



**Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAVIMENTAÇÃO  
RODOVIÁRIA**

**Millena Damilde de Oliveira**

**FLORIANÓPOLIS  
2014**



**Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAVIMENTAÇÃO  
RODOVIÁRIA**

**Millena Damilde de Oliveira**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para  
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil

**Orientadora: Prof. Dra. Luciana Rohde**

**FLORIANÓPOLIS  
2014**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Millena Damilde de  
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA /  
Millena Damilde de Oliveira ; orientadora, Luciana Rohde -  
Florianópolis, SC, 2014.  
116 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Resíduos na pavimentação. 3.  
Análise mecanicista. 4. Módulo de resiliência. 5.  
Pavimentação. I. Rohde, Luciana. II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III.  
Titulo.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAVIMENTAÇÃO  
RODOVIÁRIA

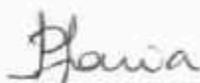
Millena Damilde de Oliveira

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos  
para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil – TCC II.

Banca Examinadora:



Prof.<sup>a</sup> Luciana Rohde, D.<sup>TM</sup>  
Orientadora



Prof.<sup>a</sup> Patricia de Oliveira Faria, D.<sup>TM</sup>



Adosindro Joaquim de Almeida, Me

FLORIANÓPOLIS  
2014



Aos meus pais, Adolfo e Damilde,  
pelo amor e dedicação, e ao meu noivo Tiago,  
pelo carinho, apoio e incentivo.



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à professora Dra. Luciana Rohde, pela orientação e conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo para o aperfeiçoamento deste tema.

Agradeço ao Me. Adosindro Joaquim de Almeida, pelas recomendações e materiais de estudo, auxiliando durante o período de pesquisa.

A todos os professores do curso de graduação de Engenharia Civil, pela dedicação e ensinamentos transmitidos através deste curso, colaborando para minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus pais, Adolfo e Damilde, pelo amor e dedicação constantes aos seus filhos, sempre nos colocando em primeiro lugar, por nos mostrar que o estudo é base fundamental em nossa vida.

Ao meu irmão Maycon, sempre solícito, mais que um irmão, meu amigo.

Agradeço ao meu noivo Tiago, pelo companheirismo, apoio e grande incentivo durante toda esta trajetória, me dando força para continuar sempre em busca dos meus objetivos.



“Dai-me, Senhor, a perseverança das ondas do mar, que fazem de cada recuo um ponto de partida para um novo avanço”.

Cecília Meireles



## RESUMO

Em razão do elevado uso de recursos naturais na construção civil, gerou-se a necessidade de estabelecer um uso mais racional destes recursos. Com foco numa sociedade mais sustentável, este trabalho visa promover a utilização de resíduos sólidos com características e comportamentos semelhantes aos materiais convencionais empregados na pavimentação rodoviária e, assim, incentivando a sustentabilidade dentro da construção civil. Para isto, foram abordados, através do estado da arte, os materiais constituintes na estrutura de um pavimento, assim como levantadas questões sobre evolução legislativa e ambiental e os impactos que um resíduo oferece, ou não, ao meio ambiente. A partir deste ponto, são analisados os diferentes tipos de resíduos estudados por diversos autores, como o uso de borracha de pneus, asfaltos reciclados, RCD (Resíduos de Construção e Demolição), cinza da casca de arroz, resíduos do carvão mineral e escória de aciaria. Destes resíduos, foram propostas sete estruturas de pavimentos, com quatro tipos dos resíduos, além de uma estrutura com materiais convencionais para comparação. Para a análise mecanicista da estrutura foram levados em conta o módulo de resiliência e coeficiente de *Poisson*, onde, com o uso do *software* Everstress 5.0, chegou-se às respostas estruturais, como as deflexões, deformações e tensões das camadas. Com estes resultados, compararam-se os dados dos pavimentos propostos com a estrutura padrão projetada e valores admissíveis de fadiga e deformação, através do número N de  $1,2 \times 10^7$ . Logo, chegou-se à conclusão que grande parte dos resíduos estudados apresentou bom desempenho à carga aplicada. Apenas para a proposta 5 (revestimento de asfalto reciclado) foi sugerido um novo dimensionamento, por não atender a deformação admissível para o volume de tráfego estabelecido. Verificou-se que as propostas 3 (escória - mistura ótima) e 6 (asfalto reciclado na camada de base) apresentaram excelentes comportamentos quanto à resistência à carga aplicada, e consequentemente evitando o aparecimento de trincas causadas pela fadiga, apresentando ainda baixa deformação permanente.

**Palavras Chave:** resíduos; pavimentação, módulo de resiliência; análise mecanicista.



## ABSTRACT

Due to the high use of natural resources in civil construction, was necessary to establish a more rational use of these resources. Focusing on a more sustainable society, this work aims to promote the use of solid waste with similar characteristics and behaviors to conventional materials used in road paving and thus enabling the construction within the sustainability. To this, were addressed by the state of the art, constituent materials in a pavement structure, as well as raised questions about environmental and legislative developments and the impacts that offers a residue, or not, to the environment. From this point, were analyzed the different types of wastes studied by several authors, such as the use of rubber tires, recycled asphalt, CDW (Construction and Demolition Waste), rice husk ash, the waste coal and steel slag. Of these residues, seven pavement structures have been proposed, with four types of waste cited, also a structure for comparison with conventional materials. For the mechanical structure analysis were taken into account the resilient modulus and Poisson's ratio which, using the software Everstress 5.0, reached the structural responses, such as deflections, deformations and stresses of the layers. With these results, the data of the pavements proposed were compared with the project pattern structure and admissible values of fatigue and strain, by the number N of  $1.2 \times 10^7$ . As a result, came to the conclusion that much of the waste used in the proposals presented good performance to the applied load. Just for the proposal 5 (recycled asphalt coating) was suggested a new dimensioning, due not to accord the allowable deflection for the volume of traffic established. It was found that the proposals 3 (steelmaking slag - good mix) and 6 (recycled asphalt into the base layer) showed excellent behavior for the strength of the applied load, thus preventing the appearance of cracks caused by fatigue, and also reducing permanent deformation.

**Keywords:** wastes; paving; resilient modulus; mechanistic analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas constituintes dos pavimentos asfálticos rodoviários. ....	28
Figura 2 - Evolução jurídica. ....	30
Figura 3 - Evolução normativa. ....	33
Figura 4: Caracterização e classificação de resíduos sólidos .....	35
Figura 5 - Aparência das borrachas criogênica (esquerda) e ambiente (direita) .....	37
Figura 6 - Aspecto do material fresado de revestimento asfáltico .....	38
Figura 7 - Resíduos da construção reciclados no canteiro de obra.....	39
Figura 8 - Execução da sub-base de pavimento com agregado reciclado em rua de Belo Horizonte (MG).....	40
Figura 9 - Cinza de casca de arroz: in natura (esquerda) e moída (direita).....	42
Figura 10 - Aspectos da cinza pesada (esquerda) e da cinza volante (direita) ..	43
Figura 11 - Granulometria da escória de aciaria utilizada em pavimentação....	45
Figura 12 - Principais propriedades das escórias aciarias e suas aplicações ....	46
Figura 13 – Metodologia de Trabalho. ....	47
Figura 14 - Fluxograma de dimensionamento mecânico de pavimentos.....	49
Figura 15 - Coeficiente de equivalência estrutural .....	50
Figura 16 - Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	51
Figura 17 - Determinação de espessuras do pavimento .....	52
Figura 18 - Dimensionamento do pavimento.....	52
Figura 19 – Representação esquemática – Esforços atuantes no pavimento.....	57
Figura 20 - Tensões no concreto asfáltico: eixo simples (esquerda) e eixo tandem (direita).....	61
Figura 21 - Estrutura padrão proposta DNIT .....	65
Figura 22 – Parâmetros de entrada.....	65
Figura 23 - Afastamento das rodas para o semi-eixo padrão .....	66
Figura 24 - Variação da resiliência em função da percentagem de borracha....	69
Figura 25 - Módulo de resiliência de amostras com variação no período de cura .....	71

Figura 26 - Comparativo dos Módulos de Resiliência.....	72
Figura 27- Resultado Módulo de Resiliência para as quatro misturas analisadas .....	73
Figura 29 - Variação do módulo de resiliência com teor de ligante .....	77
Figura 30 - ISC agregado reciclado e brita graduada – comparativo.....	78
Figura 32 - Comparação de módulo de resiliência do agregado reciclado e brita graduada .....	80
Figura 33 - Faixa de variação dos módulos de resiliência da EGC.....	81
Figura 34 - Comparação dos módulos de resiliência - EGC e materiais convencionais .....	82
Figura 35 - Módulos de Resiliência da mistura ótima e EGC.....	83
Figura 38- Deflexão admissível.....	87
Figura 39- Deformação de tração nos pavimentos propostos .....	88
Figura 40 - Tensões verticais na fibra superior do subleito .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos solos finos quanto à resiliência.....	54
Tabela 2 - Valor estrutural da camada betuminosa.....	55
Tabela 3 - Granulometrias propostas pelo DNIT.....	64
Tabela 4 - Valores Módulo de Resiliência com ligante convencional e ligantes modificados com borracha.....	70
Tabela 5 - Composição das misturas analisadas.....	73
Tabela 6 - Resultados de módulo de resiliência das misturas.....	76
Tabela 7 - Limites de ISC e expansão - NBR 15115 (2004).....	79
Tabela 8 - Estruturas propostas.....	84
Tabela 9 - Resultados obtidos via análise mecanicista.....	86



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AB	Asfalto Borracha
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARE	Agente de Reciclagem Emulsionado
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BB	Betume Brasileiro
BGS	Brita Graduada Simples
BS	Brita Simples
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo.
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio
DNER-PRO	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Procedimento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNIT-ES	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificação de Serviço
EGC	Escória com Granulometria Corrigida
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MR	Módulo de Resiliência

$M_R$	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
Número N	Número de repetições do eixo simples padrão (eixo simples de roda dupla) de 8,2 toneladas
PMSP-ETS	Prefeitura Municipal de São Paulo – Especificação Técnica de Serviços
RAF	Resíduo Areia de Fundação
RCD <sup>(1)</sup>	Resíduo de Construção e Demolição.
RCD <sup>(2)</sup>	Resistência à Compressão Diametral
RCS	Resistência à Compressão Simples
RL	Emulsão asfáltica catiônica de Ruptura Lenta
TD	Tempo de Digestão
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
WSDOT	<i>Washington State Department of Transportation</i>
$\epsilon_h$	deformação horizontal de extensão
$\epsilon_r$	deformação específica axial resiliente
$\sigma_d$	tensão-desvio vertical
$\sigma_t$	tensão horizontal de tração
$\sigma_v$	tensão vertical de compressão
$\sigma_1$	tensão principal maior
$\sigma_3$	tensão principal menor ou tensão de confinamento
$\delta_r$	máximo deslocamento vertical recuperável
$\Delta$	deslocamento elástico ou resiliente
$\mu$	coeficiente de <i>Poisson</i>
$\nu$	coeficiente de <i>Poisson</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	25
1.1	OBJETIVO GERAL.....	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
1.3	JUSTIFICATIVA .....	26
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
2.1	ELEMENTOS CONSTITUINTES DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS .....	27
2.1.1	LIGANTE ASFÁLTICO .....	28
2.1.2	AGREGADOS .....	29
2.2	EVOLUÇÃO LEGISLATIVA E AMBIENTAL EM RELAÇÃO AO USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA .....	29
2.2.1	EVOLUÇÕES JURÍDICAS.....	30
2.2.2	EVOLUÇÕES NORMATIVAS .....	33
2.2.3	IMPACTOS AMBIENTAIS.....	34
2.3	BORRACHA DE PNEUS.....	36
2.4	RECICLAGEM DE RESÍDUOS ASFÁLTICOS.....	37
2.5	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	39
2.6	CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	41
2.7	AGREGADOS DE RESÍDUOS DO CARVÃO MINERAL .....	42
2.7.1	CINZA VOLANTE.....	42
2.7.2	CINZA PESADA .....	43
2.8	AGREGADOS DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS – ESCÓRIA DE ACIARIA 44	
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	47
3.1	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	48
3.1.1	MÉTODO DO CBR (DNER).....	49
3.1.2	MÉTODO DA RESILIÊNCIA – TECNAPAV .....	53
3.2	ANÁLISE MECANICISTA .....	56
3.2.1	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	57
3.2.2	FADIGA .....	60
3.2.3	EVERSTRESS 5.0 .....	61

<b>4</b>	<b>ANÁLISE E RESULTADOS</b> .....	63
4.1	ESTRUTURA PROJETADA PARA COMPARAÇÃO (DNER).....	63
4.2	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	66
4.2.1	REVESTIMENTO ASFÁLTICO (CONCRETO ASFÁLTICO).....	67
4.2.1.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS.....	67
	LIGANTES ASFÁLTICOS.....	67
4.2.1.2	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS.....	68
4.2.2	MATERIAIS GRANULARES E ESTABILIZADOS.....	74
4.2.2.1	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CONVENCIONAIS.....	74
4.2.2.2	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS.....	75
4.3	ESTRUTURAS PROPOSTAS.....	83
4.4	ANÁLISE MECANICISTA.....	85
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	91
5.1	CONCLUSÕES.....	91
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	95
	APÊNDICE A.....	101
	APÊNDICE B.....	103
	APÊNDICE C.....	105
	APÊNDICE D.....	107
	APÊNDICE E.....	109
	APÊNDICE F.....	111
	APÊNDICE G.....	113
	APÊNDICE H.....	115

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido ao crescente estudo sobre a sustentabilidade na construção civil, em razão do elevado uso de recursos naturais nesta área, tornam-se cada vez mais necessárias pesquisas sobre a utilização dos resíduos gerados e, assim, uma possível otimização destes meios, proporcionado a sustentabilidade dentro da construção civil. Em outras palavras, a recuperação de resíduos pela indústria da construção civil está se firmando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos (Ângulo et al, 2010).

Em vista disso, a importância sobre o uso destes recursos em pavimentação rodoviária não é diferente. Inúmeros estudos sobre a utilização de resíduos em pavimentação mostram que é possível construir estradas com durabilidade significativa, além de oferecer conforto, segurança e economia, itens essenciais para um bom pavimento. O presente trabalho abordará diferentes tipos de resíduos utilizados em pavimentação rodoviária, assim como suas características, desempenhos mecânicos e novidades na área de pesquisa.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar o estado da arte da utilização de resíduos em pavimentação rodoviária, dando enfoque aos métodos utilizados em cada tipo de resíduo, desempenho e suas principais características.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar principais tecnologias aplicadas atualmente para utilização de resíduos em pavimentação rodoviária;
- Fazer uma análise sobre as características dos materiais e comportamentos mecânicos de cada resíduo;
- Avaliar o desempenho dos respectivos métodos aplicados.

### **1.3 Justificativa**

Justifica-se o estudo da utilização de resíduos na pavimentação rodoviária baseando-se na necessidade crescente de utilizar melhor os recursos disponíveis. Por exemplo, a construção civil utiliza uma grande quantidade de matéria prima, e ao reutilizar os rejeitos desse ramo racionaliza-se o processo da construção civil, além de ter um grande apelo comercial.

Portanto, ao se pesquisar esse tema, além de avançar no fator ambiental, pode-se desenvolver o fator econômico, que muitas vezes é um fator motivacional muito mais apreciado pelos empresários do ramo da construção.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Para alcançar a meta proposta, este trabalho de conclusão de curso está estruturado em quatro capítulos, conforme descritos a seguir.

- Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo encontra-se a introdução ao tema, contendo a proposta a ser estudada, o objetivo do trabalho de conclusão de curso, a justificativa do tema abordado e como está estruturado o presente trabalho.

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Contém uma breve revisão bibliográfica, contextualizando o tema da pavimentação rodoviária, e apresentando o estudo realizado sobre os resíduos mais utilizados em pavimentação.

- Capítulo 3 – Metodologia: É apresentado a metodologia implementada e o tipo de estudo para a realização deste trabalho.

- Capítulo 4 – Resultados: Neste capítulo é exposta uma análise do desempenho dos métodos apresentados no capítulo anterior.

- Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações: São expostas as considerações finais do trabalho de conclusão de curso; são feitas também algumas recomendações visando o desenvolvimento de outros trabalhos que venham a ter relação com o tema.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O pavimento rodoviário é uma estrutura formada por várias camadas e tem a função de suportar os esforços aplicados pelo tráfego e variações climáticas, garantido, ainda, conforto e segurança aos usuários da via (BERNUCCI et al., 2008). Sobre a estrutura, resíduos podem ser utilizados nas camadas que a compõem, sem comprometer as características do pavimento e muitas vezes até agregando propriedades relevantes ao projeto.

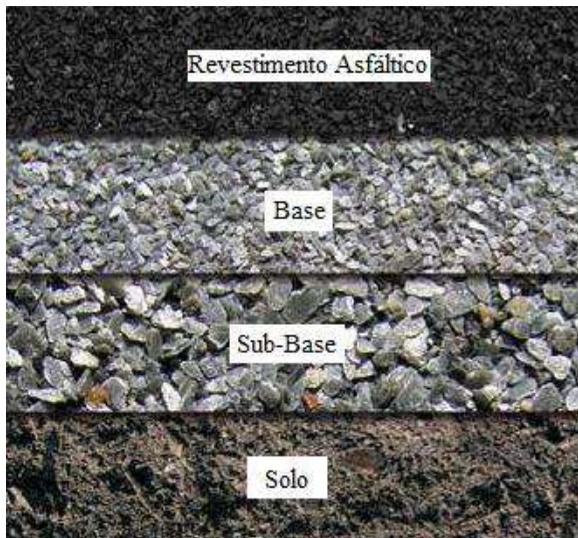
Neste capítulo será colocada uma breve explicação sobre os elementos que constituem o pavimento flexível, além do avanço na legislação sobre determinados resíduos mencionados neste trabalho. Juntamente, será feita a revisão bibliográfica sobre os materiais empregados no processo de utilização de resíduos em pavimentação rodoviária, dentre os quais é possível citar: borracha de pneus, cinza volante, areia de fundição, cinza de casca de arroz, resíduos de asfalto reciclado, resíduos de construção civil, entre outros.

