises e de métodos de projeto de pavimentos flexíveis. Até recentemente, os programas mais populares nos EUA para resolução da TSCE eram:

- (i) *Bisar* (desenvolvido pela *Shell International Petroleum Company* em 1978), o mais robusto entre os antigos;
- (ii) *Elsym 5* (Kopperman *et al.*, 1986), o mais popular no Brasil entre os antigos;
- (iii) *Kenlayer* (Huang, 1993), na versão *Disk Operating System*, disponível mediante compra;
- (iv) *Weslea* (Van Cauwelaert; Lequeux, 1986);
- (v) *Julea* (Uzan, 1991), empregado no método da *Federal Aviation Administration* (FAA).

5.6 EMPREGO TSCE COM O ELSYM 5

A avaliação estrutural de um pavimento projetado pode-se definir como uma verificação do modo pelo qual se procede a distribuição de tensões e deformações em suas diversas camadas, com o intuito de aferir a compatibilidade entre as diversas características resistentes dos materiais e as solicitações sofridas pelos mesmos. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Atualmente conforme os motivos apresentados anteriormente, este tipo de análise estrutural é realizada por intermédio de programas computacionais que permitem com grande precisão a definição do estado tensional em sistemas de camadas elásticas submetidos e esforços oriundos de rodas de veículos. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Sua aplicação necessita previamente do conhecimento dos parâmetros elásticos dos materiais que compõe as camadas dos pavimentos, que devem ser determinados em laboratório ou em campo, através de técnicas específicas, ensaios dinâmicos, ensaios estáticos, retro análise de bacias de deformação, entre outros. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Estes modelos, baseados em teoria elástica apropriada, utilizam-se de método indiretos para a solução de equações de equilíbrio e de compatibilidade ente tensões e deformações aplicando conceitos de diferenças finitas ou elementos finitos. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Conforme exemplificado o mais conhecido e empregado método de modelagem de deformações e tensões em estruturas de pavimento trata-se da aplicação da **Teoria Elástica de Sistema de Camadas** desenvolvida por Burmister. (SEVERI; BALBO; RODOLFO, 1998)

Conforme Medina (1997) o ELSYM 5 aplica o conceito de diferenças finitas aos problemas de elasticidade linear de meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas. O número de cargas pode ir até dez, e o número de pontos de análise até cem (10 pares em 10 profundidades).

O método das diferenças finitas resolve problemas de valores no contorno em equações diferenciais ordinárias como as derivadas das equações diferenciais se calculam por meio de fórmulas aproximadas, numa série de pontos no domínio de integração do problema. Obtém-se um sistema de equações algébricas que permite calcular as incógnitas nos pontos escolhidos. Aumentando-se o número de pontos as soluções se aproximam da solução exata.

Tem-se uma solução discreta do problema nos pontos considerados. A superposição dos efeitos causados por várias rodas é correta para o cálculo dos deslocamentos, mas, aproximada para as tensões. Consideram-se as camadas homogêneas, isotrópicas e horizontalmente infinitas, sendo o subleito um meio semi-infinito. Cada camada tem seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. (MEDINA, 1997)

5.7 ANÁLISE MECANICISTA SEGUNDO O DER/SP

A análise mecanicista da estrutura de pavimento, requer previamente o conhecimento dos parâmetros relativos à capacidade de suporte dos solos do subleito e do tráfego previsto para o período de projeto, além das propriedades dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento e de modelos de fadiga para estes materiais. (DER/SP, 2006)

As cargas a serem inseridas na análise mecanicista deverão simular o eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, empregando quatro pontos de aplicação de carga de 20 kN cada e pressão de contato pneu-pavimento de 0,56 MPa. (DER/SP, 2006)

Para a análise mecanicista de estrutura de pavimento são utilizados os modelos experimentais de fadiga de materiais. Portanto, é necessário que o projetista tenha conhecimento de diversos modelos publicados em literatura técnica, suas vantagens em relação a outros modelos de fadiga e suas limitações. (DER/SP, 2006)

O DER/SP (2006) salienta que a adoção de expressões matemáticas de fadiga de materiais constituintes de estrutura do pavimento na avaliação de qualidade e do desempenho de determinado pavimento, é preciso compreender como e em quais condições as expressões matemáticas de fadiga foram obtidas.

O DER/SP (2006) recomenda as seguintes equações de fadiga referentes aos materiais de revestimento de concreto asfáltico e subleito, para verificação mecanicista da estrutura do pavimento.

5.7.1 SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO

De acordo com o DER/SP (2006) as deformações verticais recuperáveis do pavimento representam a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto da superfície do pavimento, todas

as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento, sendo que o valor do deslocamento geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga.

Portanto, é conveniente verificar o valor da deformação vertical recuperável máxima da superfície do pavimento, comparando-o com o valor de projeto obtido pelas expressões de matemáticas do DNER-PRO 011/79 ou DNER-PRO 269/94, que é função do número **N**. Salienta-se que é corriqueiro denominar o deslocamento/deformação vertical recuperável máximo da superfície do pavimento como deflexão. (DER/SP, 2006)

As equações descritas, conforme a IP-DER-P00/001 (DER/SP, 2006) são do tipo:

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

k e **n**: coeficientes determinados por regressões lineares.

Sugere-se empregar na análise mecanicista uma das equações cujos parâmetros são apresentados na tabela 5.01.

Equação	Procedimento	k	n
1	DNER-PRO 011/79	3,01	0,176
2	DNER-PRO 269/94	3,148	0,188

Tabela 5.01 – Deslocamento Vertical Recuperável em função do número **N**
Fonte: Adaptado de DER/SP (2006)

5.7.2 REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO

De acordo com o DER/SP (2006) conforme ocorrem as deformações horizontais de tração, ϵ_t , nas fibras inferiores das camadas asfálticas, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, estas geralmente causam a ruptura da camada asfáltica por fadiga caso forem excessivas, este fenômeno é amenizado conforme aumenta a rigidez da camada de base.

Conforme o DER/SP (2006) se tratando de materiais asfálticos há dois tipos principais de ensaios: deformação ou tensão controlada. No entanto, qualquer que seja o método de ensaio, vale a seguinte expressão:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_t : deformação específica horizontal na tração;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

“Os ensaios de fadiga apresentam grande dispersão dos resultados, particularmente no que diz respeito às misturas asfálticas, devido não só a inerente heterogeneidade do material, como também às técnicas de ensaio de preparação dos corpos de prova, tipos de ensaios etc.” (DER/SP, 2006)

Existem diversas equações de fadiga desenvolvidas por pesquisadores em estudos nacionais e internacionais, o DER/SP recomenda-se para a camada de revestimento de concreto asfáltico o emprego de umas das expressões matemáticas cujos parâmetros estão indicados na tabela 5.02 para avaliação mecanicista. (DER/SP, 2006)

Equação	Autor	Ano	K	n
1	FHWA (<i>Federal Highway Administration</i>)	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512
2	Asphalt Institute	1976	$2,961 \times 10^{-5}$	3,291
3	Barker, Brabston & Chou	1977	$9,7 \times 10^{-10}$	4,03
4	Pinto & Preussler - CAP 50-70	1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69

Tabela 5.02 – Número “N” em Função da Deformação Específica de Tração ε_t da Fibra Inferior da Camada de Concreto Asfáltico
Fonte: DER/SP (2006)

O DER/SP (2006) recomenda adotar o número N obtido por meio da metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

“A expressão do *Asphalt Institute* foi simplificada para se ajustar ao formato da equação ilustrada anteriormente, adotando-se os valores médios para misturas asfáltica módulo resiliente de 3000 MPa, o volume de betume de 13,5% e volume de vazios de 4%.” (DER/SP, 2006)

5.7.3 SUBLEITO

No subleito o DER/SP (2006) recomenda realizar a análise por comparação da máxima deformação específica vertical de compressão, ε_v , atuante no topo do subleito, considerando-se o sistema de camadas elásticas, com os valores admissíveis.