### **2.1 Elementos Constituintes dos Pavimentos Asfálticos**

Tradicionalmente se separam os pavimentos rodoviários em rígidos e flexíveis; os pavimentos rígidos são aqueles onde o revestimento é composto por uma placa de concreto de cimento Portland, já os flexíveis têm seu revestimento formado por uma mistura de agregados com ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008). Nesse trabalho de conclusão de curso, o foco será voltado para os pavimentos flexíveis e os elementos que o constituem.

Os pavimentos asfálticos são formados basicamente por quatro camadas, sendo uma camada de revestimento asfáltico, seguida por uma de base, outra camada de sub-base e por fim uma camada de solo, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Camadas constituintes dos pavimentos asfálticos rodoviários.



Fonte: adaptado pelo autor<sup>1</sup>

A camada de concreto asfáltico é formada por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008). O granular compõe a estrutura que garante a rigidez da mistura, por conseguinte o ligante asfáltico é responsável pela coesão. Eventualmente são adicionados aditivos com o intuito de melhorar as características da mistura (ALMEIDA, 2013).

Nos próximos dois subitens serão caracterizados os dois principais elementos formadores do concreto asfáltico, sendo estes, como já mencionados, o ligante asfáltico e os agregados.

### 2.1.1 Ligante Asfáltico

O asfalto é um ligante betuminoso derivado do petróleo, este é um material adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e com baixo grau de reatividade à maioria dos elementos agressivos (BERNUCCI et al., 2008). Rohde (2007) destaca que a característica

---

<sup>1</sup> Adaptado de [www.jmabauru.com.br](http://www.jmabauru.com.br) – Acesso em 14/05/14.

determinante de um ligante asfáltico é sua suscetibilidade térmica. A autora informa que a temperatura age como um elemento importante no desempenho dos materiais presentes em sua composição, sendo possível modificar seu estado físico ou sua consistência.

Segundo Bernucci et al. (2008), aproximadamente 95% das estradas pavimentadas no Brasil utilizam revestimento asfáltico. Para os autores, existem vários motivos para a utilização de asfalto na pavimentação, podendo destacar a elevada união dos agregados, flexibilidade adequada, impermeabilidade, durabilidade e resistência a elementos agressivos.

### **2.1.2 Agregados**

São considerados agregados areias, pedregulhos, rochas, e outros elementos artificiais, geralmente sendo elementos inertes. Quando utilizados para constituir as camadas de base e sub-base, são compostas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno ou pela mistura desses materiais (BERNUCCI et al., 2008; BRASIL, 2006).

Para Bernucci et al. (2008) os agregados empregados nos pavimentos asfálticos devem ter propriedades de tal modo a suportar tensões do pavimento. Os autores ainda citam que o desempenho deste agregado é diretamente ligado ao modo como estes estão unidos, portanto, ressalta-se a importância do ligante asfáltico.

Logo, as camadas de base e sub-base devem apresentar esta característica. Quando uniformemente granulares, estas camadas serão flexíveis, sendo estabilizadas através de compactação de um material ou composição de materiais com granulometria adequada, juntamente a índices geotécnicos precisos, de acordo com especificações (BRASIL, 2006).

## **2.2 Evolução Legislativa e Ambiental em Relação ao Uso de Resíduos na Pavimentação Rodoviária**

Quando ressaltado o termo legislação, pensa-se apenas no caráter jurídico do tema, mas no Brasil, além da área jurídica, é também citado

o caráter normativo, esse representado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Nesta análise dividiu-se a pesquisa em legislação jurídica e normativa, no que se refere ao uso de resíduos na pavimentação rodoviária, conforme os itens seguintes.

### 2.2.1 Evoluções Jurídicas

De acordo com Bonfim (2012) a evolução do processo de reciclagem pode seguir a seguinte ordem, segundo o seu caráter jurídico:

Figura 2 - Evolução jurídica.

Lei	Data de publicação	Descrição
Resolução CONAMA nº 307	05/07/2002	Classificam os resíduos sólidos da construção civil passíveis de utilização na pavimentação, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rocha, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, entre outros.
PMSP ETS-01/2003	2003	Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.
LEI Nº 14.015	28/07/2005	Para a execução dos serviços de coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos de misturas asfálticas extraídas do pavimento urbano.
DECRETO Nº 48.075	28/12/2006	Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da constr. civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município de São Paulo.
LEI Nº 14.803	26/07/2008	Dispõe sobre o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos e seus componentes.

Fonte: adaptado de BONFIM, 2012

Iniciando pela resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), tem-se o estabelecimento de diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Assim, é ressaltado o seguinte artigo, constante na resolução:

Art. 4º Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

§ 1º Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei, obedecidos os prazos definidos no art. 13 desta Resolução.

O artigo 4º é importante, pois fala claramente que os resíduos da construção civil não podem ser dispostos em aterros comuns e nem em áreas de bota fora, prática comum neste ramo, portanto, abre-se uma demanda para a destinação desse material que é produzido em quantidade considerável.

Encontra-se também outro item bastante relevante, o Art. 10, que discorre sobre as classes de resíduos, conforme transcrito a seguir.

Art. 10. Os resíduos da construção civil deverão ser destinados das seguintes formas:

I - Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

II - Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

III - Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

IV - Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Portanto, a partir dessa resolução, os resíduos da construção civil têm sua destinação normatizada de acordo com a sua classe, sendo assim, agrupados quanto a sua característica em relação a sua destinação final.

Em relação à Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) ETS-01/2003 é possível afirmar que esta tem uma iniciativa relevante, já que nesta são estabelecidas normas para a utilização de camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos da construção civil.

A LEI Nº 14.015 é semelhante à resolução nº 307 do CONAMA, sendo que agora os resíduos são provenientes de retiradas de pavimentos asfálticos. Ressalta-se nessa lei o Art. 4º, § 1º, exposto a seguir.

§ 1º Ficam proibidas as seguintes formas de destinação final das misturas asfálticas extraídas de pavimentos urbanos, públicos ou privados: descarte em qualquer tipo de bota-fora, descarte em aterro sanitário, descarte em terrenos públicos ou privados não credenciados para tal finalidade, remoção para áreas externas aos limites geográficos do Município de São Paulo, depósito em faixas de domínio de vias e rodovias, e assemelhados.

Novamente, abre-se uma lista de opções, pois esse material agora deve ter uma destinação final mais “nobre”, gerando uma necessidade imediata de reutilizar esse material.

Já o decreto Nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006, dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do município de São Paulo.

Considerando a malha viária da cidade de São Paulo, esse é um grande passo; ressalta-se que o Art. 4º desse decreto dispensa obras de caráter emergencial, obras onde o uso de agregados reciclados seja tecnicamente impossível e quando não houver disponibilidade no mercado de material com características adequadas.

A Lei nº 14.803 de 26 de junho de 2008, trata do plano integrado de gerenciamento dos resíduos da construção civil, conforme previstos na Resolução CONAMA nº 307/2002. Ela é uma consolidação da resolução do CONAMA, que agora se torna lei e tem caráter imediato. A lei estipula destino final, multas e responsabilidades.

Tendo findo a avaliação jurídica em relação à legislação, no

próximo item será exposto o caráter normativo referente à utilização de resíduos em pavimentação rodoviária.

### 2.2.2 Evoluções Normativas

Seguindo a linha do tempo apresentada pela PINI (2010), classifica-se a evolução normativa referente à utilização de resíduos em pavimentação rodoviária, conforme a lista apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Evolução normativa.

Número da norma	Data de publicação	Descrição
NBR 15112	30/06/2004	Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos – Áreas de Transbordo e Triagem – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
NBR 15113	30/06/2004	Resíduos Sólidos da Construção Civil e Resíduos Inertes – Aterros – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
NBR 15114	30/06/2004	Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de Reciclagem – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
NBR 15115	30/06/2004	Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação – Procedimentos.
NBR 15116	31/08/2004	Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural – Requisitos.

Fonte: adaptado de PINI, 2010

Em relação às normas NBR 15112, NBR 15113, NBR 15114, NBR 15115 e 15116, estas apresentam normativos relacionados à resolução CONAMA nº 307/2002. Portanto, são itens que regulamentam a utilização de resíduos da construção civil, entre estas se ressaltam a NBR 15115 e a NBR 15116 que são focadas na área de pavimentação, sendo a primeira no uso de agregados reciclados da construção civil na

execução de camadas de pavimentação, com enfoque nos procedimentos e a segunda relacionada aos requisitos.

Ao pesquisar sobre a correlação da legislação e a utilização de resíduos em pavimentação rodoviária, vê-se que a maioria das iniciativas não possuem tempo superiores a 10 anos, e são decorrentes principalmente da resolução CONAMA nº 307/2002, sendo esta um marco na presente área de estudo, pois quando se afirma que os geradores devem priorizar a não geração de resíduos, a diminuição e a reciclagem, expandiu-se toda uma área de pesquisa, que é a da utilização de resíduos em pavimentação rodoviária.

### **2.2.3 Impactos ambientais**

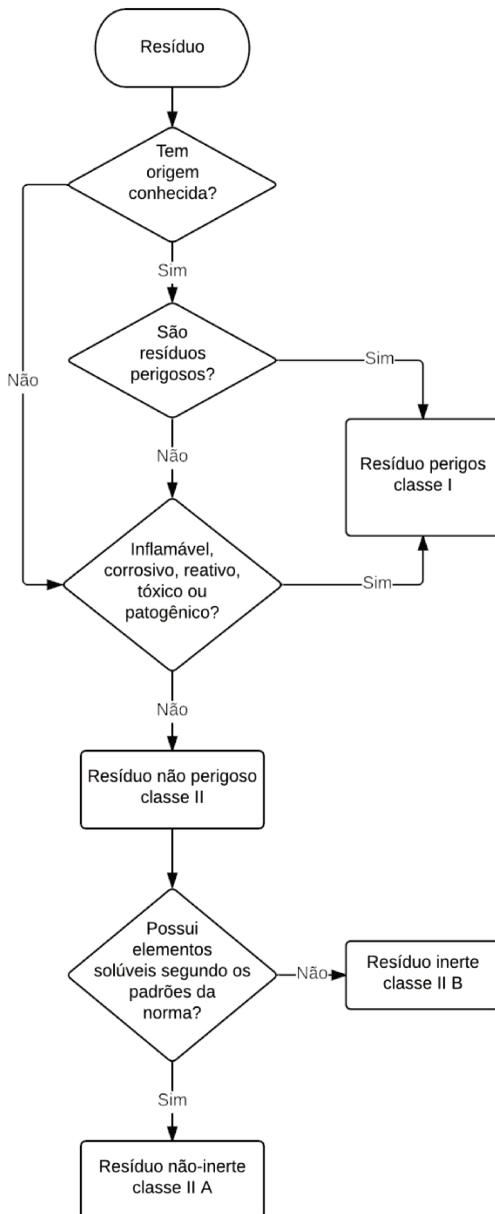
A informação de que um armazenamento e uso de um resíduo possa trazer algum risco ambiental sempre será fundamental. Esta informação é possível através do conhecimento das características de lixiviação e solubilização dos mesmos. Uma análise de sua estrutura e composição química pode apontar como se comportará quando lixiviado. Entretanto, ensaios de lixiviação e solubilização podem fornecer resultados mais seguros sobre o comportamento destes resíduos, indicando quais tipos de elementos serão liberados e as possíveis consequências para a qualidade da água (ROHDE, 2002).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser classificados como:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II – Não perigosos:
  - Classe II A – Não inertes;
  - Classe II B – Inertes.

Os resíduos Classe II A – Não inertes podem apresentar características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. No caso dos resíduos sólidos de Classe II B – Inertes, segundo padrões da norma, seus constituintes não podem ser solubilizados a concentrações maiores aos padrões de potabilidade da água, salvo aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme padrões para o ensaio de solubilização. A Figura 4 expõe esta classificação.

Figura 4: Caracterização e classificação de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 10004:2004

Nos itens seguintes serão abordados temas referentes aos resíduos utilizados em pavimentação rodoviária. Inicialmente serão apresentados os resíduos provenientes de borracha de pneus, resíduos de asfalto reciclado, resíduos de construção civil, agregados de resíduos siderúrgicos, entre outros.

### **2.3 Borracha de Pneus**

Os pneus usados são um problema ambiental conhecido que, por sua natureza (tamanho, forma e constituição físico-química), não são tratados pela coleta de lixo convencional, sendo considerado um resíduo especial (LUND, 2001, apud FONTES, 2009). A grande quantidade de resíduos produzidos pela indústria de borracha e o rejeito de pneumáticos faz com que mais pesquisas sejam motivadas para reciclagem e reaproveitamento deste material (SPECHT, 2004).

Specht (2004) cita ainda o grande número de estudos sobre a adição destes materiais ao ligante asfáltico e seus benefícios, como aumento da ductilidade, melhor aderência entre o ligante e agregado, resistência ao intemperismo entre outros. Logo, a adição de borracha de pneus usados no asfalto para formação de misturas asfálticas colabora para uma destinação final apropriada deste resíduo sólido (THIVES et al, 2013). Ao incorporar borracha granulada de pneus na mistura asfáltica, esta apresenta novas características, formando assim o denominado asfalto borracha.

O desempenho do novo ligante é intimamente ligado às características da borracha granulada utilizada. Como exemplos para a obtenção desse material apresentam-se dois processos: o primeiro é a trituração a temperatura ambiente, e o segundo à temperaturas criogênicas (inferiores a  $-120^{\circ}\text{C}$ ); cada um desses processos resulta num ligante com características particulares (BAKER et al., 2003 apud FONTES, 2009). Assim como o processo úmido e processo seco, ambos utilizados por Specht (2004) para análise das misturas realizadas com borracha.

A aparência da borracha através dos dois processos de trituração é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Aparência das borrachas criogênica (esquerda) e ambiente (direita)



Fonte: FONTES, 2009

Além do fator ecológico, o objetivo de adicionar a borracha de pneus ao asfalto é melhorar o ligante em relação à susceptibilidade térmica e maleabilidade (FONTES, 2009), ou seja, a finalidade do emprego deste resíduo em cimento asfáltico ou em misturas modificadas é aperfeiçoar as características dos materiais de pavimentação (SPECHT, 2004). Portanto, existe uma melhora no pavimento relacionada à adição deste modificador, o que torna essa aplicação atraente do ponto de vista técnico.

## 2.4 Reciclagem de Resíduos Asfálticos

O ato de reciclar pavimentos apoia-se na ideia de reutilizar, após tratamento, materiais provenientes de pavimentos deteriorados (DAVID, 2006). O intuito desse método é reduzir o consumo dos insumos utilizados na constituição do pavimento reciclado.

De acordo com Silva (2011), a restauração através da reciclagem caracteriza a reutilização total ou parcial de camada existente, constituindo uma nova mistura uniforme por meio de processo de mistura, e adição de novos materiais, tendo como finalidade a reaplicação de camada designada a tolerar diferentes condições ambientais além de suportar aos esforços do tráfego.

Segundo David (2006) pode-se reciclar pavimentos rodoviários in situ ou em usina, sendo este processo executado a quente ou a frio. Ainda durante o processo de reciclagem pode ser necessário um acréscimo de materiais adicionais, como: agregados, cimento asfáltico de petróleo (CAP), cimento Portland, emulsões asfálticas, espuma de asfalto e agentes rejuvenescedores. A quantidade de material adicionado varia de acordo com as propriedades desejadas.

Como mencionado anteriormente, o início do processo de reciclagem de resíduo asfáltico está na captação do material resultante de pavimentos danificados. É feita a fresagem deste material do pavimento com o uso de máquina fresadora, sendo o trecho cortado em profundidades determinadas em projeto (FHWA, 1997, apud SILVA, 2011). O aspecto deste resíduo pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Aspecto do material fresado de revestimento asfáltico<sup>2</sup>



Fonte: DAVID, 2006

Cabe salientar que, independente do método utilizado para fresagem, é necessário que o material obtido tenha dimensões condizentes com a faixa granulométrica de trabalho para o tipo de projeto a qual foi destinado. Este agregado fresado é composto por

---

<sup>2</sup> Resíduo originário do depósito de material fresado dos revestimentos asfálticos das vias urbanas de Porto Alegre (DAVID, 2006).

grânulos de agregados envolvidos ou parcialmente cobertos, por asfalto envelhecido, apresentando uma peculiaridade em razão à sua estruturação (SILVA, 2011).

## 2.5 Resíduos de Construção Civil

O reaproveitamento dos resíduos de construção civil está claramente associado à diminuição dos impactos ambientais causados pelo indevido descarte e, da mesma forma, restrição ao uso das matérias-primas de fontes naturais (BAGATINI, 2011). De acordo com o autor, é apresentado como exemplo de reciclagem dos resíduos da construção e demolição (Figura 7), identificados também como RCD, a aplicação em camadas de base e sub-base na pavimentação rodoviária.

Figura 7 - Resíduos da construção reciclados no canteiro de obra



Fonte: [www.administradores.com.br](http://www.administradores.com.br)<sup>3</sup>

Para compreensão de quais resíduos podem ser utilizados em camadas de suporte no pavimento, a Resolução CONAMA n. 307/2002 adota a seguinte definição:

---

<sup>3</sup> [www.administradores.com.br/artigos/economia-e-financas/residuos-solidos-da-construcao-civil-podem-ser-reciclados-no-proprio-canteiro-de-obra/23175/](http://www.administradores.com.br/artigos/economia-e-financas/residuos-solidos-da-construcao-civil-podem-ser-reciclados-no-proprio-canteiro-de-obra/23175/) – Acesso em 15/07/14.

I – 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 etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

Bagatini (2011) afirma que os resíduos da construção civil possuem classificações estabelecidas pela NBR 10.004 e Resolução do CONAMA n. 307 em função das características apresentadas pelos resíduos e os procedimentos que originaram os mesmos.

Como possibilidade de aplicações de RCD, Brasileiro (2013) também cita que, além da utilização em camadas de base e sub-base para pavimentação, como mostra a Figura 8, são empregados em coberturas primárias de vias, camadas drenantes, fabricação de concretos, entre outros.

Figura 8 - Execução da sub-base de pavimento com agregado reciclado em rua de Belo Horizonte (MG)



Fonte: MOTTA, 2005

Para Motta (2005), a utilização deste tipo de agregado reciclado pode ser considerada uma opção aos materiais normalmente usados na pavimentação rodoviária, incentivando uma maior oferta de vias pavimentadas em locais caracterizados preferencialmente com baixo volume de tráfego.

## **2.6 Cinza de Casca de Arroz**

De acordo com Behak (2007), a casca de arroz é o maior subproduto decorrente da produção agrícola de grãos, sendo seu destino final um problema real nos países que produzem o grão. Assim, o autor enfatiza que, em diversas regiões a casca do arroz é queimada e, então, origina-se a cinza com o propósito de diminuir o volume deste resíduo.

No estudo feito por Behak (2007), foi elaborada uma análise sobre a estabilização de um solo com o uso de cinza de casca de arroz, em razão de este solo ser pouco apropriado para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Para o autor, o uso desta cinza com cal mostrou-se eficiente, podendo ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos.

Em outra pesquisa, feita por Del Carpio (2009), pode-se adicionar esse rejeito em uma mistura de concreto compactado a rolo, CCR, sendo este material possível de ser utilizado na construção de estradas. Segundo este autor, um dos principais benefícios em utilizar o CCR é não haver a necessidade de uso de equipamentos específicos para sua construção. Ainda de acordo com o autor, o andamento da construção e mão de obra são poucos exigidos, resultando em gastos mínimos se comparados a outras metodologias construtivas.

Para melhor compreensão, são apresentados dois aspectos da cinza de casca de arroz, *in natura* e moída, conforme Figura 9.

Figura 9 - Cinza de casca de arroz: in natura (esquerda) e moída (direita)



Fonte: DEL CARPIO, 2009

Este CCR pode vir a ser utilizado como base, sub-base e como camada de rolamento para pavimento, entretanto ressalta-se que essa aplicação é mais apropriada a vias onde a velocidade de tráfego é baixa e a frota que transita na via é formada por veículos pesados (DEL CARPIO, 2009).

## 2.7 Agregados de Resíduos do Carvão Mineral

### 2.7.1 Cinza Volante

Também conhecida como cinza leve, este resíduo é formado através da combustão e gaseificação do carvão. Possuem partículas extremamente finas, advindas dos gases de combustão de fornalhas ou gases (WEBER et al, 2012). Especialmente no estado de Santa Catarina, a atividade da exploração do carvão mineral é uma grande fonte de cinza volante, e a destinação final desse passivo ambiental é com certeza um desafio a ser enfrentado.

O complexo termelétrico Jorge Lacerda atualmente é considerado o maior complexo termelétrico movido a carvão mineral da América Latina (...). A cada 100 toneladas de carvão mineral queimadas, são produzidas, aproximadamente, 70% de cinzas volantes, alocadas em silos e posteriormente vendidas para a indústria de cimento, e 30% de cinzas pesadas, destinadas às bacias de decantação (SZELIGA et al, 2011; POZZOBON, 1999).

A Figura 10 apresenta os dois tipos de resíduo resultantes da queima do carvão mineral, cinza pesada e cinza volante.

Figura 10 - Aspectos da cinza pesada (esquerda) e da cinza volante (direita)



Fonte: SZELIGA et al, 2011

Szeliga et al. (2011) indica a possibilidade, dentre outras sugestões de uso, de emprego como agentes estabilizantes de solos. Este estudo abrange a eficácia da adição das cinzas volantes (e pesadas<sup>4</sup>) nas propriedades de um solo, quando utilizados em base e sub-base de pavimentos.

### 2.7.2 Cinza Pesada

Outro resíduo indicado proveniente do carvão mineral são as cinzas pesadas, com granulometria mais grossa, originadas pela combustão e gaseificação do carvão (WEBER et al, 2012).

Farias (2005) relata que a utilização da cinza pesada mostra uma progressão significativa no ramo da construção civil. O autor menciona também que, pesquisas feitas por Pozzobon (1999), indicam resultados favoráveis quando usadas cinzas pesadas como matéria-prima na elaboração de artefatos de cimento, substituído no lugar do cimento Portland ou agregado (areia fina e areia grossa).

Além destas aplicações, a cinza pesada também é investigada para uso em camadas de pavimento, como base e sub-base. Quando incorporadas aos solos, Leandro (2005) indica também a adição de uma pequena porcentagem de cal, atribuindo um melhor comportamento

---

<sup>4</sup> No estudo, os autores fazem referência à cinza pesada como cinza de fundo.

mecânico das misturas solo-cinza a estrutura do pavimento.

Leandro (2005) verifica que apenas a mistura solo-cinza não favorece as propriedades mecânicas do pavimento, mas a adição de um estabilizante - neste caso, a cal - na mistura oferece um benefício significativo quanto ao comportamento das camadas de base e sub-base. Através deste recurso, a utilização da cinza pesada na área de pavimentação acaba se tornando uma solução eficaz.

## **2.8 Agregados de Resíduos Siderúrgicos – Escória de Aciaria**

Os resíduos siderúrgicos são utilizados em diversas aplicações. Para Wesseling (2005), o preço elevado dos materiais de construção que podem ser aproveitados na pavimentação, a limitação dos recursos naturais, assim como a atual legislação no país e as novas determinações na construção e manutenção de pavimentos rodoviários fazem com que se torne indispensável uma análise para inserir o uso dos resíduos industriais em todos os setores da construção civil.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a utilização destes resíduos beneficiará o uso adequado dos recursos naturais e contenção dos impactos ambientais advindos das técnicas construtivas, sendo importante também para diminuição dos gastos e aumento da vida útil do pavimento.

Os resíduos siderúrgicos são utilizados em diversas aplicações, de acordo com Rohde (2002) pode-se evidenciar sua utilização como matéria-prima para produção cimentícia, fertilizante, estabilização de solos, camada de leito para estradas de ferro e também na pavimentação rodoviária.

Na pavimentação, sua principal aplicação é como agregado, rivalizando diretamente com a areia e a brita, se destacando principalmente pela sua dureza, durabilidade e drenagem livre. Adicionalmente, mostra elevada resistência ao esmagamento, possibilitando, assim, seu uso por períodos prolongados com maior conservação (ROHDE, 2002).

O agregado produzido com escória de aciaria apresenta partículas ásperas, angulares e duráveis, tornando-o apropriado para aplicação em pavimentação, além de apresentar características de superfície melhores que os agregados convencionais (KHAN e WAHHAB, 1998, apud WESSELING, 2005).

Estas características podem ser visualizadas conforme Figura 11:

Figura 11 - Granulometria da escória de aciaria utilizada em pavimentação



Fonte: <http://www.cst.com.br><sup>5</sup>

Rohde (2002) ressalta ainda a possibilidade de utilização desse material tanto na mistura do concreto asfáltico como também nas camadas de suporte. Segundo a Norma DNER-PRO 263/94 pode-se empregar na pavimentação as escórias de aciaria em camadas de base, sub-base e misturas betuminosas. Portanto, pode-se afirmar com clareza, a aplicabilidade dos resíduos siderúrgicos na pavimentação.

Isto é justificável devido a escória de aciaria se tratar de um elemento que pode satisfazer a todas as granulometrias, mostrar alto Índice de Suporte Califórnia, baixa abrasão Los Angeles, melhor adesividade para emulsões asfálticas e CAPs além de apresentar ótimo poder hidráulico (SILVA, 1994, apud ROHDE, 2002).

Na Figura 12 visualizam-se as principais propriedades das escórias aciarias vinculadas as suas aplicações.

---

5

[http://www.cst.com.br/produtos/co\\_produtos/catalogo\\_produtos/escoria\\_aciaria\\_ld/in\\_natura.asp](http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria_ld/in_natura.asp) - Acesso em 22/10/14.

Figura 12 - Principais propriedades das escórias aciarias e suas aplicações

Propriedades	Aplicações relacionadas
Resistência a compressão	concreto / asfalto / lastro / bases de estrada
Durabilidade	concreto / asfalto / lastro / bases de estrada
Drenagem livre	lastro / bases de estrada / prep. terrenos
Partículas angulares interligadas	concreto / asfalto / lastro
Resistência a viscoplanagem	concreto / asfalto
Inércia	bases de estrada / prep. terrenos
Basicidade	cimento / uso agrônômico
Teor de $P_2O_5$ solúvel	uso agrônômico / fertilizantes

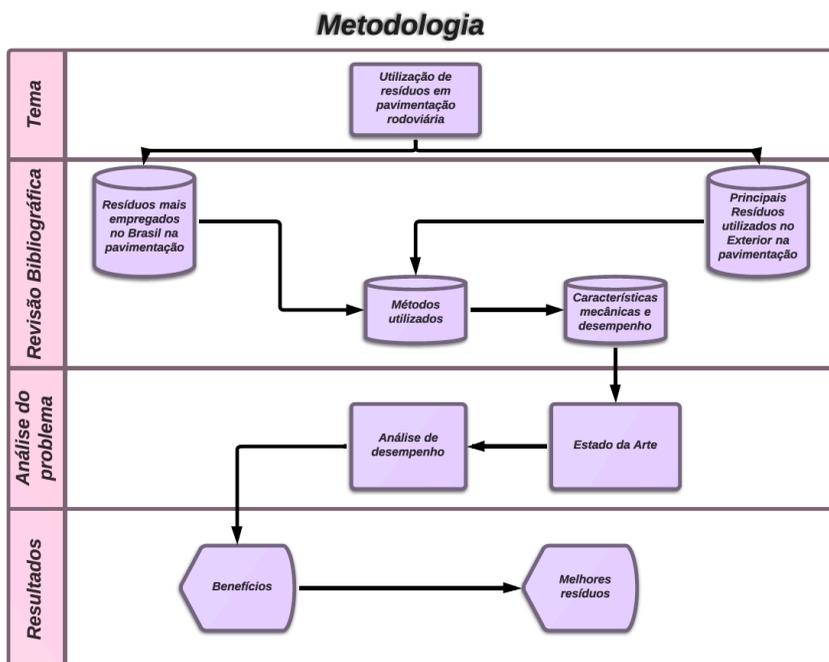
Fonte: adaptado de <http://www.metalica.com.br><sup>6</sup>

<sup>6</sup> Adaptado de <http://www.metalica.com.br/gestao-ambiental-da-escoria-de-aciaria>, acesso em 20/09/2014.

### 3 METODOLOGIA

Para desenvolver este trabalho de conclusão de curso, foram divididas as atividades em quatro blocos, sendo eles o tema, a revisão bibliográfica, a análise do problema e os resultados. Um esquema mais detalhado pode ser visualizado no fluxograma exposto na Figura 13.

Figura 13 – Metodologia de Trabalho.



Fonte: desenvolvido pelo autor

Através do estado da arte serão apresentadas as referências bibliográficas sobre o tema deste trabalho acadêmico, contribuindo para relacionar os tipos de resíduos mais estudados atualmente e seus resultados quanto ao comportamento mecânico na pavimentação rodoviária.

Neste estudo também serão apresentados alguns fatores considerados importantes como avaliação destes materiais, ou melhor, resume-se a análise de desempenho de cada resíduo. Para que esta averiguação se torne mais satisfatória, serão observados dois elementos importantes, sendo eles:

- Características dos Materiais

Nesta etapa foram expostas as propriedades relevantes destes resíduos.

- Análise mecânica

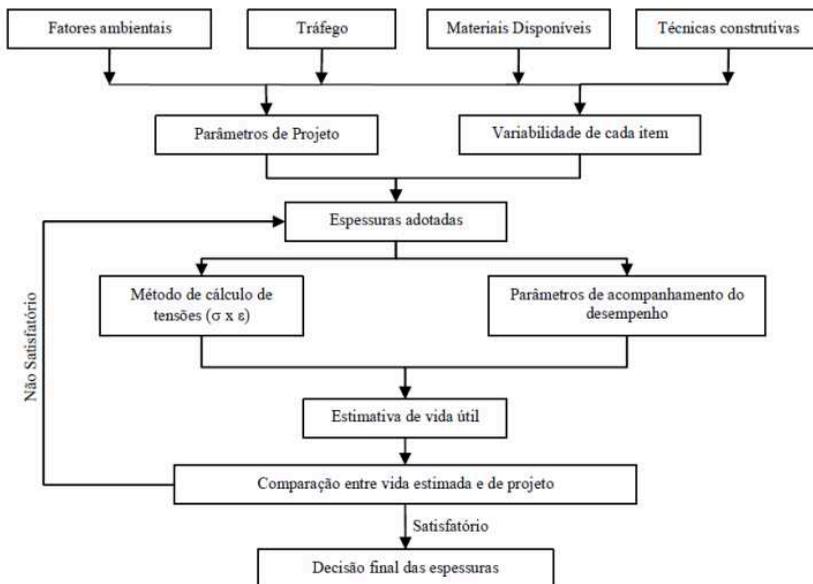
Será abordado o desempenho destes resíduos na estrutura do pavimento quanto ao seu comportamento mecânico sob ação do tráfego.

### **3.1 Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis**

O objetivo deste dimensionamento será comparar a estrutura de um pavimento que apresenta materiais convencionais à uma estrutura com materiais combinados por diferentes resíduos. Esta relação levará em conta sua resistência à ação do tráfego e vida útil de projeto.

A Figura 14 mostra um fluxograma proposto por Motta (1991), indicando os passos que devem ser seguidos na determinação de um método de dimensionamento.

Figura 14 - Fluxograma de dimensionamento mecânico de pavimentos



Fonte: MOTTA, 1991.

### 3.1.1 Método do CBR (DNER)

O dimensionamento do pavimento flexível pelo método do DNER é baseado na metodologia do *United States Army Corps of Engineers (USACE)* e *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, que asseguram a preservação do subleito contra as deformações plásticas excessivas no decorrer do projeto. A metodologia USACE é um método empírico, com embasamento em dados experimentais de condições climáticas e solos, proporcionando a diminuição de patologias nestes pavimentos (BRASIL, 2006; MEDINA, 1997).

Para aprimoramento deste método, faz-se necessário o emprego de modelos que possam prever o funcionamento do tipo mecânico-empírico, visto que possuem maior campo de aplicação e base em propriedades mecânicas dos solos e matéria-prima de pavimentação. Além disso, o modelo indicado pode melhorar o dimensionamento da

estrutura levando em conta a capacidade de cada camada em suportar os danos causados pelo volume do tráfego (BRASIL, 2006).

O ensaio CBR, de caráter empírico, verifica a capacidade de suporte do subleito e dos materiais que constituem o pavimento. O dimensionamento do pavimento é feito em relação ao número equivalente (N) de operações de um eixo padrão, ao longo do período de projeto escolhido (BRASIL, 2006).

A determinação das camadas do concreto asfáltico começará a partir da carga de tráfego analisado. O método possui fatores de equivalência de operação entre eixos simples e “tandem”, com cargas variadas e eixo simples padrão (eixo simples de roda dupla) com 8,2 tf (18.000 lb). Além disso, existe um fator climático regional, que leva em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diferentes estações do ano (BRASIL, 2006).

O método também possui coeficientes de equivalência estrutural, para os diversos tipos de materiais que constituem o pavimento, conforme Figura 15:

Figura 15 - Coeficiente de equivalência estrutural

<b>Componentes do pavimento</b>	<b>Coefficiente K</b>
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
<b>Camadas granulares</b>	<b>1,00</b>
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: BRASIL, 2006

Em geral, os coeficientes estruturais são especificados como:

- Revestimento:  $K_R$
- Base:  $K_B$
- Sub-Base:  $K_S$
- Reforço:  $K_{Ref}$

Medina (1997) informa que no método do DNER, foram fixadas as espessuras mínimas dos revestimentos asfálticos em função do tráfego (número N de repetições de cargas correspondentes à carga de 8,2 tf). Estas espessuras mínimas são apresentadas na Figura 16:

Figura 16 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

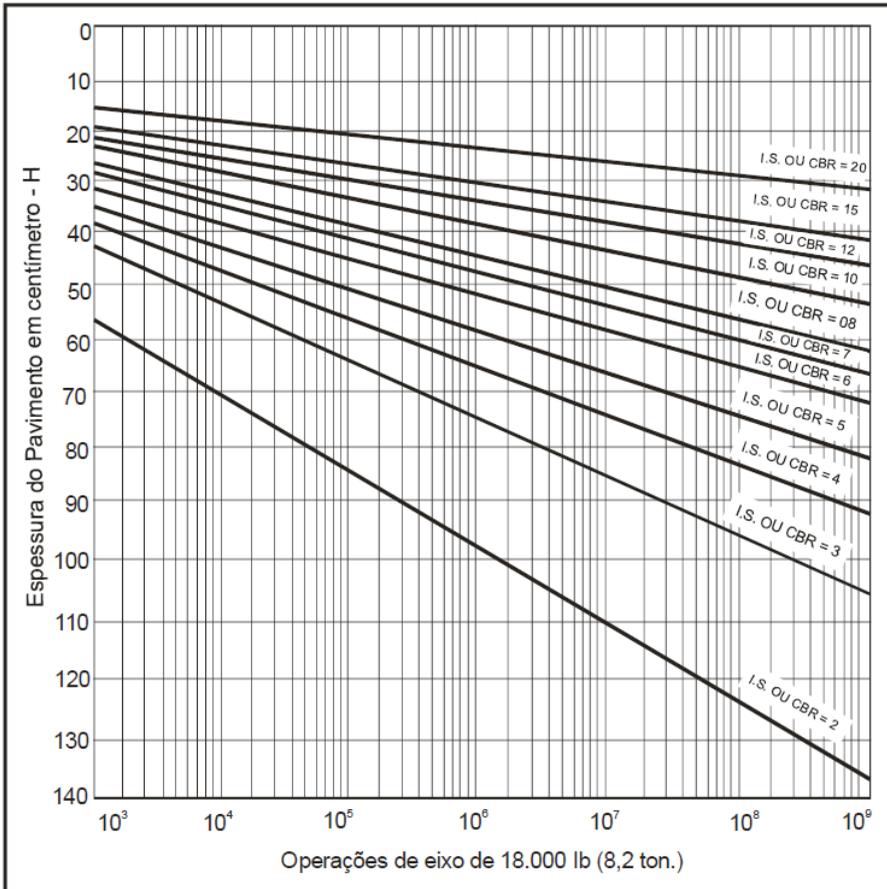
N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: BRASIL, 2006

Como dimensionamento do pavimento, o gráfico da Figura 17 fornece a espessura total do pavimento, em função de N e de IS ou CBR; sendo esta espessura em termos de material com  $K = 1,00$ , ou seja, camada de base granular. O método faz a suposição que sempre haverá uma drenagem superficial apropriada e que o lençol freático foi rebaixado, no mínimo, em 1,50 m em relação ao greide de regularização. A Figura 18 indica a simbologia empregada no dimensionamento do pavimento.