Conforme o DER/SP (2006) o critério de fadiga adotado para as deformações verticais de compressão do subleito é idêntico aos modelos adotados para a fadiga de misturas asfálticas e expresso por meio da equação:

$$N = k \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_v : deformação específica vertical de compressão;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Conforme as diversas equações de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito desenvolvidas por pesquisadores em estudos nacionais e internacionais, recomenda-se o emprego da análise mecanicista de uma das expressões matemáticas cujos parâmetros são indicados na tabela 5.03. (DER/SP, 2006)

EQUAÇÃO	AUTOR	ANO	K	N
1	Dormon & Metcalf	1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762
2	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge) 50% de confiabilidade 85% de confiabilidade 95% de confiabilidade	Revisado em 1985	$6,15 \times 10^{-7}$ $1,94 \times 10^{-7}$ $1,05 \times 10^{-7}$	4,0 4,0 4,0
3	Asphalt Institute (Santucci)	1984	$1,338 \times 10^{-9}$	4,484

Tabela 5.03 – Número N em Função da Deformação Específica de Compressão ϵ_v do topo da camada do subleito

FONTE: DER/SP (2006)

Deve-se considerar que o número N resultante é o obtido pela metodologia da *United States Army Corps of Engineers* (USACE). (DER/SP, 2006)

6 APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM PAVIMENTAÇÃO

6.1 HISTÓRIA

Os impactos ambientais vêm impulsionando a conservação e manutenção dos recursos naturais, uma das medidas que mitigam estes impactos é a utilização de resíduos reciclados de construção e demolição, tornando-se recorrentes nos dias atuais. Mas, a prática de reciclagem e de reutilização destes materiais ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, na experiência adquirida no processo de reconstrução da Alemanha. Consequentemente, muitas pesquisas foram desenvolvidas no âmbito mundial com a intenção de conhecer a fundo as propriedades e as limitações ao uso deste material em várias áreas da engenharia. (RAO; JHA; MISRA, 2007 *apud* BEJA, 2013)

De acordo com Beja (2013) nos dias atuais há especificações quanto ao uso de agregados reciclados de construção e demolição em diversas áreas da engenharia, e suas especificações variam em sinergia quanto ao uso e refino do material em questão.

Há diversas experiências de sucesso, comprovando a eficiência da utilização dos agregados reciclados de RCD na pavimentação, em âmbito laboratorial ou campo, evidenciando o desempenho da aplicação destes agregados em camadas de pavimentos sob solicitação de tensões verticais de menor magnitude. As especificações dos agregados reciclados de RCC variam de acordo com o órgão viário e a nacionalidade, baseando em características como, graduação, teor de contaminantes, CBR e abrasão Los Angeles entre outros. (AGRELA *et al.*, 2011; HERRADOR *et al.*, 2012; LEITE, 2007; JIMÉNEZ *et al.*, 2011; MOLENAAR e NIEKERK, 2002; MOTTA, 2005 *apud* BEJA, 2013)

Segundo Beja (2013) apresentando uma estrutura essencialmente granular, o agregado reciclado de RCD muitas vezes apresenta características físicas e mecânicas, que possibilitam substituir os materiais das camadas de base, sub-base e reforço, como a BGS, em estruturas de pavimentos flexíveis.

6.2 PESQUISAS

No que se refere às pesquisas para aplicação de agregados reciclados em pavimentação, foi possível notar ao longo deste estudo que muitas delas vêm sendo realizadas em todo o mundo já há muitos anos. Tem-se como um interessante exemplo a união de alguns países europeus para a formação de

um grupo chamado *Alternative Materials in Road Construction* (ALT-MAT) para analisar, em laboratório e em campo, materiais alternativos destinados a pavimentos. A pesquisa, que teve duração de aproximadamente dois anos, concluiu, entre outras coisas, que os valores limites dos testes aplicados devem ser baseados em características locais como clima e experiência adquirida, e que o desempenho em campo foi, em alguns casos, melhor do que a previsão feita em laboratório. (MOTTA, 2005)

A seguir são descritas algumas pesquisas brasileiras relacionadas aos agregados reciclados.

Bodi *et al.* (1995) analisaram três tipos de agregados reciclados de São Paulo (SP): branco, vermelho e misto. A pesquisa incluiu a análise da mistura de agregado reciclado misto com solo siltoso (saprolítico) e argiloso (com comportamento laterítico), sendo feitos ensaios de compactação e ISC. Os resultados foram considerados positivos. (MOTTA, 2005)

Trichês e Kryckj (1999) pesquisaram agregados reciclados de Florianópolis (SC) separados nas frações branca e vermelha e também misturados com solo areno-siltoso e argiloso. Foram realizados ensaios de peneiramento para obtenção da granulometria, além de compactação e ISC. Segundo os pesquisadores, os resultados obtidos demonstraram que o material se apresenta como uma excelente alternativa para o uso em camadas de reforço do subleito e sub-base, além de possuir potencial para ser empregado na redução de plasticidade do solo de fundação. (MOTTA, 2005)

Carneiro *et al.* (2001) estudaram agregados reciclados de Salvador (BA) nas frações graúda e miúda, além de suas misturas com solo laterítico e saprolítico em diferentes proporções. Os autores realizaram ensaios de caracterização física e mecânica, dentre os quais incluem-se análise granulométrica, abrasão ‘Los Angeles’, compactação e ISC. Com base nos resultados obtidos, os pesquisadores concluíram que o agregado reciclado de Salvador, em ambas as frações, se apresentou como material adequado à aplicação em bases e sub-bases de pavimentos. (MOTTA, 2005)

Ribeiro *et al.* (2002) avaliaram agregados reciclados brancos e vermelhos, além de sua mistura com solo tipo ML segundo classificação no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) ou A-7-5 na classificação da *Highway Research Board* (HRB). A coleta se deu em Goiânia/GO, e a britagem foi feita em laboratório para adequação às faixas granulométricas especificada pelo DNER. Foram realizados ensaios de compactação e também de ISC e, segundo os autores, verificou-se com os resultados obtidos que a utilização de agregados reciclados em pavimentação é tecnicamente viável. (MOTTA, 2005)

Frota *et al.* (2003) realizaram a análise dos agregados oriundos da cidade de Manaus/AM como forma de substituir os seixos em misturas asfálticas, que são agregados convencionalmente empregados nesta finalidade e cuja exploração causa grande impacto ambiental. Foram realizados ensaios de caracterização do ligante asfáltico CAP-20 e do agregado reciclado (isento de materiais cerâmicos e gesso), além de dosagem pelo método *Marshall*. Foram confeccionadas três misturas, sendo uma com seixo e outras duas com

agregado reciclado em diferentes proporções (50% e 60%), incluindo em todos os casos areia e também cimento Portland como *filler*. (MOTTA, 2005)

De acordo com Motta (2005) foi constatado que as misturas com agregado reciclado necessitam de maior quantidade de ligante, o que já estava previsto, uma vez que estes materiais apresentam maior porosidade que os convencionais, considerando o teor ótimo de ligante observado para as misturas com seixo foi de 5,5%, enquanto que para as outras duas misturas de agregado reciclado foi de 6,4% e 6,5% (respectivamente para as proporções de 50% e 60%).

Conforme Motta (2005) foi concluído pelos autores que a aplicação de agregado reciclado em misturas asfálticas, em substituição ao seixo, é tecnicamente viável. Contudo, está significativa diferença no teor de ligante se reflete em maiores custos, o que pode inibir a utilização de agregados reciclados para esta finalidade. Ainda que o agregado reciclado é muito suscetível à abrasão, e normalmente a aplicação de materiais com este tipo de características em camadas de rolamento é evitada devido à maior facilidade com que o tráfego poderá desgastá-lo. De acordo com Hill *et al.* (2001), dada a intensidade de carregamento vivenciada pela superfície de uma estrutura de um pavimento, a aplicação de agregados reciclados deve ser feita nas camadas inferiores.