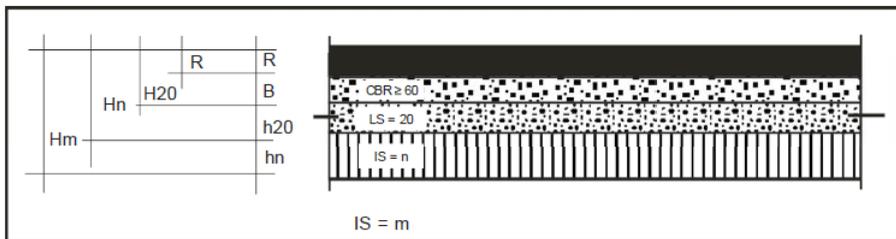
Sobre os limites das espessuras, foi estipulado que a espessura máxima de compactação das camadas granulares será de 20 cm e a mínima será de 10 cm. Para espessura construtiva mínima destas camadas foi definido 15 cm.

Figura 17 - Determinação de espessuras do pavimento



Fonte: BRASIL, 2006

Figura 18 - Dimensionamento do pavimento



Fonte: BRASIL, 2006

No gráfico da Figura 17 podem ser determinadas as espessuras  $H_m$ ,  $H_n$ ,  $H_{20}$  e, pela tabela, pode ser obtido a espessura do revestimento (R). Logo, as espessuras de base (B), sub-base ( $h_{20}$ ) e reforço do subleito ( $h_n$ ) – este último opcional, dependendo da estrutura projetada – podem ser calculadas pelas seguintes inequações:

$$R K_R + B K_B \geq H_{20} \quad (i)$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S \geq H_n \quad (ii)$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m \quad (iii)$$

Medina (1997) também orienta que,

Se o CBR da sub-base for de, pelo menos, 40%, e N não superior a  $10^6$  repetições, permite-se substituir, na primeira inequação, o  $H_{20}$  por  $0,2 H_{20}$ , mas se N for maior que  $10^7$ , recomenda-se substituir na primeira inequação  $H_{20}$  por  $1,20 H_{20}$ .

### 3.1.2 Método da Resiliência – TECNAPAV

Intitulado como Método da Resiliência – TECNAPAV, este método foi desenvolvido pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler, sendo definido como um procedimento da DNER-PRO 269/94 para uso nos projetos de restauração de pavimentos flexíveis.

É um procedimento fundamentado em modelos de resiliência, mecanístico-empírico, fundamentado nos modelos de fadiga de misturas asfálticas, no comportamento resiliente de solos finos e materiais granulares e no cálculo de tensões e deformações tomando a teoria da elasticidade como não linear (FRANCO, 2004).

Ainda segundo Franco (2004), é feita uma análise da superfície do pavimento<sup>7</sup>, verificação das deflexões recuperáveis, recolhimento de amostras e ensaios de caracterização, granulometria com sedimentação e CBR. O dimensionamento é de acordo com a deflectometria, formação do subleito e do pavimento existente.

<sup>7</sup> De acordo com o autor, DNIT 006 e 007/2003 PRO (DNIT, 2003-c; DNIT, 2003-d).

Para aplicação em projetos, é apresentado o processo analítico de dimensionamento e projeto de reforço de pavimentos, avaliando as propriedades resilientes dos materiais<sup>8</sup>:

- Determinação do tipo de subleito através da classificação dos solos finos quanto à resiliência: solos tipo I (baixo grau de resiliência), solo tipo II (grau intermediário), solo tipo III (grau elevado).

A Tabela 1 apresenta a classificação do solo através da percentagem de silte na fração fina (S), que passa na peneira n<sup>o</sup> 200, e CBR:

Tabela 1 - Classificação dos solos finos quanto à resiliência

CBR	S%		
	≤ 35	35 - 65	≥ 65
≤5	III	III	III
6 - 9	II	II	III
≥10	I	II	III

Fonte: BRASIL, 2006

- Determinação da espessura total do pavimento ( $H_t$ ) na forma de material granular com coeficiente de equivalência estrutural (K) igual a 1,00, pelo critério de tráfego N e CBR do subleito:

$$H_t = 77,67 N^{0,0482} CBR^{-0,598} \quad (1)$$

- Definir a espessura mínima do revestimento betuminoso através da equação 2:

$$H_{CB} = -5,737 + (807,961/D_p) + 0,972 I_1 + 4,101 I_2 \quad (2)$$

Onde  $I_1$  e  $I_2$  são constantes associadas às características

<sup>8</sup> O procedimento analítico de dimensionamento e projeto de reforço de pavimentos pelo Método da Resiliência foi apresentado a partir da *Consideração da Resiliência no Projeto de Pavimentos*, que se encontra na apostila de Pavimentação de Estradas, de TRICHÊS (disciplina ministrada em 2014).

resilientes do subleito,  $D_p$  é a deflexão do projeto e  $H_{CB}$  é a espessura mínima do revestimento betuminoso, em centímetros.

- O cálculo de deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), estabelecido através dos estudos de Preussler, Pinto e Medina, permite quantificar através da equação 3 o número cumulativo de repetições ( $N$ ) da deflexão ( $D$ ), no qual provoca a ruptura por fadiga da camada de revestimento:

$$\text{Log } D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N \quad (3)$$

Ressalta-se que a deflexão de projeto  $D_p$  deve atender a condição de  $D_p \leq D_{adm}$ .

- Para o valor estrutural ( $V_E$ ) da camada betuminosa ( $H_{CB}$ ) é feita a análise de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 - Valor estrutural da camada betuminosa

Tipo de Subleito	N				
	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
I	4,0	4,0	3,4	2,8	2,8
II	3,0	3,0	3,0	2,8	2,8
III	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fonte: Adaptado de TRICHÊS, 2014-a

- Para definição da espessura da camada granular ( $H_{CG}$ ) é apresentada a equação 4:

$$H_{CB} V_E + H_{CG} = H_t \therefore H_{CG} \leq 35 \text{ cm} \quad (4)$$

Quando o subleito possui solo do tipo III, o método orienta o emprego de uma camada de sub-base e/ou reforço do subleito. Neste caso, as etapas para o dimensionamento utilizadas anteriormente poderão ser aplicadas levando em consideração o valor CBR e a classificação quanto à resiliência do solo da camada de sub-base ou

reforço do subleito. A camada em questão terá a espessura ( $H_R$ ) definida pela equação 5:

$$H_R = (H_{t1} - H_{t2})/0,70 \therefore H_R \geq 30 \text{ cm} \quad (5)$$

Em que  $H_{t1}$  é a espessura equivalente que corresponde ao CBR do subleito e  $H_{t2}$  é a espessura equivalente correspondente ao CBR da sub-base ou reforço do subleito.

### 3.2 Análise Mecanicista

Bernucci et al. (2008) explicam que o pavimento rodoviário é constituído de inúmeras camadas de espessuras finitas, sendo esta estrutura designada a resistir esforços originados pelo tráfego e clima, além de assegurar conforto e segurança na pista.

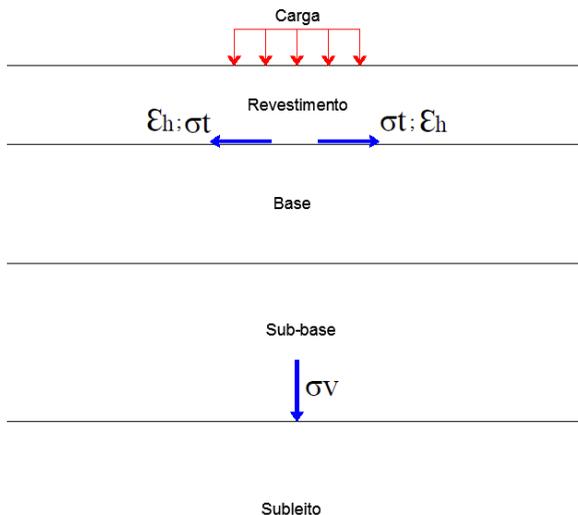
Como camada superior do pavimento, o revestimento asfáltico deve suportar as ações do tráfego e amenizar a transferência destes esforços às camadas inferiores, impermeabilizar a estrutura e ainda melhorar a superfície de rolamento. As camadas de base, sub-base e reforço do subleito possuem uma grande influência estrutural. O propósito de se conhecer a mecânica dos pavimentos é restringir as tensões e deformações em sua estrutura, através da combinação de materiais e espessuras das camadas existentes (MEDINA, 1997).

Os esforços atuantes, representados na Figura 19, considerados importantes na avaliação empírico-mecanicista em uma estrutura de pavimento são:

- deformação horizontal ( $\epsilon_h$ ) na fibra inferior do revestimento asfáltico, devido a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada neste ponto;
- tensão vertical ( $\sigma_v$ ) aplicada sob a camada de subleito.

Os esforços de deformação de tração na fibra inferior da primeira camada são analisados para controle das fendas resultantes da fadiga, assim como a tensão vertical no topo do solo de fundação, avaliada com o propósito de controlar a deformação permanente (FONTES, 2009).

Figura 19 – Representação esquemática – Esforços atuantes no pavimento



Fonte: desenvolvido pelo autor

Devido à fadiga dos materiais causada pela consecutiva solitação dinâmica do tráfego ativo, uma significativa parte da malha rodoviária brasileira estava apresentando deterioração antes do tempo a qual tinha sido projetado. Em consequência disto, foram feitos estudos da resiliência de materiais utilizados em pavimentos, possibilitando uma orientação sobre os comportamentos estruturais (BRASIL, 2006).

### 3.2.1 Módulo de Resiliência

De acordo com Bernucci et al (2008), o método de dimensionamento de pavimentos norte-americano organizado pela AASHTO (versão 1986, revisado em 1993) substituiu o CBR pelo módulo de resiliência do subleito como parâmetro do dimensionamento e o estimou no cálculo dos coeficientes estruturais dos materiais asfálticos. Logo, o módulo de resiliência foi identificado como sendo significativo no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos.

Ainda segundo Bernucci et al (2008), a orientação de substituir o CBR e outros valores de resistência pelo módulo de resiliência teve

fundamento nos seguintes argumentos:

- O MR indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- O MR é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho;
- Há técnicas disponíveis para estimar o módulo de resiliência em campo com testes rápidos e não destrutivos, facilitando a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

O módulo de resiliência pode ser obtido através de retroanálise ou por ensaios de laboratório, sendo este último dividido em dois tipos: Ensaio de Compressão Diametral, para ensaiar materiais betuminosos e o Ensaio Triaxial de Cargas repetidas, para ensaios de solo (FRANCO, 2004).

Esta metodologia originou a oportunidade de análise e previsão dos estados de tensão – deformação de estruturas de pavimentos por meio de programas computacionais, advindo de valores de módulo resiliente, definidos pela equação 6 (BRASIL, 2006):

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (6)$$

Sendo:

$M_R$  = módulo de deformação resiliente (MPa);

$\sigma_d$  = tensão-desvio vertical aplicada repetidamente (MPa);

$\varepsilon_r$  = deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular da tensão-desvio (mm/mm).

Bernucci et al (2008) mostram a definição de  $\sigma_d$  como sendo a tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), obtendo a  $\sigma_1$  como a tensão principal maior e  $\sigma_3$  como a tensão principal menor ou tensão de confinamento, ambas em MPa. Para  $\varepsilon_r$ , esta é calculada através da equação 7:

$$\varepsilon_r = \delta_r / L \quad (7)$$

Sendo:

$\delta_r$  = máximo deslocamento vertical recuperável;

L = altura inicial de referência do corpo de prova submetido às tensões.

O módulo de resiliência é um ensaio recomendado pela AASHTO para análise estrutural das camadas dos pavimentos flexíveis (MEDINA, 1997). Francis Hveem (1955) apud Bernucci et al (2008), considera o termo resiliência como a “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Assim, com o objetivo de analisar este tipo de deformação com maior eficiência no Brasil, foi feita a padronização do ensaio pela DNER-ME 133/94.

Para misturas asfálticas, através de ensaio de módulo de resiliência - baseado nas recomendações da DNER - e seguindo as condições de ensaios e registro dos valores obtidos, pode-se calcular o módulo por meio da equação 8 (BERNUCCI et al, 2008):

$$M_R = (P / (\Delta \times H)) (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

Onde:

$M_R$  = módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo de prova (N);

$\Delta$  = deslocamento elástico ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações da carga P (mm);

H = altura do corpo de prova (mm);

$\mu$  = coeficiente de *Poisson* (adimensional).

Sobre o coeficiente de *Poisson*, Bernucci et al (2008) explicam que, nas misturas asfálticas, este coeficiente pode ser estimado independente do tipo de carregamento, mudando somente com a temperatura. Os autores ainda ressaltam sobre o seu valor, que varia

entre 0,35 (baixas temperaturas) e 0,50 (altas temperaturas), sendo utilizado comumente no Brasil o valor de 0,30.

Medina (1997) destaca sobre os valores usuais de coeficiente de *Poisson*:

$\mu = 0,15$  para concreto de cimento Portland;

$\mu = 0,25$  para misturas asfálticas;

$\mu = 0,35$  para materiais granulares;

$\mu = 0,45$  para solos argilosos.

De acordo com Marodin (2010), o módulo de resiliência é uma das características importantes no dimensionamento de pavimentos através de softwares, com fundamento nos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico. Mais a frente será abordado o uso do programa computacional Everstress 5.0 como ferramenta para dimensionamento e análise mecânica de pavimentos.

### 3.2.2 Fadiga

Outro estudo importante para conservação e prolongamento da vida útil do pavimento é a análise de fadiga. Para ASTM (1979) apud Bernucci et al (2008) fadiga é identificada como:

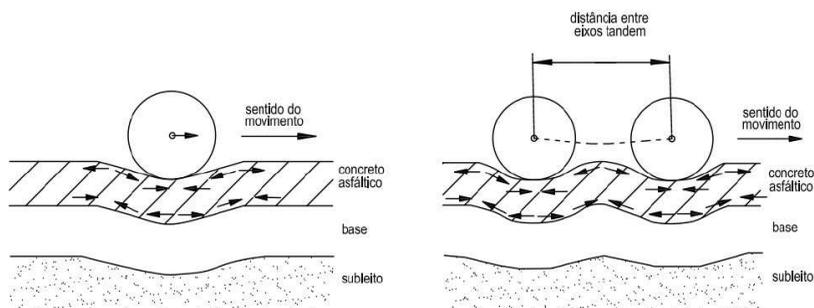
O processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos.

Bernucci et al (2008) destaca que o dano produzido no primeiro ciclo é distinto do dano causado no segundo ciclo, e assim gradativamente. Logo, Medina (1997) explica que a repetição das cargas induz à flexão a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso. A partir deste fenômeno, há o início de trincas do segmento inferior do revestimento, irradiando em direção à superfície. Já nas camadas de revestimentos mais espessas, sendo maiores ou igual 20cm,

as trincas podem iniciar na superfície em razão da curvatura convexa próximo às rodas (ADEDIMILA et al, 1975 apud MEDINA, 1997).

Para melhor visualização, a Figura 20 mostra a representação gráfica das deformações geradas em um revestimento de concreto asfáltico pela passagem de rodas de um veículo:

Figura 20 - Tensões no concreto asfáltico: eixo simples (esquerda) e eixo tandem (direita)



Fonte: MEDINA; MOTTA, 2005 apud MARODIN, 2010

Ainda segundo o autor, o aumento dos teores de ligante podem favorecer a vida de fadiga e o desgaste superficial do pavimento, contudo, com este aumento poderá ocorrer uma deformação permanente. O balanço necessário apresenta uma difícil determinação, sendo que, o meio de melhorar o comportamento dos concretos asfálticos, em relação à deformação permanente, é o emprego de asfaltos modificados com polímero, asfalto borracha ou misturas de granulometria descontínua (MARODIN, 2010; MEDINA 1997).

### 3.2.3 Everstress 5.0

Inúmeros modelos e programas computacionais estão à disposição para cálculos de tensões e deformações provenientes do carregamento - cargas de roda - na estrutura de um pavimento (BRASIL, 2006). Neste estudo, a análise mecanicista será feita através do *software* Everstress – *Layered Elastic Analysis 5.0*, elaborado pelo Departamento de Transportes do estado de Washington (WSDOT) nos Estados Unidos.

O processo consiste em analisar estruturas de, no máximo, cinco

camadas, 20 cargas de roda e 50 pontos de avaliação. Este *software* determina o desempenho estrutural em relação a deslocamento, tensões e deformações estabelecidas nas camadas do pavimento de concreto asfáltico. Para seu aproveitamento é necessário dispor informações como espessura das camadas, coeficiente de *Poisson*, módulo de resiliência, carregamento da estrutura e pontos relevantes a serem analisados (FRANCO, 2004; MARODIN, 2010).

O raio, outro parâmetro considerado na análise, é estimado automaticamente pelo programa computacional através da pressão dos pneus e carga do eixo apresentada. Além destes elementos, devem ser considerados as coordenadas (x, y) para o ponto de aplicação das cargas e o afastamento entre as rodas para o semi-eixo padrão assumido (ALECRIM, 2009).

Segundo Alecrim (2009), aplicando os dados requeridos ao software, este fornece através de cálculos as seguintes respostas estruturais:

- deflexão superficial ( $U_z$ ) em milésimos de milímetro;
- tensão de tração ( $\sigma_{xx}$  ou  $\sigma_{yy}$ <sup>9</sup>) nas fibras inferiores da camada de revestimento asfáltico em MPa;
- deformação de extensão ( $\epsilon_{xx}$  ou  $\epsilon_{yy}$ ) na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico, em  $\mu\text{strain}$ <sup>10</sup>;
- tensões principais maior e menor ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) no plano médio da camada granular em MPa;
- tensão vertical ( $\sigma_{zz}$ <sup>11</sup>) no topo da camada de fundação (subleito), em MPa.

---

<sup>9</sup> No *software* Everstress 5.0 é indicado por  $S_{xx}$  e  $S_{yy}$ .

<sup>10</sup> 1  $\mu\text{strain}$  equivale a  $10^{-6}$  mm/mm.

<sup>11</sup> No *software* Everstress 5.0 é indicado por  $S_{zz}$ .

## 4 ANÁLISE E RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados a análise e os resultados obtidos de quatro tipos de resíduos e materiais convencionais, utilizados na estrutura de um pavimento, por meio de estudos e ensaios realizados por diversos autores. Estes resíduos serão comparados a uma mistura convencional como referência em relação a sua característica e desempenho mecânico, principalmente quando sujeito à ação do tráfego.

### 4.1 Estrutura Projetada para Comparação (DNER)

A metodologia adotada para o dimensionamento da estrutura do pavimento foi a partir do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para pavimentos flexíveis, seguido da verificação deste projeto através de análises mecanicistas.

Como proposta para comparação, foi estabelecida uma estrutura padrão de um pavimento utilizando materiais convencionais:

- Revestimento asfáltico: concreto asfáltico usinado à quente (CBUQ) com 10 cm de espessura;
- Base: brita graduada com 15 cm de espessura;
- Sub-base: brita graduada com 20 cm de espessura;
- Subleito: solo de fundação com CBR de 10%.

Como parâmetros foram utilizados os dados provenientes da tese de Fontes (2009), nesta utilizou-se cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 e a granulometria faixa “C” do DNIT. Adotou-se ainda tráfego médio, onde  $N$  é igual a  $1,2 \times 10^7$ , com eixo padrão de 8,2 ton.

A Tabela 3 apresenta a distribuição granulométrica DNIT, com destaque para a faixa “C” utilizada.

Tabela 3 - Granulometrias propostas pelo DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT – ES 031 (2006)

Estima-se ainda, que a base deve apresentar um CBR igual a 80%, a sub-base com CBR igual a 20% e subleito com CBR igual a 10%. A Figura 21 ilustra a estrutura de pavimento proposta para comparação, feita a partir do método de dimensionamento do DNER:

Figura 21 - Estrutura padrão proposta DNIT

Espessura	Camada	Coef. Poisson	Módulo (Mpa)
10 cm	CBUQ 50/70	0,35	6314
15 cm	Base BGS	0,40	400
20 cm	Sub-base granular	0,40	200
∞	Subleito	0,45	100

Fonte: adaptado pelo autor com dados de FONTES, 2009

Além dos parâmetros das camadas, utilizaram-se ainda outros elementos para o dimensionamento, conforme exposto na Figura 22.

Figura 22 – Parâmetros de entrada

Parâmetro	Valor adotado	Entrada no software
Carga	8,2 tf	20500 N
Pressão do pneu	80 psi	560 kPa

Fonte: Desenvolvido pelo autor

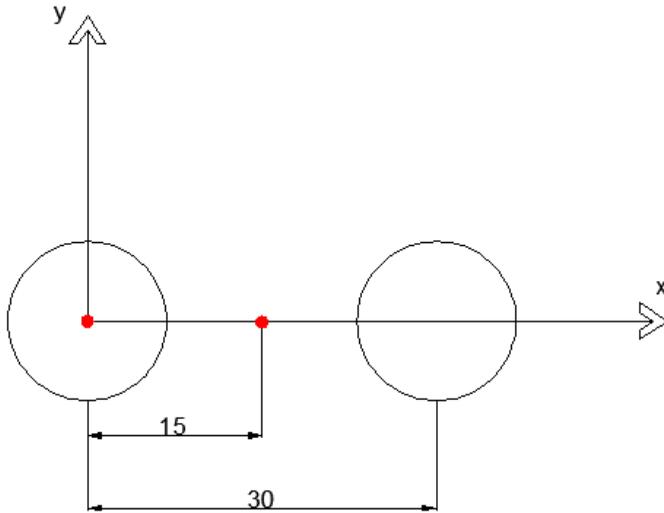
O valor de 20500N é resultado da divisão do carregamento do eixo simples padrão pelo número de rodas para cada eixo, sendo assim, utiliza-se:

$$8,2 \text{ tf} / 4 \text{ rodas} = 2,05 \text{ tf.}$$

O valor de 80 psi corresponde a pressão estimada para os pneus do veículo adotado para dimensionamento.

Ainda, para a distribuição da carga, considerou-se apenas o efeito do eixo simples de roda dupla, portanto a distância adotada no dimensionamento é de 15 cm, conforme visualiza-se na Figura 23.

Figura 23 - Afastamento das rodas para o semi-eixo padrão



Fonte: Adaptado de MARODIN, 2010

Assim, a partir da figura acima, são apresentados os dados para aplicação no programa Everstress 5.0:

- $x = 0$  e  $y = 0$ ;
- $x = 15\text{cm}$  e  $y = 0$ .

## 4.2 Propriedades dos Materiais

Para melhor compreensão de como um material convencional ou resíduo poderá se comportar em uma estrutura asfáltica, estes foram analisados em duas etapas. A primeira como suas características foram baseadas quanto ao emprego em camadas de revestimento asfáltico e a segunda em camadas estruturais com materiais granulares e estabilizados.

#### 4.2.1 Revestimento Asfáltico (concreto asfáltico)

O revestimento asfáltico é a camada preparada para ter a capacidade de receber a carga dos veículos e especificamente a ação climática, por isso, faz-se necessário a impermeabilização e resistência aos esforços do contato pneu-pavimento em trânsito (BERNUCCI et al., 2008).

Diante desta informação, foram investigados diferentes tipos de resíduos como utilização em camada de revestimento, sendo comparados aos materiais convencionais de modo a oferecer características semelhantes ou até superiores quando submetidos à ação de veículos em movimento.

##### 4.2.1.1 Características dos materiais convencionais

###### Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico é derivado da destilação do petróleo, sendo um adesivo termoplástico, possui características como impermeabilidade à água e pouca reatividade (BERNUCCI et al, 2008).

A escolha do CAP 50/70, para o revestimento da estrutura convencional proposta, é baseada no fato de ser o ligante mais utilizado no Brasil.

O uso de concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) para este trabalho é igualmente esclarecida por ser amplamente utilizada no Brasil. Na análise de uma estrutura padrão, utilizando CBUQ, com camada de revestimento de 10 cm de espessura e coeficiente de *Poisson* de 0,35, o valor do módulo dinâmico adotado foi de 6314 MPa<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Valores obtidos de FONTES, 2009.

#### 4.2.1.2 Características dos resíduos

##### Borracha de pneus

Fontes (2009) fez um estudo a respeito de misturas betuminosas com asfalto-borracha, sendo estes realizados pelo processo úmido. A autora faz a avaliação e comparação de misturas betuminosas, lembrando que a avaliação das propriedades mecânicas se torna fundamental por meio de um dimensionamento de uma estrutura de pavimentos, obtendo, assim, a mistura com melhor desempenho.

Na pesquisa feita por Fontes (2009), foram designadas as seguintes nomenclaturas para os asfaltos:

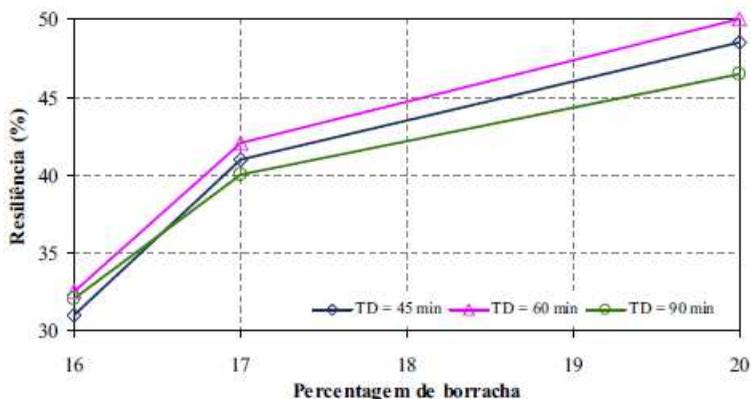
- CAP-20 (CAP 50/70), denominado BB (Betume Brasileiro convencional);
- Betume adquirido através do sistema *terminal blend* com 20% de borracha, nomeado BB20;
- Betume obtido pelo sistema *terminal blend* com 15% de borracha, denominado BB15.

Como caracterização, foi utilizada a norma ASTM D 6114 (1997), que estabelece mínimos para cada tipo de asfalto em relação à temperatura da região. O tipo I é aconselhado para temperaturas entre -1°C e 43°C (ou superiores), tipo II para regiões com temperaturas entre -9°C e 43°C, e o tipo III para temperaturas entre -9°C e 27°C (ou inferiores). Logo, para a região Sul do Brasil, o asfalto-borracha recomendado seria o tipo II, lembrando que a norma especifica um valor mínimo de 20% como critério de resiliência (FONTES, 2009).

Na análise de caracterização dos asfaltos-borracha no parâmetro resiliência, verificados através de ensaios, foram observados os valores de 45,5% para BB20 e 34,5 para BB15. Portanto, os dois asfaltos atendem à norma adotada. Da mesma forma, na realização do ensaio de resiliência foram observados indícios de recuperação elástica do material. No caso do asfalto convencional não houve recuperação elástica, ao contrário dos asfaltos com adição da borracha de pneus, que apresentaram uma alteração no comportamento do material. (FONTES, 2009).

Outro resultado obtido em ensaio pela autora foi que a resiliência do asfalto-borracha é condicionada especialmente pela percentagem de borracha incorporada ao betume. A Figura 24 mostra esta variação pelo tempo de digestão (TD).

Figura 24 - Variação da resiliência em função da percentagem de borracha



Fonte: FONTES, 2009

Specht (2004) também realizou uma pesquisa sobre os fatores que atuam no comportamento de misturas asfálticas com adição de borracha reciclada de pneus. Como materiais, foram utilizados ligante CAP 20, rocha basáltica como agregado e borrachas com origem da produção de bandas para recapagem e também da raspagem de pneumáticos.

Entre os ensaios realizados em amostras de concreto asfáltico, está o módulo de resiliência, atendendo os preceitos da norma DNER-ME 133/94 e TRB (1975). Para o estudo em questão, foram tomados os valores de coeficiente de *Poisson* em 0,30 para temperatura de 25 °C.

Após análise, o autor expõe os valores de módulo de resiliência e resistência à tração das amostras com emprego de diversos teores de borracha e ligantes modificados com borracha:

Tabela 4 - Valores Módulo de Resiliência com ligante convencional e ligantes modificados com borracha

Variável	Ligante Utilizado			
	CAP 20	AB 14	AB 41	AB 68
Teor de Borracha no Ligante (%) <sup>1</sup>	0,0	6,0	12,0	18,0
Módulo de Resiliência (MPa)	6510	5220 (80 <sup>+</sup> )	4480 (69 <sup>+</sup> )	4810 (74 <sup>+</sup> )
Resistência à Tração (MPa)	1,27	1,44 (113 <sup>+</sup> )	1,42 (112 <sup>+</sup> )	1,39(109 <sup>+</sup> )
Relação Mr/Rt	5126	3625	3155	3460
Relação Rt/Mr x10 <sup>2</sup>	0,20	0,28	0,32	0,29

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa da mistura AB; os ligantes foram preparados à 180°C durante 45 minutos com a borracha #30; <sup>2</sup> percentual dos valores de Mr e Rt mantidos, em relação à mistura de referência.

Fonte: SPECHT, 2004

Para Specht (2004), a explicação para o ligante AB 41 (asfalto-borracha 41) apresentar módulo menor em relação ao ligante AB 68 está associado ao espaço intergranular devido à presença do ligante, além de sua maior rigidez. O autor também fez algumas avaliações do módulo de resiliência em função de outros aspectos, sendo que neste trabalho serão adotados os resultados da mistura preparada com ligante asfalto-borracha de módulo de resiliência 5220 MPa.

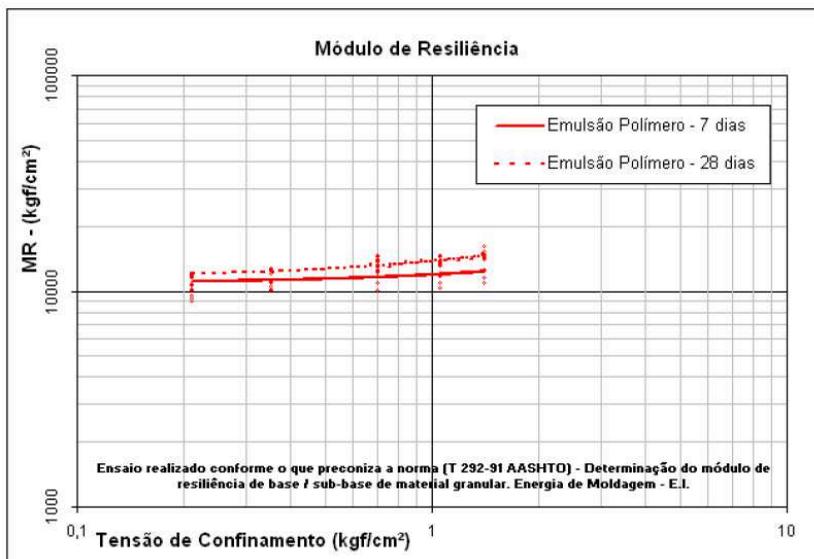
## Resíduos asfálticos reciclados

No estudo de Silva (2011), foi avaliado o desempenho de revestimentos asfálticos danificados utilizando a técnica de reciclagem a frio *in situ* com uso de emulsão modificada por polímero e aditivos.

Entre as análises sobre comportamento mecânico da mistura reciclada, através de ensaios convencionais, foi realizado o ensaio de módulo de resiliência triaxial, onde a autora pôs em prática com base na norma DNER-ME 131/94, considerando a mistura reciclada como material granular, com tensões de confinamento aplicadas de 0,021 a 0,14 MPa e teor ótimo de emulsão e umidade, separados em dois grupos com controle de temperatura (a partir de 25°C) e período de cura distintos para os ensaios.

Os resultados obtidos através destes ensaios são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Módulo de resiliência de amostras com variação no período de cura



Fonte: SILVA, 2011

Segundo Silva (2011), este ensaio triaxial indicou que o comportamento da camada analisada é diferente da camada granular em uma estrutura de pavimento, dando enfoque ao módulo de resiliência que apresentou valor maior que 1000 MPa, variando entre 1100 à 1500.

A autora fez um comparativo de módulo de resiliência da camada reciclada entre três diferentes métodos:

- em laboratório, com corpos de prova obtidos de trecho experimental e também moldados em laboratório;
- pelo método de dimensionamento de reforço DNER – PRO 269/94, em função das deflexões determinadas em campo;
- por retroanálise estrutural, também em função das deflexões medidas em campo.

Os resultados obtidos foram representados na tabela da Figura 26:

Figura 26 - Comparativo dos Módulos de Resiliência

Tipo de Determinação	Módulo de Resiliência
Laboratório	1.200 a 1.300 Mpa
Método PRO 269/94	1.500 a 2.600 Mpa
Retroanálise	1.000 a 1.500 Mpa

Fonte: SILVA, 2011

A partir destes valores, Silva (2011) destaca que os resultados de módulo de resiliência obtidos em laboratório ficaram semelhantes aos resultados das camadas em campo indicados por meio de retroanálise. Sendo que, como módulo efetivo da mistura reciclada, foi tomado o valor por retroanálise, onde a estrutura com camada reciclada com 8 cm apresentou maior módulo, de 1450 MPa<sup>13</sup>, e CBUQ deteriorado, com 7 cm de espessura, módulo de 650 MPa.

Como o objetivo deste trabalho é analisar camadas de revestimentos com aproximadamente 10 cm de espessura, serão considerados os valores obtidos em laboratório através dos ensaios, pela norma DNER-ME 133/94, onde as amostras apresentaram módulo de resiliência entre 1200 MPa a 1300 MPa.

### **Escória de aciaria**

A pesquisa feita por Wesseling (2005) faz uma análise sobre o desempenho mecânico de misturas em concreto asfáltico usando escória de aciaria, resíduos de areia de fundição (RAF) e agregados minerais, neste caso o basalto. Na caracterização e análise do comportamento foi utilizada a metodologia Marshall com emprego do CAP 50/60.