Fernandes (2004) pesquisou as características do agregado reciclado *in natura* de recicladoras do Rio de Janeiro/RJ e Belo Horizonte/MG. A primeira usina e reciclagem forneceu material selecionado nas frações de brita 0 e 1, pedrisco e pó-de-pedra, sendo todas do tipo misto. Já a segunda cedeu agregados reciclado sem forma de brita corrida dos tipos misto e concreto. O autor realizou ensaios de caracterização física como granulometria, abrasão *Los Angeles* e índice de forma, e ainda analisou o comportamento mecânico dos materiais citados perante ensaios de Módulo de Resiliência. Com os resultados obtidos, o pesquisador concluiu que o uso de agregados reciclados em pavimentação é **viável tecnicamente, economicamente motivador e ambientalmente benéfico**, sendo **uma resposta à necessidade de crescimento sustentável**. (MOTTA, 2005)

6.3 INCENTIVOS

De acordo com Grubba (2009) a PMSP dispõe diversos incentivos para incentivar a utilização dos agregados reciclados de RCD em camadas de pavimentos.

Segundo Vedroni (2007) é necessário identificar as alternativas tecnológicas necessárias para reduzir os impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos, bem

como buscar atendimento as aspirações sociais e dos aportes econômicos, obrigando o homem a investir em outras formas de desenvolvimento sustentável.

Podendo esta ser a solução de uso sustentável desse tipo de resíduo e uma forma econômica de utilização. Novas técnicas de pavimentação, novos estudos permitem o aprimoramento e a viabilidade de utilização destes resíduos, sobretudo no aproveitamento como matéria-prima. (VEDRONI, 2007)

6.4 CUSTOS

Conforme Grubba (2009) no tocante aspecto econômico, verifica-se que os custos unitários de construção de camadas de bases e sub-bases no município de São Paulo utilizando agregados reciclados de RCD são menores do que os empregando brita graduada.

O aproveitamento ineficiente de jazidas de agregados naturais compreende a exploração futura de reservas e aumenta a irregularidade econômica em relação agregado reciclado de RCC. A extração dos agregados naturais é regulada pela viabilidade técnica e econômica do recurso obtido. A ausência de legislação que obrigue a recuperação das jazidas, quando do encerramento das atividades, interfere na inserção e comercialização do agregado reciclado, uma vez que, sobre o valor pago pelo agregado natural, deixam de incidir o encargo financeiro correspondente à remediação das jazidas exploradas, desencorajando a utilização dos materiais reciclados. (GOLÇALVES, 2008 *apud* MELO, 2011)

Segundo Manzini *et al* (2008) *apud* Melo (2011) os agregados reciclados tornam-se competitivos quanto a sua viabilidade de aplicação no canteiro de obras. Para, esse indicador se vincula à (curto, médio e longo prazo) a organização dos empreendimentos produtivos, os posicionando para a sustentabilidade.

De acordo com Melo (2011) o comportamento tecnológico deve estar vinculado à sustentabilidade do material, mantendo parâmetros e condições que satisfaçam as diretrizes de uma construção mais sustentável, a partir das escolhas feitas em projetos que visem à prevenção, reuso e reciclagem do RCC, minimizando a disposição final, mesmo que ambientalmente adequada.

6.5 ESPECIFICAÇÕES E REQUISITOS

De acordo Motta (2005) são muitos os países que possuem suas próprias especificações no controle e produção de agregados reciclados em pavimentação.

“Na Holanda, os requisitos para o uso de agregados em sub-base de pavimentos foram publicados em 1995 na *Standaard RAW Road Specification* especificando tamanho e forma dos grãos, além da quantidade de componentes indesejáveis.” (HENDRICKS e JANSSEN, 2001 *apud* MOTTA, 2005)

“Na Itália, o emprego de agregados reciclados em pavimentação segue a especificação *UNI Standard 10006*, que foca alguns pontos como ocorrência de materiais não pétreos, forma dos grãos e heterogeneidade.” (COSTA e URSELLA *apud* MOTTA, 2005)

Na Áustria, os agregados utilizados em obras rodoviárias devem atender, de forma geral, os requisitos da *Austrian Standards for Transport and Road Construction (Richtlinienund Vorschriften fur den Strassebau – RVS)*. Não são verificadas diferenças em termos de métodos de ensaio ou requisitos para os materiais naturais ou reciclados, mas a qualidade dos resíduos reciclados é regulada por *Guidelines for Recycled Building Materials*, que foram preparadas pela *Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials*. A Áustria tem a melhor experiência na reciclagem de pavimentos de concreto sendo que os pavimentos antigos transformam-se em agregados na construção de novos pavimentos de concreto de cimento Portland. (OECD, 1997 *apud* ALT-MAT, 1999 *apud* MOTTA, 2005).

Na Austrália, mais especificamente nas regiões de Nova Gales do Sul e Vitória, dentre as normas relacionadas ao uso de agregados reciclados de concreto em construção de sub-bases estão: RTA Q3051: *Unbound and Modified Base and Subbase Materials for Surface Road Pavements*; AUS-SPEC #2 *Asset Owners Roadworks Specifications e VicRoads (Victoria) 820Q: Crushed Concrete for Subbase Pavement*. Embora nem todos os requisitos destas especificações sejam atendidos, são utilizadas grandes quantidades de agregados reciclados neste tipo de obra por razões econômicas. (UTS, 1999 *apud* MOTTA, 2005)

Segundo Beja (2013) a normalização técnica, tanto nacional quanto internacional, propõem requisitos importantes para manutenção das características funcionais e estruturais de uma camada de pavimento, com a utilização dos agregados reciclados de RCD, principalmente quando são empregados como camada granular de comportamento mecânico

similar à de uma BGS. Mas, tais recomendações somente são válidas quando RCD são processados, beneficiados e reciclados.

6.6 NORMALIZAÇÃO

Após os anos 90, foi iniciada a instalação de usinas de reciclagem no Brasil, mas não havia normalização para o uso de agregados reciclados em pavimentação. Em março de 2002, a PMSP publicou no Diário Oficial do Município a sua própria especificação com o título de **Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. (MOTTA, 2005)

“Segundo a NBR 15115 (2004), o agregado reciclado aplicável à pavimentação é definido como **material granular, obtido por meio de britagem ou beneficiamento mecânico, de resíduos de construção civil**, pertencentes à Classe A da Resolução CONAMA (2002).” (ABNT, 2004c)

O material deve atender a alguns requisitos como:

- (a) boa graduação granulométrica;
- (b) valores mínimos de ISC e de expansão (conforme o tipo de camada do pavimento); e
- (c) dimensão máxima característica de 63,5 mm

De acordo com Motta (2005) no Brasil entre as pesquisas realizadas, existe uma gama de trabalhos no que se refere ao uso de agregado reciclado para confecção de concreto, mas poucos relacionados ao emprego em pavimentação.