Para designar as composições, que foram feitas de acordo com a porcentagem utilizada em cada mistura, o autor adotou como Escória de Aciaria/R.A.F/Agregado Mineral. Sendo assim, analisou-se quatro misturas:

<sup>13</sup> Período de medidas deflectométricas em Junho/2009 Seco. (SILVA, 2011).

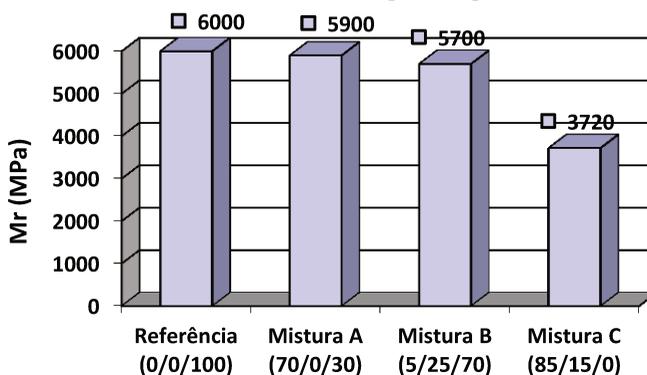
Tabela 5 - Composição das misturas analisadas

Denominação	Escória de Aciaria (%)	Resíduo Areia de Fundição (%)	Brita $\frac{3}{4}$ (%)	Brita $\frac{3}{8}$ (%)	Pó-de-Pedra (%)
Referência (0/0/100)	---	---	12	33	55
Mistura A (70/0/30)	70	---	---	---	30
Mistura B (5/25/70)	5	25	15	43	12
Mistura C (85/15/0)	85	15	---	---	---

Fonte: WESSELING, 2005

O ensaio de módulo de resiliência foi definido pela norma DNER-ME 133/94, analisadas a uma temperatura de 25°C. Na Figura 27 estão apresentados os resultados deste ensaio feito pelo autor para as quatro misturas:

Figura 27- Resultado Módulo de Resiliência para as quatro misturas analisadas



Fonte: adaptado de WESSELING, 2005

Diante dos valores expostos, observou-se que a mistura A seria uma mistura mais apropriada para uso como camada de revestimento, fazendo uma associação do módulo de resiliência e resistência à tração<sup>14</sup> pois, segundo o autor, é necessário que exista uma compatibilização entre a rigidez e resistência da mistura. Portanto, a adição de escória de aciaria em concretos asfálticos apresentou melhor desempenho se comparado à mistura com agregados convencionais, no que diz respeito à durabilidade e propriedades mecânicas (WESSELING, 2005).

<sup>14</sup> Analisado por WESSELING, 2005.

## 4.2.2 Materiais Granulares e Estabilizados

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camada de revestimento asfáltico, construído sobre camadas de base, sub-base e reforço de subleito. O seu comportamento estrutural está condicionado à espessura de cada camada, à rigidez que estas e o subleito proporcionam além da ação recíproca entre as camadas do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Os autores esclarecem ainda que os materiais de base, sub-base e reforço do subleito geralmente são formados por agregados e solos, podendo ser em algumas vezes compostos por aditivos como cal, cimento, emulsão asfáltica e outros.

Diante desta informação, serão analisadas as características dos materiais usualmente empregados nas camadas estruturais além das diversas misturas com resíduos, também empregados na composição de pavimentos rodoviários.

### 4.2.2.1 Características dos materiais convencionais

Para verificação da resistência de uma estrutura padrão, foi empregado brita graduada simples (BGS) como agregado nas camadas de base e sub-base do pavimento proposto.

De acordo com Bernucci et al. (2008), o agregado deve oferecer características como suportar tensões aplicadas na superfície do pavimento e em seu interior. Na escolha do tipo do agregado para análise na camada de base e sub-base, foi estipulado 15 cm (base) e 20 cm (sub-base) de espessura cada, ambos com coeficiente de *Poisson* de 0,40, resultando em um módulo de resiliência de 400 MPa e 200 MPa<sup>15</sup>, respectivamente.

O subleito, por ser a fundação do pavimento e receber as tensões verticais da camada superior, também torna-se importante na estruturação de um pavimento rodoviário. À vista disso, realizou-se também a avaliação do subleito, considerando a espessura da camada como infinita, e estabelecendo 0,45 para o coeficiente de *Poisson*,

---

<sup>15</sup> Valores obtidos de FONTES, 2009.

apresentando o valor de módulo de resiliência de 100 MPa<sup>16</sup>.

#### 4.2.2.2 Características dos resíduos

##### Resíduos asfálticos reciclados

Para fins de utilização como camada de base na restauração de pavimentos, David (2006) realizou um trabalho sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio, incluindo ensaios de módulo de resiliência para verificar a possibilidade de utilização como camadas de base na recuperação de pavimentos. Estas misturas asfálticas foram geradas com material fresado de revestimentos asfálticos envelhecidos.

Para a análise, foram utilizados quatro tipos de misturas, sendo formados por material fresado<sup>17</sup> dos revestimentos asfálticos, dois tipos de ligantes asfálticos (ARE-75<sup>18</sup> e RL-1C<sup>19</sup>) e pó de pedra de origem granítica.

Os ensaios para determinação do módulo de resiliência realizados por David (2006) foram feitos em temperatura de ensaio de 25°C e coeficiente de *Poisson* de 0,30. Na Tabela 6 e Figura 28 são mostrados os valores de módulo de resiliência obtidos no estudo, sendo a média de três determinações para cada teor de ligante e tipo de mistura.

---

<sup>16</sup> Valores obtidos de FONTES, 2009.

<sup>17</sup> Material fresado: material resultante da fresagem efetivada na espessura média de 50 mm de revestimento em concreto asfáltico, depositado há cerca de 5 anos.

<sup>18</sup> ARE-75: Agente de Reciclagem Emulsionado. Tipo de ligante.

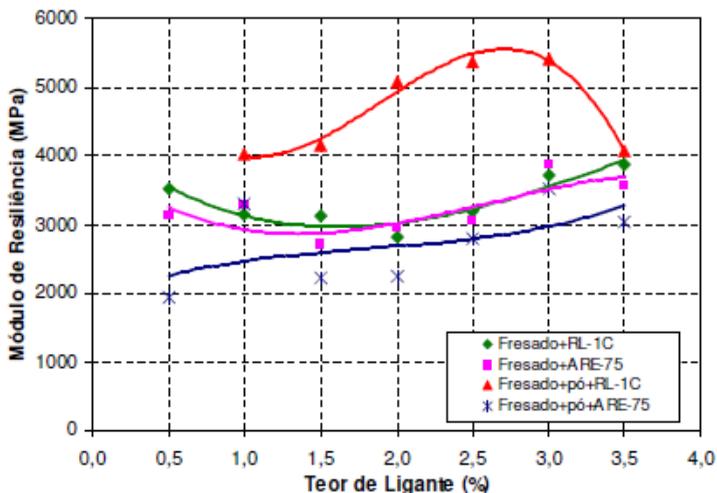
<sup>19</sup> RL-1C: Emulsão asfáltica catiônica de Ruptura Lenta. Podendo ser classificado como 1C ou 2C, o número 1 e 2 estão relacionados à viscosidade relativa e ao volume de cimento asfáltico utilizados na fabricação. (DAVID, 2006).

Tabela 6 - Resultados de módulo de resiliência das misturas

<b>Mistura</b>	<b>Teor de ligante (%)</b>	<b>Módulo de resiliência (MPa)</b>
<b>Fresado+RL-1C</b>	0,5	3514
	1,0	3135
	1,5	3119
	2,0	2813
	2,5	3185
	3,0	3707
	3,5	3871
<b>Fresado+ARE-75</b>	0,5	3112
	1,0	3277
	1,5	2703
	2,0	2939
	2,5	3064
	3,0	3870
	3,5	3555
<b>Fresado+pó+RL-1C</b>	1,0	4022
	1,5	4145
	2,0	5086
	2,5	5370
	3,0	5415
	3,5	4056
<b>Fresado+pó+ARE-75</b>	0,5	1932
	1,0	3290
	1,5	2223
	2,0	2249
	2,5	2784
	3,0	3506
	3,5	3028

Fonte: Adaptado de DAVID, 2006

Figura 28 - Variação do módulo de resiliência com teor de ligante



Fonte: DAVID, 2006

Ainda segundo David (2006), o módulo de resiliência está ligado à rigidez da mistura asfáltica, sendo que valores menores ou maiores podem ser tolerados, dependendo do tipo de estrutura do pavimento. Na análise destes materiais foi observado que a mistura Fresado+pó+RL-1C obteve valores mais elevados em relação às outras misturas, já a mistura Fresado+pó+ARE-75 mostrou valores menores de módulo de resiliência.

Como resultado, verificou-se que as misturas com adição do pó de pedra apresentaram uma significativa importância com o tipo de ligante, com aumento e diminuição dos valores do módulo de resiliência. A autora considerou a possibilidade de estar acontecendo algum tipo de reação entre o pó e o ligante ARE-75.

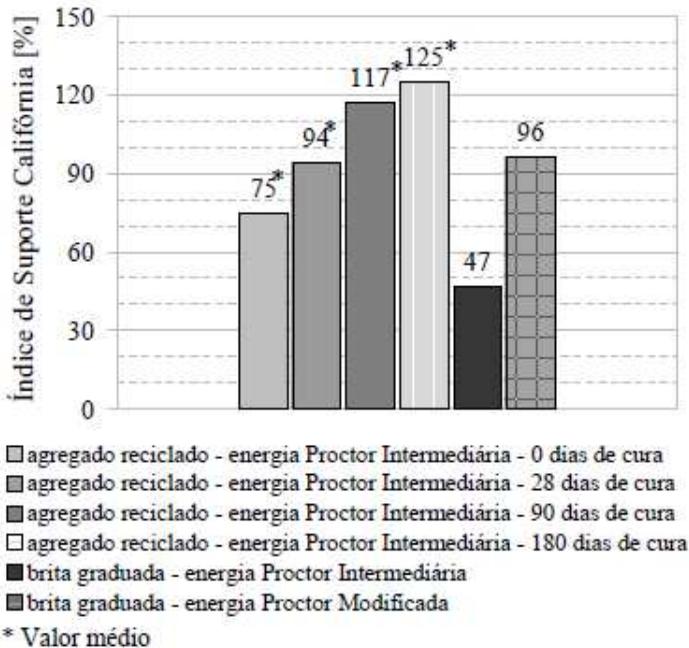
Para análise mecânica deste material utilizou-se a mistura Fresado+pó+ARE-75 com 0,5% de ligante e módulo de resiliência de 1932 MPa.

## Resíduos da construção civil (RCD)

Motta (2005) realizou diversos ensaios em relação aos resíduos da construção civil (RCD), neste identificado como agregado reciclado, em que fez comparativa em relação à brita graduada utilizada habitualmente em camadas de pavimentação, com enfoque nas vias de baixo volume de tráfego.

Entre estes ensaios estão o índice de suporte Califórnia (ISC) e o módulo de resiliência. Dos corpos de prova utilizados no ensaio do ISC, pela autora, um foi compactado na energia Proctor Intermediária e outro na energia Proctor Modificada. Os valores obtidos para a comparação entre os dois tipos de agregados são apresentados na Figura 29:

Figura 29 - ISC agregado reciclado e brita graduada – comparativo



Fonte: MOTTA, 2005

Para Motta (2005), de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 15115 (2004), apresentados na Tabela 7, os resultados de ISC do agregado reciclado são atendidos. Logo, o agregado reciclado estudado pela autora mostra-se indicado para a estrutura de um pavimento como reforço de subleito, sub-base e ainda como base, sendo este último para baixo volume de tráfego.

Tabela 7 - Limites de ISC e expansão - NBR 15115 (2004)

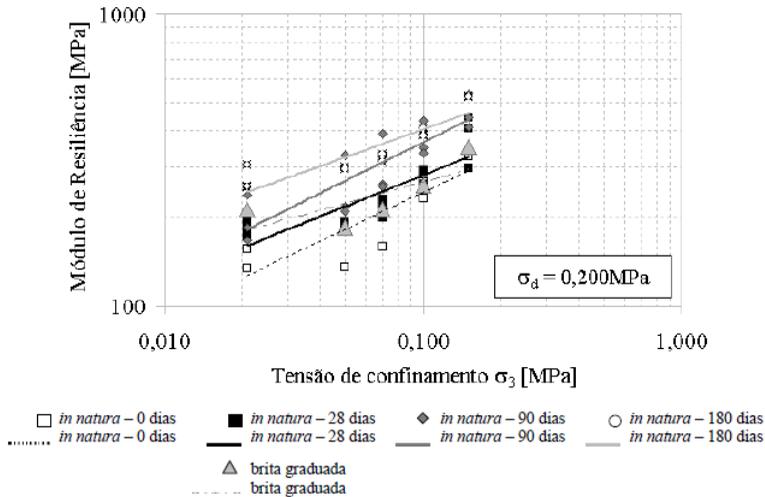
<b>Tipo de camada</b>	<b>ISC (%)</b>	<b>Expansão (%)</b>	<b>Energia Proctor de compactação</b>
<b>Reforço do subleito</b>	$\geq 12$	$\leq 1,0$	Normal
<b>Sub-base</b>	$\geq 20$	$\leq 1,0$	Intermediária
<b>Base*</b>	$\geq 60$	$\leq 0,5$	Intermediária

\* Permitido o uso neste caso somente para vias de baixo volume de tráfego, com número de repetições do eixo padrão de 80kN inferior a 10<sup>6</sup>.

Fonte: adaptado de MOTTA, 2005

Para verificação do módulo de resiliência entre os dois tipos de materiais, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos por Motta (2005). Utilizou-se o agregado reciclado *in natura*, com os tempos de cura especificados na Figura 30, e a brita graduada, compactados em energia Proctor Intermediária.

Figura 30 - Comparação de módulo de resiliência do agregado reciclado e brita graduada



Fonte: MOTTA, 2005

No final, a autora informa que, na análise comparativa com a brita graduada, seu módulo de resiliência foi equivalente ao do agregado reciclado aos 90 dias de cura, próximo de 170 MPa a 420 MPa, salientando que os dois materiais tinham a mesma graduação, energia de compactação e tensão de confinamento.

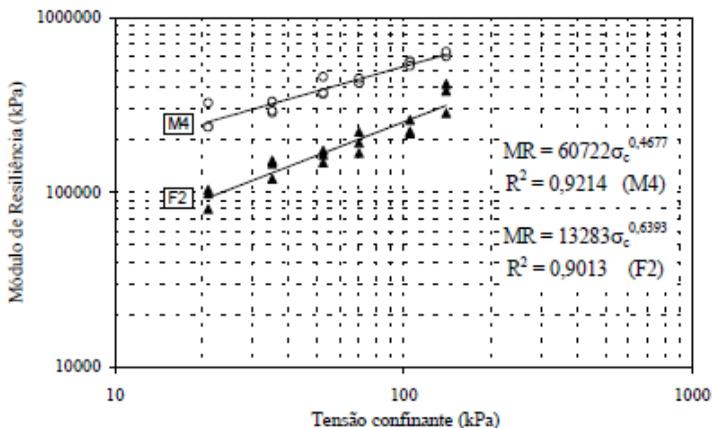
### Escória de aciaria elétrica

Como forma de estudar o uso da escória de aciaria elétrica como agregado para base e sub-base na pavimentação, Rohde (2002) realizou diversos ensaios, entre eles ensaios de granulometria e módulo de resiliência. Durante a análise verificou-se a importância da correção da granulometria da escória, o que apresentou melhorias sobre diversas características como capacidade de suporte, trabalhabilidade e módulos de resiliência.

A partir da análise dos resultados encontrados de amostras de Escória com Granulometria Corrigida (EGC) foi possível compor uma

faixa de variação para os módulos de resiliência em função do tempo de estocagem (ROHDE, 2002):

Figura 31 - Faixa de variação dos módulos de resiliência<sup>20</sup> da EGC



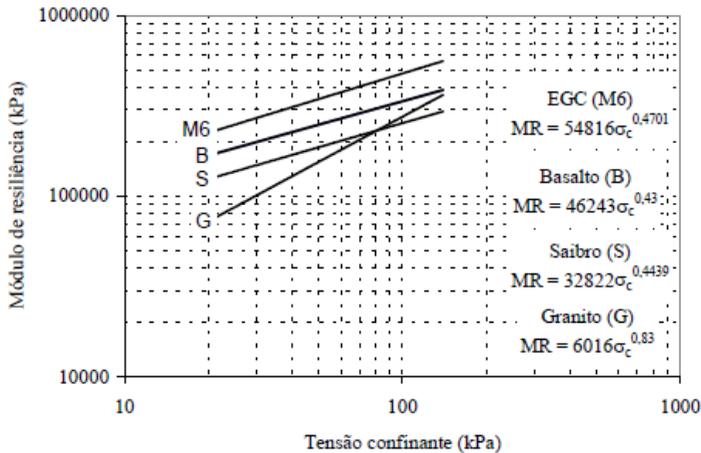
Fonte: Deformabilidade Elástica (ROHDE, 2002)

Rohde (2002) faz uma comparação entre os comportamentos da EGC e materiais granulares convencionais em função da deformabilidade elástica, quando utilizados em camadas de base e sub-base. Os módulos de resiliência da EGC (amostra M6) foram verificados juntamente com os valores obtidos para britas de basalto (B), granito (G) e saibro (S)<sup>21</sup>, como mostra a Figura 32:

<sup>20</sup> Modelo clássico da equação  $MR = k_1 \cdot \sigma_c^{k_2}$ , onde  $\sigma_c$  é a tensão confinante (kPa),  $k_1$  o módulo para  $\sigma_c = 1$  e  $k_2$  o coeficiente angular da reta de ajuste (Rohde, 2002).

<sup>21</sup> Britas de basalto (MARMITT, 2002), granito (CERATTI, 2000) e saibro (LAPAV, 2001) apud ROHDE, 2002.

Figura 32 - Comparação dos módulos de resiliência - EGC e materiais convencionais



Fonte: ROHDE, 2002

Através desta análise, a autora verificou que a EGC possui módulo de resiliência superior a estes materiais granulares, seja qual for o nível de tensão confinante.

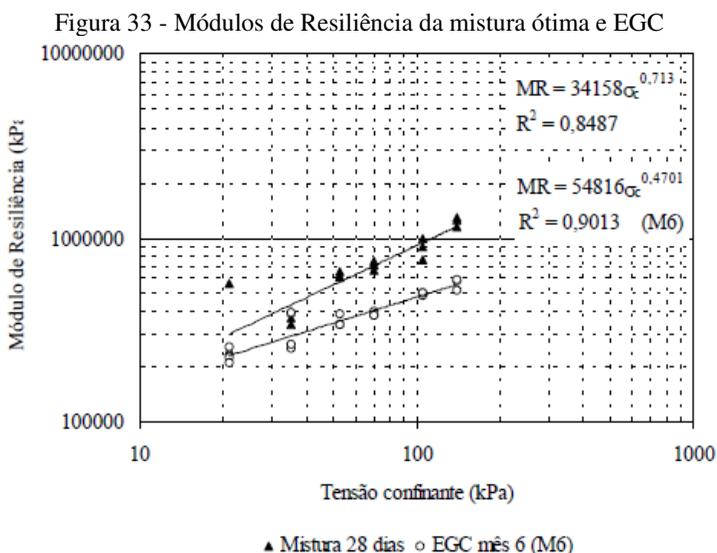
Em relação à base de um pavimento flexível, com tensão de confinamento atuante em torno de 100 kPa, notou-se que o módulo de resiliência da EGC apresentou um valor de 478 MPa, sendo superior ao da brita de basalto, 335 MPa e brita de granito, 275 MPa. Como aplicação para camada de sub-base, com tensão de confinamento aproximado de 50 kPa, a EGC obteve o módulo de resiliência de 345 MPa, sendo maior que o saibro e brita de granito, com respectivos módulos de 186 MPa e 155 MPa (ROHDE, 2002).

Após a comparação da escória com os materiais convencionais citados anteriormente, Rohde (2002) também analisou adição de mais dois resíduos, cinza pesada e cal de carbureto, a fim de encontrar uma mistura ótima.

Com os resultados analisados sobre estes resíduos, foram estabelecidas algumas condições para esta escolha, como resistência e trabalhabilidade. Para a resistência, a autora adotou como mistura ótima a que mostrou maiores valores de resistência à compressão diametral (RCD) e resistência à compressão simples (RCS), com tempo de cura de

28 dias. Logo, chegou-se a conclusão que a mistura ótima é formada por 80% de escória, 20% de cinza pesada e 3% de cal de carbureto<sup>22</sup>.

A Figura 33 mostra a comparação do módulo de resiliência da mistura com cura de 28 dias com a EGC (M6). Ao final, utilizando como material para sub-base e tensão confinante próximo de 50 kPa, a EGC apresentou módulo de resiliência de 345 MPa, enquanto a mistura produzida mostrou módulo de 556 MPa. Portanto, a mistura ótima oferece uma diferença significativa, com valores 60% maiores em relação aos alcançados para a EGC.



Fonte: ROHDE, 2002

### 4.3 Estruturas Propostas

Como estudo para a comparação sobre melhor desempenho entre os resíduos, foram propostas algumas estruturas com os tipos de diferentes materiais alternativos e assim, posterior realização da análise mecânica destas camadas. A Tabela 8 apresenta um resumo das estruturas avaliadas:

<sup>22</sup> Porcentagem em peso calculada sobre o total da mistura de escória e cinza. (ROHDE, 2002)

Tabela 8 - Estruturas propostas

<b>Proposta</b>	<b>Revestimento MR; v</b>	<b>Base MR; v</b>	<b>Sub-base MR; v</b>
<b>Padrão</b>	<b>CBUQ</b> 6314 MPa <sup>23</sup> ; 0,35 FONTES, 2009	<b>BG</b> 400 MPa; 0,40 FONTES, 2009	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>1</b>	<b>CBUQ + Escória</b> 5900 MPa; 0,35 WESSELING, 2005	<b>BG</b> 400 MPa; 0,40 FONTES, 2009	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>2</b>	<b>CBUQ + Escória</b> 5900 MPa; 0,35 WESSELING, 2005	<b>EGC</b> 478 MPa; 0,40 ROHDE, 2002	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>3</b>	<b>CBUQ + Escória</b> 5900 MPa; 0,35 WESSELING, 2005	<b>EGC</b> 478 MPa; 0,40 ROHDE, 2002	<b>EGC (mist. ótima)</b> 556 MPa; 0,40 ROHDE, 2002
<b>4</b>	<b>CBUQ + Borracha</b> 5220 MPa; 0,35 SPECHT, 2004	<b>BG</b> 400 MPa; 0,40 FONTES, 2009	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>5</b>	<b>Asfalto reciclado</b> 1300 MPa; 0,35 SILVA, 2011	<b>BG</b> 400 MPa; 0,40 FONTES, 2009	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>6</b>	<b>CBUQ</b> 6314 MPa; 0,35 FONTES, 2009	<b>Asfalto reciclado</b> 1932 MPa; 0,30 DAVID, 2006	<b>BG</b> 200 MPa; 0,40 FONTES, 2009
<b>7</b>	<b>CBUQ</b> 6314 MPa; 0,35 FONTES, 2009	<b>RCD</b> 420 MPa; 0,40 MOTTA, 2005	<b>RCD</b> 420 MPa; 0,40 MOTTA, 2005

Fonte: desenvolvido pelo autor

<sup>23</sup> Módulo dinâmico

Para poder comparar os resultados obtidos, utilizaram-se camadas com espessuras constantes, 10 cm de revestimento, 15 cm de base e 20 cm de sub-base, variando apenas o módulo de resiliência e o coeficiente de *Poisson*.

#### **4.4 Análise Mecanicista**

As espessuras das camadas dos pavimentos propostos, como o revestimento, base e sub-base, são as mesmas utilizadas na estrutura padrão, possuindo 10 cm, 15 cm e 20 cm, respectivamente. A utilização da mesma espessura na análise mecanicista tem a finalidade de comparar os resultados obtidos, utilizando o pavimento dimensionado com materiais convencionais como parâmetro.

Para simulação destas estruturas, também foram adotados os mesmos coeficientes de *Poisson* da estrutura padrão, variando conforme o tipo de camada, pois, na maioria dos casos, os coeficientes de cada resíduo não foram investigados pelos autores consultados.

A definição de cada proposta foi baseada de acordo com a resistência mecânica apresentada por cada resíduo, bem como em suas características específicas. Sendo assim, seguiu-se a recomendação dos autores para o emprego dos materiais nas camadas adequadas ao seu uso.

Utilizando o software Everstress 5.0 chegou-se aos valores apresentados na Tabela 9, que expõem as características dos pavimentos dimensionados. Os resultados completos das análises podem ser visualizados na íntegra nos apêndices A, B, C, D, E, F, G, H.

Tabela 9 - Resultados obtidos via análise mecanicista

	<b>Proposta</b> <b>Revestimento +</b> <b>Base + Sub-</b> <b>base</b>	<b>Deflexão na</b> <b>superfície do</b> <b>pavimento</b> <b>(10<sup>-2</sup> mm)</b>	<b>Deformação de</b> <b>extensão na fibra</b> <b>inferior da</b> <b>camada de</b> <b>revestimento</b> <b>(με)</b>	<b>Tensão de</b> <b>tração na</b> <b>fibra inferior</b> <b>da camada</b> <b>de</b> <b>revestimento</b> <b>(MPa)</b>	<b>Tensão</b> <b>vertical na</b> <b>fibra</b> <b>superior do</b> <b>subleito</b> <b>(MPa)</b>
	CBUQ + BG + BG	35.83	151.73	1.26	-0.033
1	CBUQ/Escória + BG + BG	36.15	156.53	1.21	-0.033
2	CBUQ/Escória + EGC + BG	35.11	145.73	1.12	-0.032
3	CBUQ/Escória + EGC + EGC <sup>24</sup>	29.59	128.62	0.96	-0.028
4	CBUQ/Borracha + BG + BG	36.73	165.27	1.12	-0.034
5	Asf. Reciclado + BG + BG	44.34	227.86	0.39	-0.042
6	CBUQ + Asf. Reciclado + BG	27.00	54.98	0.36	-0.023
7	CBUQ + RCD + RCD	31.43	136.20	1.11	-0.030

Fonte: desenvolvido pelo autor

\*As camadas propostas podem ser visualizadas na Tabela 8.

A partir do projeto de dimensionamento do pavimento para um tráfego médio, onde  $N$  é igual a  $1,2 \times 10^7$ , com eixo padrão de 8,2 ton, analisou-se a deflexão admissível na superfície do pavimento, a

<sup>24</sup> Material utilizado na camada da sub-base: EGC com mistura ótima.

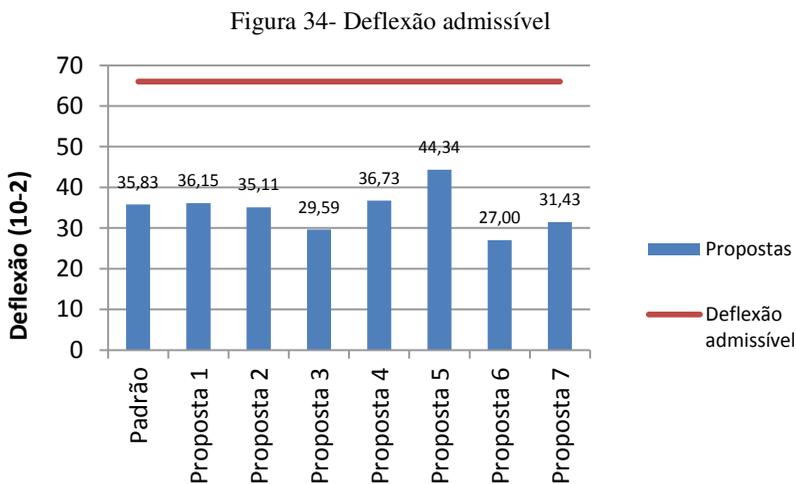
deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento e as tensões verticais na fibra superior do subleito.

A deflexão na superfície do pavimento é calculada entre as rodas do carregamento arbitrado e no revestimento, o ponto crítico é no topo da camada, com contato contínuo com o tráfego (MARODIN, 2010). De acordo com estudos de Preussler e Pinto (DNER, 1994; TRICHÊS, 2014-a), foi desenvolvido o critério de cálculo da deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) - exposto no item 3.1.2 - através da equação 9:

$$\text{Log } D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N \quad (9)$$

Na qual possibilita quantificar o número cumulativo de repetições (N) da deflexão (D) que ocasiona a ruptura por fadiga da camada de concreto asfáltico. Logo, a condição  $D \leq D_{adm}$  deve ser atendida.

Aplicando a equação, com N igual a  $1,2 \times 10^7$ , chegou-se a deflexão admissível de  $D_{adm} = 66 \times 10^{-2}$  mm. Na Figura 34 é possível comparar os resultados calculados:



Fonte: desenvolvido pelo autor

Analisando as deflexões de projeto dos pavimentos, pode-se constatar que nenhum dos valores foi superior à deflexão admissível, ou seja, todos os pavimentos propostos são aceitos para este critério.

O problema de trincamento por fadiga ocorre devido à repetição de cargas alternadas e decorre da amplitude de variações de tensões, sendo esta patologia controlada pela deformação horizontal de extensão, onde os maiores esforços de tração ocorrem nas fibras inferiores da camada de revestimento (MARODIN, 2010).

Segundo Pinto (1991), a partir de várias análises com diferentes amostras de ligantes, a deformação de extensão (fadiga) aplicada a misturas asfálticas pode ser calculada utilizando a equação 10:

$$N_L = 1,21 \times 10^{-8} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{2,66} \quad (10)$$

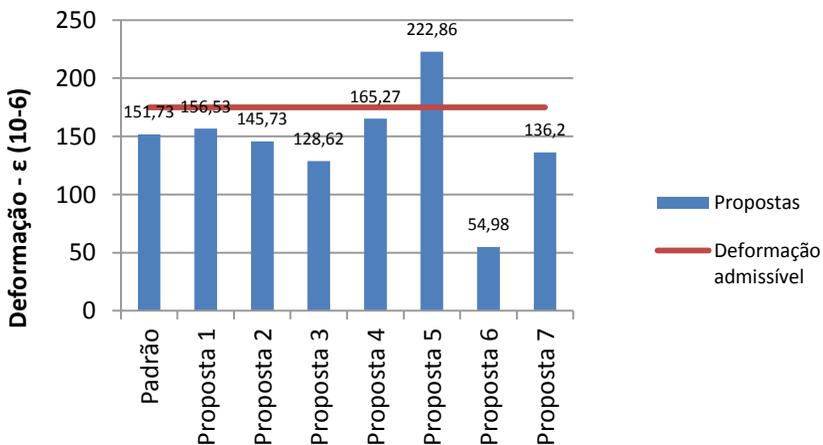
Sendo:

$$N_{\text{campo}} = 10^5 N_L, \text{ neste caso, } 1,2 \times 10^7 = 10^5 N_L.$$

Então  $\varepsilon_{\text{adm}} = 175 \times 10^{-6}$ , portanto, o pavimento dimensionado na proposta 5 não atende a esse carregamento, como mostra a Figura 35.

Cabe ressaltar que esta análise é uma aproximação, uma vez que para uma análise mais acurada seriam necessários os modelos de fadiga para cada um dos materiais. De qualquer forma, pode-se esperar que menores níveis de deformação resultem em maior vida de fadiga.

Figura 35- Deformação de tração nos pavimentos propostos



Fonte: desenvolvido pelo autor

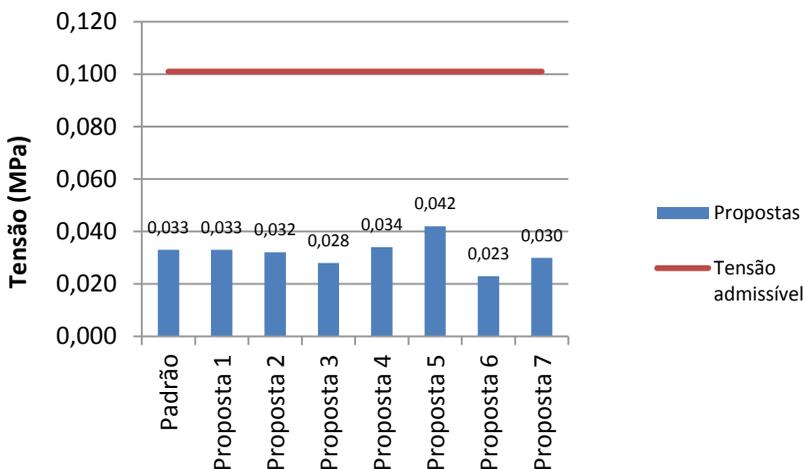
As tensões de tração observadas são bastante elevadas, tendo em vista a recomendação da DNIT-ES 031/2004 de resistência à tração para concreto asfáltico ser maior ou igual a 0,65 MPa. Apenas as estruturas 5 e 6 estariam protegidas quanto à ruptura por excesso de tensão de tração na fibra inferior do revestimento.

Para a verificação das tensões verticais no topo do subleito ( $\sigma_{vadm}$ ) foi aplicado o modelo proposto por Heukelom e Klomp (1962), conforme Nuñez (2004):

$$\sigma_{vadm} = \frac{0,006 MR}{1+0,70 \log N} \quad (11)$$

Onde a tensão vertical admissível, no topo do subleito, é  $\sigma_{vadm} = 0,101$  MPa. Da mesma maneira, os resultados para a tensão vertical podem ser visualizados na Figura 36.

Figura 36 - Tensões verticais na fibra superior do subleito



Fonte: desenvolvido pelo autor

As tensões apresentadas pelos pavimentos não extrapolaram a tensão vertical admissível no topo do subleito, indicando a resistência quanto ao carregamento aplicado sob esta camada.

Na avaliação destes quatro parâmetros, observa-se que apenas o pavimento com a proposta de camada de revestimento com asfalto reciclado não apresentou resistência satisfatória para o modelo de Pinto (1991), com o número N de projeto igual a  $1,2 \times 10^7$ . Os demais pavimentos atenderam aos modelos utilizados para avaliação de desempenho, sendo adequados para o tráfego dimensionado.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Foram analisadas oito propostas de pavimentos, sendo um dimensionado para comparação e sete com diferentes tipos de resíduos em diferentes camadas da estrutura do pavimento, todos projetados pelo critério de dimensionamento do DNER. Como meio de comparação, utilizou-se um pavimento com revestimento de 10 cm de CBUQ, base de brita graduada de 15 cm e sub-base de brita graduada com 20 cm.

Sobre a deflexão na superfície da camada de revestimento asfáltico, para número N de  $1,2 \times 10^7$  e com 10 cm de espessura, as estruturas propostas apresentaram valores menores em comparação à deflexão admissível, assim sendo não apresentariam ruptura por fadiga. Os pavimentos que apresentaram menores deflexões foram o pavimento proposto 3, composto por revestimento em CBUQ e escória (70% escória e 30% agregado mineral), base com EGC e sub-base de EGC com mistura ótima, com desempenho ainda superior, apresenta-se a proposta 6, com camada de revestimento em CBUQ, base de asfalto reciclado e sub-base com BG.

Na deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento, a maioria dos pavimentos apresentaram deformações muito próximas do valor admissível, sendo a estrutura proposta 6 com a menor deformação produzida, ao contrário da estrutura proposta 5, com resultado bem maior ao tolerado. Como solução à proposta 5, este poderá ser redimensionado para uma camada de revestimento com espessura maior que 10 cm ou receber uma camada de reforço, podendo ser redimensionado pelo método da resiliência, feita uma análise da superfície do pavimento, assim como a verificação das deflexões recuperáveis, especificados no item 3.1.2 deste trabalho.