6.7 APLICAÇÃO

Pesquisas nacionais e internacionais vêm sendo realizadas sobre o assunto para analisar as características do RCC a fim de verificar sua aplicação em diversas áreas da construção civil. (PROENÇA, 2012)

Local	Aplicação	Observação	Fonte
Brasil	Em camadas de drenagem, de pavimentação e em melhoramento de solos.	Possibilidade de estabilizar solos expansíveis.	Brito Filho (1999)
	Fabricação de peças pré-moldadas de concreto sem função estrutural e em argamassa.	Viabilidade em concreto sem função estrutural.	Lima (1999)
	Fabricação de concreto sem função estrutural.	Viabilidade em concreto sem função estrutural.	Rodrigues (2011)
	Análise da variabilidade do agregado de RCC para uso em argamassas e concreto.	Viabilidade do agregados reciclados em todas as propriedades analisadas	Angulo (2000)
	Novas rodovias e recuperação de antigas num total de 400 km.	----	Dias (2004)
	Em reforço de solos.	Viabilidade em uso de reforço de solos.	Santos (2007)
	Estaca de compactação	Viabilidade em uso de reforço de solos.	Lira Jr. (2010)
	Em vias de baixo volume de tráfego.	Viabilidade e aplicação do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas.	Fernandes (2004), Motta (2005), Leite (2007)
	Construção de via rodoviária.	Comportamento mecânico do agregado reciclado	Grubba (2009)
Europa	Obras em concreto: uma laje submersa (1988) numa hidrovia e estrutura do centro de tratamento de água (1999-2000).	Obtenção de desempenho satisfatório em ambientes agressivos.	Levy (2001)
Holanda	Em sub-base de pavimentos.	Viabilidade do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e teor de material indesejável.	Hendricks e Janssen (2001)
Itália	Pavimentação	Viabilidade do agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e composição do componentes.	Costa e Ursella (2003)

Figura 6.1 – Algumas pesquisas realizadas sobre aplicações de RCC
 Fonte: PROENÇA (2012)

7 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS

Quando optamos pela reciclagem e reutilização dos RCC, surgem inúmeras vantagens. Os agregados reciclados podem se tornar fonte de diminuição de despesas (gerenciamento de resíduos, custos de transporte, taxas e multas) e futuramente no aspecto ambiental, com a utilização dos agregados reciclados, diminui-se a exploração de recursos naturais, os impactos causados pelos RCC nos depósitos, em locais inadequados, desafogando os aterros. Além de benefícios econômicos e ambientais, os RCC também trazem benefícios sociais, pois a reutilização e reciclagem dos resíduos são uma fonte de geração de empregos. (CARNEIRO *et al.*, 2001; USLEN, 2006; SANTOS, 2007 *apud* PROENÇA, 2012)

Segundo Beja (2013) a normalização nacional, limita a utilização dos agregados reciclados de RCD, em vias de baixo volume de tráfego $N \leq 1 \times 10^6$, comparando as com as especificações internacionais, estas não limitam os agregados reciclados em faixas de distribuição granulométrica, mas apenas frações em certas peneiras, não assumem limites ao módulo de resiliência, fornecem o controle das propriedades por meio dos seguintes parâmetros distribuição granulométrica, forma dos grãos, percentual de contaminantes, capacidade de suporte pelo *California Bearing Ratio* (CBR) e quando são adicionados aglomerantes hidráulicos é necessário verificar a sua resistência a compressão simples.

7.1 NO EXTERIOR

“Na Finlândia, no período de 1988 a 1992, foram produzidas, por ano, cerca de 350.000 toneladas de agregados reciclados, utilizados quase em sua totalidade em sub-bases e bases de pavimentos.” (SILVA, 2009)

A utilização dos agregados reciclados na Espanha, consistiu na execução de trechos experimentais como camada de base com mistura de agregados reciclados de categoria mista e tratamento primário com agregados reciclados onde as vias apresentavam baixo volume de tráfego. Após a coleta dos materiais, estes foram caracterizados em laboratório, quanto a sua composição, distribuição granulométrica, características físicas, características de estado e características mecânicas, para comprovar o seu desempenho perante as especificações. (JIMÉNEZ *et al.*, 2011 *apud* BEJA, 2013)

Os agregados reciclados de resíduos de concreto, considerando sua aplicação a pavimentação, apresentam melhor desempenho em bases granulares ou estabilizadas, e em

pavimentos de concreto de cimento *Portland*, possuindo ainda potenciais aplicações em misturas de concreto asfáltico a quente e em tratamentos superficiais. Alguns países priorizam a utilização do agregado reciclado de resíduo de concreto, como é o caso dos Estados Unidos. A União Europeia, em completo aos agregados reciclados de resíduos de concreto, também emprega frações de agregados reciclados derivadas de alvenaria, em sub-base de vias. (BEJA, 2013)

7.2 NO BRASIL

Os benefícios às administrações municipais, oriundos do emprego de agregados reciclados de resíduos de construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos, são principalmente o fator econômico, uma vez que esses materiais vêm sendo vendidos, geralmente, a preços inferiores aos dos materiais convencionalmente utilizados em pavimentação, sendo a utilização dos agregados reciclados de RCC uma forma simples de reaproveitamento, por não exigir processos sofisticados de reciclagem. (MOTTA, 2005; CARNEITO *et al*, 2001 *apud* GRUBBA, 2009)

7.2.1 UTILIZAÇÃO PELA PMSP

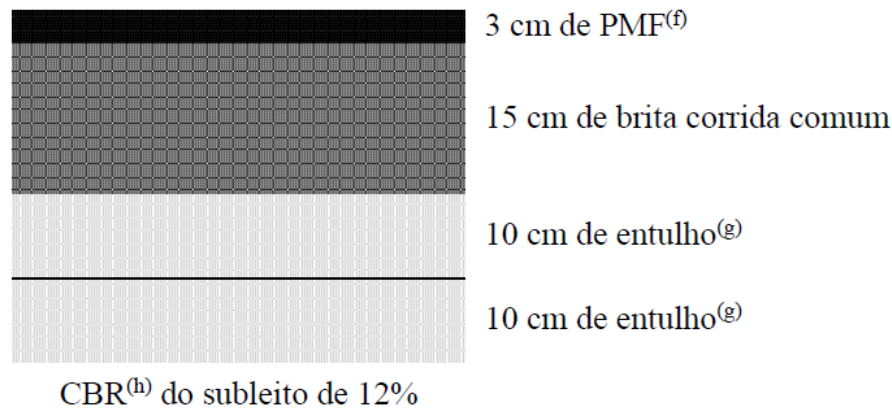
7.2.1.1 REVESTIMENTO PRIMÁRIO

Conforme Bodi *et al.* (1995) *apud* MOTTA (2005) foram utilizados pela população do município de São Paulo/SP os resíduos de construção e demolição, como revestimento primário, em muitas vias urbanas, com objetivo de minimizar a ocorrência de lama em períodos chuvosos ou poeira em períodos de estiagem e, apesar de não terem recebido uma pavimentação definitiva, estas vias passaram a requerer menores intervenções pela municipalidade e verificou-se que houve uma progressão na estabilidade do subleito com a compactação do tráfego local e com a incidência de chuvas.

7.2.1.2 PRIMEIRA PAVIMENTAÇÃO

Em 1984, de acordo com Bodi *et al.* (1995) *apud* Motta (2005), ocorreu a primeira pavimentação de uma via em São Paulo empregando agregados reciclados de resíduos de construção com acompanhamento tecnológico, por meio de parceria entre a PMSP e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na execução e no acompanhamento da obra,

respectivamente. Este logradouro, com nome Gervásio da Costa, localiza-se na zona oeste da cidade e é caracterizado por um baixo volume de tráfego. A figura 7.1 ilustra o esquema estrutural deste pavimento, onde percebe-se que as camadas de reforço do subleito e sub-base foram construídas com agregados reciclados. Seu desempenho foi considerado altamente satisfatório na época.



^(f) Pré-misturado a frio

^(g) Designação popular para o resíduo de construção e demolição

^(h) *California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia

Figura 7.1 – Esquema de pavimento da Rua Gervásio da Costa

Fonte: Adaptado de BODI *et al.* (1995) *apud* MOTTA (2005)

Conforme apresentado anteriormente, em 2003 a PMSP publicou a primeira normatização, que estabeleceu parâmetros sobre os agregados reciclados de resíduos de construção civil quando aplicados em camadas de pavimentos.

7.2.2 UTILIZAÇÃO EM BELO HORIZONTE/MG

Segundo Motta (2005) em Belo Horizonte/MG vem sendo utilizados agregados reciclados de RCD na execução de revestimento primário, reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos desde 1996. Algumas das avenidas pavimentadas, por exemplo Silva Lobo, Raja Gabaglia, Mário Werneck.

“Os projetos foram baseados em dimensionamentos empíricos, a partir de cálculos que levaram em conta Índice de Suporte Califórnia e a experiência dos engenheiros do município.” (FERNANDES, 2004 *apud* MOTTA, 2005)

“De 1996 até julho de 2001 foram utilizadas quase 137.000 toneladas de material em 271 vias implantadas ou reconstruídas, em um total de 400 km de ruas, aproximadamente.” (DIAS, 2004 *apud* MOTTA, 2005)

7.2.3 PISTA EXPERIMENTAL DE GOIÂNIA/GO

Por meio de parceria, entre a Prefeitura Municipal de Goiânia, Universidade de Brasília, Universidade Federal de Goiás e empresas da região. Em 2003, a Rua dos Ciprestes em Goiânia, foi construída como pista experimental, utilizando uma mistura de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e solo argiloso em suas camadas de base e sub-base. A experiência faz parte do programa municipal de gerenciamento de resíduos da construção civil. (OLIVEIRA, 2007 *apud* GRUBBA, 2009)

Os resíduos empregados na construção desta pista foram processados em agregados de três granulométricas, denominadas de brita 19 mm, brita de 9,5 mm e areia. A mistura foi proporcionada combinando essas frações com um solo argiloso retirado do próprio local, conforme a classificação Miniatura Compacto Tropical (MCT), pertence ao grupo LG' – solo argiloso de comportamento laterítico. A distribuição granulométrica da mistura foi enquadrada na faixa D da especificação do DNER de bases estabilizadas granulometricamente. (MENDES *et al.*, 2004 *apud* GRUBBA, 2009)

Segundo Oliveira (2007) *apud* Grubba (2009) passados dois anos e nove meses, submetida a ação do tráfego, a pista experimental apresentou desempenho satisfatório, uma vez que não apresentou defeitos superficiais aparentes, nem deformações que comprometam sua estrutura e funcionalidade. Concluindo que os resultados apresentados para o trecho experimental indicam que os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil com características semelhantes às estudadas são apropriadas para a utilização em camadas de base e sub-base de estruturas de pavimentos.

8 EXPERIMENTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilização e desempenho dos agregados reciclados quando empregados em camadas de pavimentos flexíveis, frente as solicitações impostas pelo tráfego, podendo vir a substituir os materiais granulares convencionais, como a BGS.

A metodologia utilizada para a verificação do desempenho, dos materiais reciclados é o dimensionamento de três estruturas de pavimento, variando apenas os materiais empregados na sua camada de base.

Sendo estes BGS representando o material convencional, agregados reciclados de RCD com adição de 4% de cimento e RAP espumado com adição de 2% de cimento, representando os materiais alternativos.

Os pavimentos foram dimensionados de acordo com o método do DNER (DNIT), utilizando critérios como o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf (N).

Foram adotados os seguintes parâmetros para o dimensionamento das estruturas dos pavimentos, ISC do subleito compactado na energia normal 5% e número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf ao decimo ano de serventia $N=2,00 \times 10^6$ solicitações.

De acordo com o DNIT (2006) o método do DNER prescreve as inequações para obterem-se as espessuras equivalentes de acordo com o ISC, e número N, com o objetivo de distribuir ao subleito os esforços gerados pelo tráfego.

A seguir são apresentadas três estruturas de pavimentos com suas respectivas espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MR (kgf/cm²)*	μ*
CONCRETO ASFÁLTICO	5	35000	0,35
BGS	18	3000	0,35
RACHÃO	20	2500	0,40
SOLO SELECIONADO (CBR 10% EN)	14	1000	0,45
SOLO LOCAL (CBR ≥ 5%, expansão < 2 %)	-	500	0,45

*Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

Tabela: 8.01 – Estrutura Convencional – BASE: BGS

Fonte: PRÓPRIA (2014)

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MR (kgf/cm²)*	μ*
CONCRETO ASFÁLTICO	5	35000	0,35
AGREGADOS RECICLADOS RCD	18	4078	0,35
RACHÃO	20	2500	0,40
SOLO SELECIONADO (CBR 10% EN)	14	1000	0,45
SOLO LOCAL (CBR ≥ 5%, expansão < 2 %)	-	500	0,45

*Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

Tabela: 8.02 – Estrutura Alternativa – BASE: AGREGADO RECICLADO RCD

Fonte: PRÓPRIA (2014)

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MR (kgf/cm²)*	μ*
CONCRETO ASFÁLTICO	5	35000	0,35
RAP ESPUMADO	18	5506	0,35
RACHÃO	20	2500	0,40
SOLO SELECIONADO (CBR 10% EN)	14	1000	0,45
SOLO LOCAL (CBR ≥ 5%, expansão < 2 %)	-	500	0,45

*Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

Tabela: 8.03 – Estrutura Alternativa – BASE: RAP ESPUMADO

Fonte: PRÓPRIA (2014)

As cargas dos veículos geram tensões e deformações no interior da estrutura do pavimento. Essas tensões e deformações são função da magnitude do carregamento, dos módulos resilientes e espessuras das camadas constituintes do pavimento e da capacidade de suporte do subleito.

Assim sendo, determinaram-se os deslocamentos e deformações atuantes que se originam no interior do pavimento carregado, para posterior comparação com os valores de deslocamentos e deformações admissíveis que são função do tipo de material empregado na estrutura do pavimento.

As estruturas obtidas com o emprego da Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 do DER/SP (2006) serão verificadas por meio de Procedimentos Mecanicistas, utilizando – se para tal, as equações de fadiga apresentadas nesta instrução de projeto e o Programa Computacional *ELSYM-5*.

O programa computacional *ELSYM-5* baseia-se em fundamentos da teoria da elasticidade, utilizando-se métodos indiretos para a solução de equações de equilíbrio e de compatibilidade entre tensões e deformações, geralmente aplicando conceitos de diferenças finitas ou elementos finitos.

O procedimento de cálculo adotado pelo programa *ELSYM-5* idealiza o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito no plano horizontal. Os materiais são assumidos como sendo isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico linear.

Nas três estruturas analisadas foram alterados apenas o módulo de resiliência, empregados nos materiais das camadas de base, sendo 4.078 kgf/cm² para o agregado reciclado de RCD segundo Motta (2005) e 5.506 kgf/cm² para o RAP Espumado de acordo com Beja (2013).

Foram determinados os deslocamentos e deformações internas da estrutura em seus locais críticos, ou seja: no topo da camada de concreto asfáltico **deslocamento vertical**, na fibra inferior da camada de concreto asfáltico **deformação horizontal de tração** e no topo do subleito **deformação vertical de compressão**.

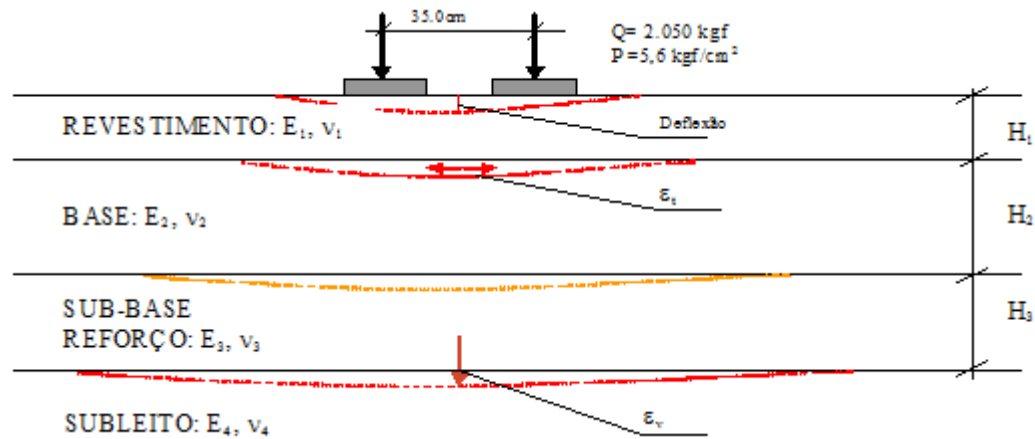


Figura 8.1 – Deslocamentos e deformações da estrutura do pavimento
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Para determinação dos esforços admissíveis, foram empregadas as equações de fadiga indicadas a seguir.

Deslocamento vertical na superfície do pavimento – deflexão – Do ($\times 10^{-2}$ mm)

DNER PRO 11/79 (DNER, 1979)

$$\log Do_{adm} = 3,01 - 0,176 \times \log N$$

Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento – ϵ_t

($\times 10^{-4}$ cm/cm)

FHWA (*Federal Highway Administration*) 1976

$$N = 1,09 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\epsilon_{tadm}} \right)^{3,512}$$

Deformação vertical de compressão no topo da camada de subleito – ϵ_v

($\times 10^{-4}$ cm/cm)

Shell (*Dormon & Metcalf*) 1965

$$N = 6,069 \times 10^{-10} \times \left(\frac{1}{\epsilon_{vadm}} \right)^{4,762}$$

Abaixo estão apresentados, os resultados de cada estrutura de pavimento, indicando deformações, esforços atuantes e esforços admissíveis.

ESTRUTURA	TIPO	D0 (x10⁻² mm)	ϵ_t (x10⁻⁴ cm/cm)	ϵ_v (x10⁻⁴ cm/cm)
1	Atuante	62,96	2,34	4,43
	Admissível	79,62	3,22	5,51

Tabela: 8.04 – Base em BGS – Tensões
Fonte: PRÓPRIA (2014)

ESTRUTURA	TIPO	D0 (x10⁻² mm)	ϵ_t (x10⁻⁴ cm/cm)	ϵ_v (x10⁻⁴ cm/cm)
2	Atuante	58,54	1,74	4,12
	Admissível	79,62	3,22	5,51

Figura: 8.05 – Base em Agregado Reciclado RCD – Tensões
Fonte: PRÓPRIA (2014)

ESTRUTURA	TIPO	D0 (x10⁻² mm)	ϵ_t (x10⁻⁴ cm/cm)	ϵ_v (x10⁻⁴ cm/cm)
3	Atuante	54,91	1,24	3,85
	Admissível	79,62	3,22	5,51

Figura: 8.06 – Base em RAP Espumado – Tensões
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Em referência as tensões admissíveis, todas as estruturas apresentam o mesmo valor, pois estas se correlacionam com o número N utilizado no dimensionamento do pavimento. As tensões atuantes em todas as estruturas foram inferiores aos valores admissíveis, decrescendo os valores de acordo com o aumento do módulo de resiliência das camadas de materiais reciclados aplicados no pavimento.

Conforme observado, ao empregar materiais alternativos, os valores das tensões atuantes se apresentaram bem inferiores aos valores das tensões admissíveis. Enfocando na análise mecanicista, pode-se diminuir a espessura das camadas atribuídas aos materiais

alternativos, mas sempre atendendo as exigências especificadas para as tensões, para que as tensões estejam dentro do admitido por norma.

Para testar essa hipótese foram dimensionadas duas novas estruturas com materiais alternativos empregados na camada de base do mesmo pavimento hipotético.

Sendo assim, tanto para o RAP espumado, como para os agregados reciclados de RCD, foi possível diminuir as espessuras. Essas espessuras foram reduzidas até o ponto em que as tensões atendessem a exigências especificadas.

A seguir são apresentadas as novas estruturas de pavimento com suas respectivas espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson.

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MR (kgf/cm²)*	μ*
CONCRETO ASFÁLTICO	5	35000	0,35
AGREGADOS RECICLADOS RCD	11	4078	0,35
RACHÃO	20	2500	0,40
SOLO SELECIONADO (CBR 10% EN)	14	1000	0,45
SOLO LOCAL (CBR ≥ 5%, expansão < 2 %)	-	500	0,45

*Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

Tabela: 8.07 – BASE: AGREGADO RECICLADO RCD

Fonte: PRÓPRIA (2014)

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MR (kgf/cm²)*	μ*
CONCRETO ASFÁLTICO	5	35000	0,35
RAP ESPUMADO	10	5506	0,35
RACHÃO	20	2500	0,40
SOLO SELECIONADO (CBR 10% EN)	14	1000	0,45
SOLO LOCAL (CBR ≥ 5%, expansão < 2 %)	-	500	0,45

*Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

Tabela: 8.08 – BASE: RAP ESPUMADO

Fonte: PRÓPRIA (2014)

Como demonstrado nas tabelas 8.07 e 8.08 houve um decréscimo na camada de base do pavimento, quando empregamos os materiais alternativos sendo 7 cm para os agregados reciclados de RCD e 8 cm para o RAP espumado.

Abaixo são apresentados, os resultados dessas estruturas, indicando deformações, esforços atuantes e admissíveis.

ESTRUTURA	TIPO	D0 (x10⁻² mm)	ϵ_t (x10⁻⁴ cm/cm)	ϵ_v (x10⁻⁴ cm/cm)
4	Atuante	66,78	1,93	5,35
	Admissível	79,62	3,22	5,51

Figura: 8.09 – Base Agregado Reciclado RCD – Tensões
Fonte: PRÓPRIA (2014)

ESTRUTURA	TIPO	D0 (x10⁻² mm)	ϵ_t (x10⁻⁴ cm/cm)	ϵ_v (x10⁻⁴ cm/cm)
5	Atuante	64,30	1,46	5,33
	Admissível	79,62	3,22	5,51

Figura: 8.10 – Base RAP Espumado – Tensões
Fonte: PRÓPRIA (2014)

De acordo com o apresentado nas tabelas 8.09 e 8.10 as novas estruturas atendem aos critérios da análise mecanicista, considerando que as tensões atuantes ainda estão inferiores as admissíveis.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observa-se que as tensões atuantes nos três tipos de estrutura avaliadas são menores que as tensões admissíveis.

A medida que os módulos de resiliência de cada material aumentam tem-se uma diferença maior entre as deflexões admissíveis e atuantes.

As diferenças crescentes entre as deflexões admissíveis e atuantes proporcionam a possibilidade de redução da espessura das camadas.

A diminuição das espessuras das camadas foi possível, pois, observa-se que as tensões atuantes, mesmo com as espessuras menores foram abaixo das tensões admissíveis.

A possibilidade de diminuição da espessura da camada com a manutenção de sua condição estrutural proporciona redução de volume de material empregado e consequentemente custos.

A análise mecanicista proporciona condição de redução de espessura da camada, entretanto se considerarmos coeficiente estrutural igual a 1 para esses materiais, como foi usado no dimensionamento original, esse dimensionamento não atenderia as condições impostas pelo método do DNIT.

Os coeficientes estruturais ‘K’ não são especificados para esses materiais novos, portanto utiliza-se o valor igual a 1, para os dimensionamentos pelo método DNIT.

Como análise desses resultados pode-se inferir que: Se as espessuras das camadas podem ser reduzidas pela análise mecanicista, há uma possibilidade de verificar os coeficientes estruturais ‘K’ empregados no método DNIT para esses materiais, pois, os resultados apontados por esse universo amostral apontaram para essa possibilidade.

A possibilidade de utilização desses materiais gera alguns benefícios ambientais, tais como:

- Menor extração de material novo das jazidas de rochas;
- Nas estradas que são fresadas o material retirado poderá ser reutilizado não havendo a necessidade de deposição no meio ambiente;
- O mesmo acontece com os materiais de demolição de construção, também não serão depositados em botas fora.

- Essas atividades geram, no mínimo, quantidades menores de passivos ambientais.

10 CONCLUSÃO

Os materiais reciclados avaliados nesta pesquisa se apresentaram superiores ao material convencional BGS, em relação as tensões nos pontos críticos, quando aplicados em camadas de base de pavimentos flexíveis, sendo considerada viável sua aplicação em substituição aos materiais convencionais, e isso proporciona uma vantagem, não só estrutural, mas também ambiental, uma vez que haverá redução de extração de materiais novos do meio ambiente e também a redução de depósitos de materiais retirados das fresagens de pistas deterioradas e das demolições de obras civis.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15113: **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. 2004a.

_____. NBR 15114: **Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. NBR 15115: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004d.

ALVIM, I.M. **Fresagem & Reciclagem de Pavimentos e Suas Aplicações na Restauração de Rodovias**. 1999. Disponível em: <www.fresar.com.br> Acesso em: 10 de fev. 2014.

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.

_____. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ANGULO, S.C., *et al.*. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5. Anais... São Paulo: IBRACON/IPEN, 2002. p. 293-307.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook. Manual series nº 4**, Lexington, KY, USA. 1989.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARRETA *et al.* VII Jornada de Iniciação Científica – 2011. **Estudo comparativo de duas tecnologias diferentes na reciclagem de pavimento asfáltico com espuma de asfalto para utilização em camada de base**. São Paulo, 2011.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. 2013. 222 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 1 ed. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 112 p.

_____. **Pavimentação Sustentável: reaproveitamento do resíduo da construção civil e de material fresado com espuma de asfalto**. São Luís, Associação Brasileira de Pavimentação, jun. 2012. Apresentação. Disponível em: <<http://www.rpu.org.br/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20Sustent%C3%A1vel%20-%20Valmir%20Bonfim.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002**, Brasília, DOU, 17 jul. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 12 de mar. 2014.

DAU, Flávio Nestor Ferreira. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio em usina em área urbana**. 2001. 171 p. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, [2001].

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006a. 274 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2014.

DER/SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **Projeto de pavimentação**. São Paulo: 2006. (IP-DE-P00/001)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 011/79: **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. (Procedimento B)**. Rio de Janeiro, 1979.

Federal Highway Administration. Asphalt Pavement Recycling with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

GESTÃO de resíduos na construção civil: redução, reutilização e reciclagem. [S.l.]: SENAI/SEBRAE/GTZ, [20--]. Disponível em: <http://www.fieb.org.br/Adm/Conteudo/uploads/Livro-Gestao-de-Residuos_id_177__xbc2901938cc24e5fb98ef2d11ba92fc3_2692013165855_.pdf>. Acesso em: 01 out. 2014.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 163 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camada de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. 2003. 99 p. Dissertação (Mestrado). Programa de mestrado em engenharia de transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. - Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

MELO, A. V. S. **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. 2011. 232 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. 229 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

_____. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

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/Especificacao%20de%20Servico/PMSP_ETS_001_2003%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2014.

_____. **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/Relatorio%20de%20Apresentacao%202010/relatorio_de_apresentacao_2010%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2014.

_____. **Entulho**. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/amlurb/entulho/index.php?p=4627>>. Acesso em: 20, jun. 2014.

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação.** 2012. 120 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2012.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. *Coletânea Habitare: Utilização de resíduos na Construção Habitacional.* v. 4. Porto Alegre: Antac, 2003.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo.** 2003. 130 p. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SEVERI, A. A.; BALBO, J. T.; RODOLFO, M. P. **Conceitos mecanicistas básicos sobre pavimentos asfálticos.** São Paulo: USP, 1998. 57p. Apostila do laboratório de mecânica de pavimentos-Escola politécnica da universidade de São Paulo.

SILVA, C. A. R. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.** 2009. 194 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

VEDRONI, J. W. **Estudo de caso sobre a utilização do RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos de Piracicaba SP.** 2007. 202 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

WIRTGEN. **Reciclagem a Frio: Tecnologia de reciclagem a frio,** 2 ed. Alemanha: Windhagen, 2012. 370 p. Disponível em: http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/_allgemein_1/manual/SD_HandbuchKaltrecycling_PT_0113_LO.pdf. Acesso em 10 fev 2014.

ANEXO A – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 1

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	5.000
2	3000.	.350	18.000
3	2500.	.400	20.000
4	1000.	.450	14.000
5	500.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

	DISPOSICAO	
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 4.99 57.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      .01 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -.81
      SYX      -12.03
      SZX      -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
      SXY      .0000E+00
      SXZ      .0000E+00
      SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
      PS 1      -.10
      PS 2      -.81
      PS 3      -12.03
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
      PSS1      .5963E+01
      PSS2      .3549E+00
      PSS3      .5608E+01
DESLOCAMENTOS
      UX      .0000E+00
      UY      .0000E+00
      UZ      .6296E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
      EXX      .9808E-04
      EYY      -.3345E-03
      EZZ      .1255E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
      EXY      .0000E+00
      EXZ      .0000E+00
      EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
      PE 1      .1255E-03
      PE 2      .9808E-04
      PE 3      -.3345E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
      PSE1      .4600E-03
      PSE2      .2738E-04
      PSE3      .4326E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      4.99 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -6.02

```

```

    SYX      5.36
    SZX     -2.03
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00
    SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1      5.36
    PS 2     -2.03
    PS 3     -6.02
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1     .5687E+01
    PSS2     .3695E+01
    PSS3     .1991E+01
DESLOCAMENTOS
    UX      .0000E+00
    UY      .0000E+00
    UZ      .6317E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX     -.2051E-03
    EYY     .2336E-03
    EZZ     -.5152E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY      .0000E+00
    EXZ      .0000E+00
    EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1     .2336E-03
    PE 2     -.5152E-04
    PE 3     -.2051E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1     .4387E-03
    PSE2     .2851E-03
    PSE3     .1536E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

    Z=  57.01 CAMADA NO.  5
    X=   14.40
    Y=    .00
TENSOES NORMAIS
    SXX      .00
    SYX      .01
    SZX     -.22
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00

```

```
SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      .01
PS 2      .00
PS 3      -.22
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1      .1130E+00
PSS2      .4540E-02
PSS3      .1085E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .0000E+00
UY      .0000E+00
UZ      .4101E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .1867E-03
EYY      .2131E-03
EZZ      -.4425E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00
EXZ      .0000E+00
EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1      .2131E-03
PE 2      .1867E-03
PE 3      -.4425E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1      .6556E-03
PSE2      .2633E-04
PSE3      .6292E-03
```

ANEXO B – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 2

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS

----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	5.000
2	4078.	.350	18.000
3	2500.	.400	20.000
4	1000.	.450	14.000
5	500.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

	DISPOSICAO	
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 4.99 57.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS

----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      .01 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -1.01
      SYX      -10.61
      SZX      -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
      SXY      .0000E+00
      SXZ      .0000E+00
      SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
      PS 1      -.10
      PS 2      -1.01
      PS 3      -10.61
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
      PSS1      .5254E+01
      PSS2      .4513E+00
      PSS3      .4803E+01
DESLOCAMENTOS
      UX      .0000E+00
      UY      .0000E+00
      UZ      .5854E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
      EXX      .7841E-04
      EYY      -.2921E-03
      EZZ      .1132E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
      EXY      .0000E+00
      EXZ      .0000E+00
      EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
      PE 1      .1132E-03
      PE 2      .7841E-04
      PE 3      -.2921E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
      PSE1      .4053E-03
      PSE2      .3481E-04
      PSE3      .3705E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      4.99 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -6.26

```

```

    SYY      3.23
    SZZ     -1.94
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY     .0000E+00
    SXZ     .0000E+00
    SYZ     .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1      3.23
    PS 2     -1.94
    PS 3     -6.26
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1     .4745E+01
    PSS2     .2584E+01
    PSS3     .2161E+01
DESLOCAMENTOS
    UX     .0000E+00
    UY     .0000E+00
    UZ     .5879E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX     -.1918E-03
    EYY     .1743E-03
    EZZ     -.2505E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY     .0000E+00
    EXZ     .0000E+00
    EYZ     .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1     .1743E-03
    PE 2     -.2505E-04
    PE 3     -.1918E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1     .3661E-03
    PSE2     .1993E-03
    PSE3     .1667E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  -  SP  -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

    Z=  57.01 CAMADA NO.  5
    X=   14.40
    Y=    .00
TENSOES NORMAIS
    SXX      .00
    SYY      .01
    SZZ     -.20
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY     .0000E+00
    SXZ     .0000E+00

```

```
SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      .01
PS 2      .00
PS 3      -.20
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1      .1053E+00
PSS2      .4045E-02
PSS3      .1012E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .0000E+00
UY      .0000E+00
UZ      .3973E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .1748E-03
EYY      .1982E-03
EZZ      -.4124E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00
EXZ      .0000E+00
EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1      .1982E-03
PE 2      .1748E-03
PE 3      -.4124E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1      .6106E-03
PSE2      .2346E-04
PSE3      .5872E-03
```


ANEXO C – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 3

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	5.000
2	5506.	.350	18.000
3	2500.	.400	20.000
4	1000.	.450	14.000
5	500.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

	DISPOSICAO	
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 4.99 57.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      .01 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -1.36
      SYX      -9.51
      SZX      -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
      SXY      .0000E+00
      SXZ      .0000E+00
      SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
      PS 1      -.10
      PS 2      -1.36
      PS 3      -9.51
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
      PSS1     .4701E+01
      PSS2     .6275E+00
      PSS3     .4073E+01
DESLOCAMENTOS
      UX      .0000E+00
      UY      .0000E+00
      UZ      .5491E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
      EXX      .5726E-04
      EYY      -.2569E-03
      EZZ      .1057E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
      EXY      .0000E+00
      EXZ      .0000E+00
      EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
      PE 1      .1057E-03
      PE 2      .5726E-04
      PE 3      -.2569E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
      PSE1     .3626E-03
      PSE2     .4841E-04
      PSE3     .3142E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      4.99 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -6.29

```

```

    SYX      1.49
    SZX      -1.82
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00
    SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1      1.49
    PS 2      -1.82
    PS 3      -6.29
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1     .3888E+01
    PSS2     .1655E+01
    PSS3     .2233E+01
DESLOCAMENTOS
    UX      .0000E+00
    UY      .0000E+00
    UZ      .5519E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX     -.1763E-03
    EYY     .1236E-03
    EZZ     -.4033E-05
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY     .0000E+00
    EXZ     .0000E+00
    EYZ     .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1     .1236E-03
    PE 2     -.4033E-05
    PE 3     -.1763E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1     .3000E-03
    PSE2     .1277E-03
    PSE3     .1723E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

    Z=  57.01 CAMADA NO.  5
    X=   14.40
    Y=    .00
TENSOES NORMAIS
    SXX      .00
    SYX      .01
    SZX      -.19
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00

```

```
SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      .01
PS 2      .00
PS 3      -.19
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1      .9821E-01
PSS2      .3580E-02
PSS3      .9463E-01
DESLOCAMENTOS
UX      .0000E+00
UY      .0000E+00
UZ      .3864E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .1637E-03
EYY      .1845E-03
EZZ      -.3851E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00
EXZ      .0000E+00
EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1      .1845E-03
PE 2      .1637E-03
PE 3      -.3851E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1      .5696E-03
PSE2      .2077E-04
PSE3      .5488E-03
```

ANEXO D – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 4

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	5.000
2	4078.	.350	11.000
3	2500.	.400	20.000
4	1000.	.450	14.000
5	500.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

	DISPOSICAO	
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 4.99 50.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      .01 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -1.99
      SYX      -12.01
      SZX      -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
      SXY      .0000E+00
      SXZ      .0000E+00
      SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
      PS 1      -.10
      PS 2      -1.99
      PS 3      -12.01
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
      PSS1      .5952E+01
      PSS2      .9432E+00
      PSS3      .5009E+01
DESLOCAMENTOS
      UX      .0000E+00
      UY      .0000E+00
      UZ      .6556E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
      EXX      .6425E-04
      EYY      -.3222E-03
      EZZ      .1370E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
      EXY      .0000E+00
      EXZ      .0000E+00
      EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
      PE 1      .1370E-03
      PE 2      .6425E-04
      PE 3      -.3222E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
      PSE1      .4592E-03
      PSE2      .7276E-04
      PSE3      .3864E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      4.99 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -5.70

```

```

    SYX      3.97
    SZX     -1.88
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00
    SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1      3.97
    PS 2     -1.88
    PS 3     -5.70
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1     .4839E+01
    PSS2     .2928E+01
    PSS3     .1911E+01
DESLOCAMENTOS
    UX      .0000E+00
    UY      .0000E+00
    UZ      .6584E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX     -.1839E-03
    EYY      .1894E-03
    EZZ     -.3649E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY      .0000E+00
    EXZ      .0000E+00
    EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1      .1894E-03
    PE 2     -.3649E-04
    PE 3     -.1839E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1     .3733E-03
    PSE2     .2259E-03
    PSE3     .1474E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

    Z=  50.01 CAMADA NO.  5
    X=   14.40
    Y=    .00
TENSOES NORMAIS
    SXX      .00
    SYX      .01
    SZX     -.27
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00

```

```
SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      .01
PS 2      .00
PS 3      -.27
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1      .1371E+00
PSS2      .6457E-02
PSS3      .1307E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .0000E+00
UY      .0000E+00
UZ      .4550E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .2227E-03
EYY      .2601E-03
EZZ      -.5352E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00
EXZ      .0000E+00
EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1      .2601E-03
PE 2      .2227E-03
PE 3      -.5352E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1      .7953E-03
PSE2      .3745E-04
PSE3      .7578E-03
```


ANEXO E – RESULTADOS DO ELSYM 5 – ESTRUTURA 5

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	5.000
2	5506.	.350	10.000
3	2500.	.400	20.000
4	1000.	.450	14.000
5	500.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

	DISPOSICAO	
CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 4.99 49.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      .01 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -2.69
      SYX      -11.55
      SZX      -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
      SXY      .0000E+00
      SXZ      .0000E+00
      SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
      PS 1      -.10
      PS 2      -2.69
      PS 3      -11.55
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
      PSS1      .5725E+01
      PSS2      .1294E+01
      PSS3      .4431E+01
DESLOCAMENTOS
      UX      .0000E+00
      UY      .0000E+00
      UZ      .6430E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
      EXX      .3968E-04
      EYY      -.3022E-03
      EZZ      .1395E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
      EXY      .0000E+00
      EXZ      .0000E+00
      EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
      PE 1      .1395E-03
      PE 2      .3968E-04
      PE 3      -.3022E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
      PSE1      .4416E-03
      PSE2      .9980E-04
      PSE3      .3418E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

      Z=      4.99 CAMADA NO.  1
      X=      14.40
      Y=      .00
TENSOES NORMAIS
      SXX      -5.48

```

```

    SYX      2.59
    SZX     -1.74
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00
    SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1      2.59
    PS 2     -1.74
    PS 3     -5.48
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1     .4032E+01
    PSS2     .2166E+01
    PSS3     .1867E+01
DESLOCAMENTOS
    UX      .0000E+00
    UY      .0000E+00
    UZ      .6463E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX     -.1649E-03
    EYY      .1461E-03
    EZZ     -.2091E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY      .0000E+00
    EXZ      .0000E+00
    EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1      .1461E-03
    PE 2     -.2091E-04
    PE 3     -.1649E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1     .3111E-03
    PSE2     .1671E-03
    PSE3     .1440E-03
1  ELSYM5  3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE  UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 -  PLANSERVI  - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

    Z=  49.01 CAMADA NO.  5
    X=   14.40
    Y=    .00
TENSOES NORMAIS
    SXX      .00
    SYX      .01
    SZX     -.27
TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY      .0000E+00
    SXZ      .0000E+00

```

```
SYZ      .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      .01
PS 2      .00
PS 3      -.27
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1      .1366E+00
PSS2      .6339E-02
PSS3      .1302E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .0000E+00
UY      .0000E+00
UZ      .4568E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX      .2221E-03
EYY      .2588E-03
EZZ      -.5334E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY      .0000E+00
EXZ      .0000E+00
EYZ      .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1      .2588E-03
PE 2      .2221E-03
PE 3      -.5334E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1      .7922E-03
PSE2      .3677E-04
PSE3      .7554E-03
```