Em relação à tensão vertical na fibra superior do subleito, com respectivos módulos de resiliência, as 7 estruturas analisadas e a estrutura padrão apresentaram bons resultados, sendo o pavimento proposto 6, mais uma vez, com a melhor resistência ao carregamento aplicado.

Na verificação quanto ao pavimento dimensionado para

comparação, observando os valores obtidos, é possível constatar que os pavimentos propostos 1, 2, e 4 se aproximam muito ao comportamento do pavimento dimensionado com materiais convencionais. Ressalta-se, ainda, que a proposta 5 também apresentou desempenho muito inferior ao pavimento padrão projetado. Já a proposta 7 mostrou um desempenho levemente melhor, e as propostas 3 e 6 tiveram performance superior em relação ao pavimento usado como padrão de comparação.

A partir destas observações, comprova-se que as propostas de pavimento ofereceram um comportamento satisfatório quanto ao desempenho em relação à fadiga e deformação permanente, com exceção do pavimento com asfalto reciclado na camada de revestimento.

Em vista dos dados estudados e respectivos resultados estruturais calculados, pode-se verificar que o resíduo que apresentou melhor desempenho comparado ao pavimento padrão e aos valores admissíveis foi o asfalto reciclado, para utilização na camada de base.

Os resultados deste trabalho demonstram ainda que a utilização de materiais diferentes dos convencionais resulta em comportamento mecânico diferente da estrutura. A troca de material requer uma análise profunda para garantir uma estrutura adequada às necessidades do carregamento.

Além disso, a escolha do tipo de resíduo também está relacionada ao custo que será gerado ao longo do projeto e execução da estrutura, tanto pelo aspecto logístico quanto pelo aspecto ambiental. Por isto se faz necessário a pesquisa não apenas sobre qual material apresenta um bom desempenho, mas também sobre qual é o mais viável economicamente.

## **5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros**

Recomenda-se para trabalhos posteriores que se proponham outras combinações de estruturas com os resíduos utilizados e variar as espessuras para dimensionar pavimentos equivalentes às respostas estruturais do pavimento de referência.

Abordar outros resíduos que não foram analisados neste trabalho, além de utilizar outras metodologias de dimensionamento de pavimento

e outros programas computacionais de cálculo estrutural para comparação dos resultados.

Realizar um estudo de análise de viabilidade econômica, verificando quais resíduos com melhor desempenho podem oferecer menores custos para seu emprego na pavimentação rodoviária.



## 6 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ALECRIM, Adson Viana. **Estudo do Resíduo de Quartzito Foliado para o Emprego em Estruturas de Pavimentos**. São Paulo, 2009. 168p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim de. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Aplicação dos Aditivos pr plast s e pr flex 20 no Módulo Complexo e na Fadiga – Florianópolis, SC, 2013**. 261p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

ÂNGULO, Sérgio C.; ZORDAN, Sérgio E.; JOHN, Vanderley M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. PCC - Departamento Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica. EPUSP.

BAGATINI, Felipe. **Resíduos de Construção Civil: Aproveitamento como Base e Sub-Base na Pavimentação de Vias Urbanas**. Porto Alegre, 2011. 72pg. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504f. Edição ano 2008.

BONFIM, Valmir. **Pavimentação Sustentável: Reaproveitamento do Resíduo da Construção Civil e de Material Fresado com Espuma de Asfalto** [Internet]. 18<sup>a</sup> Reunião de Pavimentação Urbana. São Luís, Maranhão. 2012. Disponível em: <http://www.rpu.org.br/Pavimentação%20Sustentável%20-%20Valmir%20Bonfim.pdf> – Acesso em 30/04/2014.

BRASIL – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 263/94**: Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994. 03pg.

BRASIL – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-PRO 269/94**: Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1994. 17pg.

BRASIL – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 031/2004**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Diretora de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 3 ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p.

BRASILEIRO, Luzana Leite. **Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico**. Teresina - PI, 2013. 118pg. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais, Curso de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí.

DAVID, Daniela de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DEL CARPIO, Joe Arnaldo Villena. **Estudo da Influência da Adição da Cinza de Casca de Arroz nas Propriedades do CCR (concreto compactado com rolo) para seu uso em Pavimentos Compostos**. Florianópolis, 2009. 138pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Diário Oficial da Cidade de São Paulo. Lei Nº 14.803, de 26 de junho de 2008 [Internet]. DOM de 27 de junho de 2008. Disponível em: [http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/saude/legislacao/0001/Lei\\_2008\\_14803.pdf](http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/saude/legislacao/0001/Lei_2008_14803.pdf) - Acesso em 29/06/2014.

FARIAS, Edney Rodrigues de. **A utilização de Misturas Solo/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise de Aspectos de Comportamento Mecânico Ambiental**. Florianópolis, 2005. 121pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

FONTES, Liseane Padilha Thives L. **Otimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Braga – PT, 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina.

FRANCO, Maurício Luiz de Oliveira. **Estudo do Efeito de Intervenções sobre o Comportamento de Pavimentos de um Grupo de Rodovias do Estado do Paraná**. Florianópolis, SC, 2004, 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

LEANDRO, Rodrigo Pires. **Estudo Laboratorial Acerca da Possibilidade de Aproveitamento da Cinza Pesada de Termelétrica em Bases e Sub-Bases de Pavimentos Flexíveis**. São Carlos 2005. 172p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Legislação Municipal de São Paulo. Decreto Nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006 [Internet]. Publicado na Secretaria do Governo Municipal, em 28 de dezembro de 2006. PMSP. Disponível em: [http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D%20480750000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D%20480750000) - Acesso em 29/06/2014.

Legislação Municipal de São Paulo. Lei Nº 14.015, de 28 de junho de 2005 [Internet]. Publicada na Secretaria do Governo Municipal, em 28 de junho de 2005. PMSP. Disponível em: [http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29062005L%20140150000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29062005L%20140150000) - Acesso em 28/06/2014.

MARODIN, Emerson Edinei. **Alternativa de Dimensionamento para o Pavimento da BR-448: análise mecânica com aplicação de BGTC**. 2010. 72f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380p.

Ministério do Meio Ambiente. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002 [Internet]. Publicada DOU 17/07/2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html> - Acesso em 25/06/2014.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego**. São Paulo, 2005. 134pg Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MOTTA, Laura Maria Goretta da. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NÚÑEZ, Whashington Peres. **Análise Mecânica dos Pavimentos** [Internet]. LAPAV-UFRGS. Publicada em 2004. Disponível em: [www.ufrgs.br/petcivil/Arquivos/Materiais/modulofadiga\\_2004c.ppt](http://www.ufrgs.br/petcivil/Arquivos/Materiais/modulofadiga_2004c.ppt) - Acesso em 04/11/2014.

PINI. Infraestrutura Urbana – Projetos, Custos e Construção [Internet]. PINIWeb. Publicada em novembro de 2010. Disponível em: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/1/sua-duvida-192221-1.aspx> - Acesso em 30/04/2014.

PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. 489 p. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe/UFRJ.

POZZOBON, Cristina Eliza. **Aplicações Tecnológicas para a Cinza do Carvão Mineral Produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. Florianópolis, 1999. 122pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

ROHDE, Luciana. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos – Estudo Laboratorial**. Porto Alegre, 2002. 118pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROHDE, Luciana. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos**. Porto Alegre, 2007. 250pg. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, Amanda Helena Marcandali. **Avaliação do Comportamento de Pavimentos com Camada Reciclada de Revestimentos Asfálticos a Frio com Emulsão Modificada por Polímero**. São Paulo, 2011. 143pg. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha reciclada de Pneus**. 2004 (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SZELIGA, Luciana; ARAÚJO, Zalder Montenegro de. **Aplicabilidade de Resíduos e Rejeitos Ambientais para Aproveitamento em Pavimentação – Caracterização Mecânica de Misturas Solo-Cinza de Carvão Mineral**. 2011. Relatórios Anuais CTC – XIX Seminário de Iniciação Científica da PUC-RIO. Departamento de Engenharia Civil. PUC-RIO/PIBIC.

THIVES, Liseane Padilha; TRICHÊS, Glicério; Pereira, PAULO A. A.; PAIS, Jorge C. **Influência do Tipo de Asfalto Base no Desempenho Mecânico de Misturas com Asfalto Borracha**. – São Paulo, 2013. Boletim Técnico – SINICESP. <http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt04a.htm> - Acesso em 15/07/2014.

TRICHÊS, Glicério. **Pavimentação de Estradas – ECV 5154**. 2014-a, semestre 1. Departamento de Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis, disciplina ministrada em 2014. (Apostila)

WEBER, Rodrigo Carreira; NAKAHARA, Suyen Matsumura; ROHDE, Luciana; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Uso de Cinzas Pesadas em Misturas Asfálticas a Quente**. – São Paulo, 2012. Boletim Técnico – SINICESP. <http://www.sinicesp.com.br/materias/2012/bt11a.htm> - Acesso em 15/07/2014.

WESSELING, Diego Henrique. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas em Concreto Asfáltico com incorporação de Resíduos Industriais**. Porto Alegre, 2005. 144pg. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## APÊNDICE A

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: pavtoREF\_DNER

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	6314.00
2	.40	15.000	400.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1465.50	-1718.06	-560.00	.00	.02	.00
9.999	1	1015.55	1259.36	-154.58	.00	23.64	.00
24.999	2	43.61	59.14	-62.95	.00	13.88	.00
44.999	3	19.94	24.39	-30.57	.00	4.91	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-105.82	-159.82	87.78	11.857	.000	351.983
9.999	1	99.60	151.73	-150.59	-9.299	.000	348.386
24.999	2	112.83	167.19	-260.12	-17.884	.000	306.215
44.999	3	112.09	143.19	-241.51	-18.444	.000	252.745

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1718.06	-1465.50	-560.00	-159.82	-105.82	87.78
9.999	1	-155.06	1016.02	1259.36	-150.69	99.70	151.73
24.999	2	-64.73	45.39	59.14	-266.35	119.06	167.19
44.999	3	-31.04	20.42	24.39	-244.82	115.40	143.19

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-684.82	-1276.31	.00	.00	.00	.00
9.999	1	434.90	1064.88	-126.05	.00	.00	.00
24.999	2	46.37	63.45	-67.45	.00	.00	.00
44.999	3	23.04	26.29	-32.90	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-37.71	-164.18	108.71	.000	.000	358.290
9.999	1	16.84	151.53	-103.10	.000	.000	358.945
24.999	2	119.92	179.70	-278.43	.000	.000	319.052
44.999	3	128.42	151.18	-263.17	.000	.000	260.853

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1276.31	-684.82	.00	-164.18	-37.71	108.71
9.999	1	-126.05	434.90	1064.88	-103.10	16.84	151.53
24.999	2	-67.45	46.37	63.45	-278.43	119.92	179.70
44.999	3	-32.90	23.04	26.29	-263.17	128.42	151.18

## APÊNDICE B

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+ESCORIA – Proposta 1

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	5900.00
2	.40	15.000	400.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1429.26	-1673.92	-560.00	.00	.02	.00
9.999	1	973.41	1208.42	-159.41	.00	24.06	.00
24.999	2	44.39	60.42	-64.20	.00	14.17	.00
44.999	3	20.21	24.78	-30.95	.00	5.00	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-109.73	-165.71	89.17	12.153	.000	355.613
9.999	1	102.76	156.53	-156.45	-9.389	.000	351.747
24.999	2	114.75	170.87	-265.31	-18.149	.000	308.522
44.999	3	113.42	145.36	-244.74	-18.678	.000	254.198

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1673.92	-1429.26	-560.00	-165.71	-109.73	89.17
9.999	1	-159.92	973.92	1208.42	-156.57	102.87	156.53
24.999	2	-66.02	46.21	60.42	-271.68	121.12	170.87
44.999	3	-31.44	20.70	24.78	-248.13	116.81	145.36

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-648.25	-1229.88	.00	.00	.00	.00
9.999	1	395.71	1013.54	-128.64	.00	.00	.00
24.999	2	47.01	64.81	-68.73	.00	.00	.00
44.999	3	23.37	26.73	-33.34	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-36.91	-170.00	111.41	.000	.000	361.530
9.999	1	14.58	155.94	-105.40	.000	.000	362.230
24.999	2	121.45	183.74	-283.64	.000	.000	321.587
44.999	3	130.08	153.56	-266.88	.000	.000	262.450

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1229.88	-648.25	.00	-170.00	-36.91	111.41
9.999	1	-128.64	395.71	1013.54	-105.40	14.58	155.94
24.999	2	-68.73	47.01	64.81	-283.64	121.45	183.74
44.999	3	-33.34	23.37	26.73	-266.88	130.08	153.56

## APÊNDICE C

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+ESCORIA+EGC – Proposta 2

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	5900.00
2	.40	15.000	478.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1387.95	-1618.77	-560.00	.00	.01	.00
9.999	1	899.28	1115.51	-168.74	.00	26.63	.00
24.999	2	62.24	81.26	-62.42	.00	13.86	.00
44.999	3	19.79	24.18	-29.92	.00	4.82	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-106.00	-158.81	83.45	11.678	.000	346.048
9.999	1	96.26	145.73	-148.12	-8.529	.000	342.269
24.999	2	114.44	170.15	-250.66	-18.017	.000	302.853
44.999	3	110.44	141.16	-237.54	-18.157	.000	249.781

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1618.77	-1387.95	-560.00	-158.81	-106.00	83.45
9.999	1	-169.41	899.94	1115.51	-148.27	96.41	145.73
24.999	2	-63.94	63.76	81.26	-255.12	118.89	170.15
44.999	3	-30.38	20.26	24.18	-240.77	113.67	141.16

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-614.24	-1174.05	.00	.00	.00	.00
9.999	1	336.63	924.27	-130.96	.00	.00	.00
24.999	2	65.63	87.03	-66.55	.00	.00	.00
44.999	3	22.83	26.07	-32.17	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-34.46	-162.55	106.09	.000	.000	351.050
9.999	1	10.00	144.45	-97.00	.000	.000	351.896
24.999	2	120.16	182.84	-266.97	.000	.000	315.305
44.999	3	126.35	149.05	-258.67	.000	.000	257.652

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1174.05	-614.24	.00	-162.55	-34.46	106.09
9.999	1	-130.96	336.63	924.27	-97.00	10.00	144.45
24.999	2	-66.55	65.63	87.03	-266.97	120.16	182.84
44.999	3	-32.17	22.83	26.07	-258.67	126.35	149.05

## APÊNDICE D

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+ESCORIA+EGC+EGC – Proposta 3

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	5900.00
2	.40	15.000	478.00
3	.40	20.000	556.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .010

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	766.55	962.35	-185.18	-.06	21.74	.07
9.999	1	766.55	962.35	-185.18	-.06	21.74	.07
24.999	2	-3.15	6.42	-79.29	-.03	22.35	.00
44.999	3	73.51	84.29	-26.02	.00	4.05	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	83.82	128.62	-133.95	-6.407	.013	289.984
9.999	1	83.82	128.62	-133.95	-6.407	.013	289.984
24.999	2	54.39	82.42	-168.62	-8.330	.008	254.435
44.999	3	90.28	117.45	-160.33	-14.903	.012	225.938

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm) *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
9.999 1	-185.68	767.04	962.35	-134.06	83.93	128.62
9.999 1	-185.68	767.04	962.35	-134.06	83.93	128.62
24.999 2	-85.37	2.93	6.42	-186.41	72.18	82.42
44.999 3	-26.19	73.67	84.29	-160.74	90.70	117.45

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .010

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm) *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999 1	182.42	755.68	-149.40	-.06	.00	.00
9.999 1	182.42	755.68	-149.40	-.06	.00	.00
24.999 2	-5.22	6.47	-84.51	-.03	.00	.00
44.999 3	83.00	91.15	-28.07	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm) *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999 1	-5.05	126.12	-80.97	.000	.013	295.903
9.999 1	-5.05	126.12	-80.97	.000	.013	295.903
24.999 2	54.38	88.63	-177.85	.000	.009	263.825
44.999 3	103.89	124.43	-175.78	.000	.012	232.872

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm) *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
9.999 1	-149.40	182.42	755.68	-80.97	-5.05	126.12
9.999 1	-149.40	182.42	755.68	-80.97	-5.05	126.12
24.999 2	-84.51	-5.22	6.47	-177.85	54.38	88.63
44.999 3	-28.07	83.00	91.15	-175.78	103.89	124.43

## APÊNDICE E

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+Borracha(6%) – Proposta 4

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	5220.00
2	.40	15.000	400.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1365.79	-1596.29	-560.00	.00	.01	.00
9.999	1	899.37	1118.58	-168.36	.00	24.73	.00
24.999	2	45.76	62.70	-66.47	.00	14.69	.00
44.999	3	20.68	25.46	-31.63	.00	5.16	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-117.07	-176.68	91.33	12.692	.000	362.175
9.999	1	108.58	165.27	-167.56	-9.520	.000	357.767
24.999	2	118.15	177.47	-274.63	-18.606	.000	312.623
44.999	3	115.75	149.20	-250.44	-19.086	.000	256.780

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1596.29	-1365.79	-560.00	-176.68	-117.07	91.33
9.999	1	-168.94	899.94	1118.58	-167.70	108.73	165.27
24.999	2	-68.36	47.65	62.70	-281.24	124.77	177.47
44.999	3	-32.14	21.18	25.46	-253.97	119.28	149.20

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-585.13	-1148.51	.00	.00	.00	.00
9.999	1	328.46	923.76	-133.19	.00	.00	.00
24.999	2	48.08	67.21	-71.03	.00	.00	.00
44.999	3	23.95	27.50	-34.11	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-35.09	-180.79	116.24	.000	.000	367.253
9.999	1	9.91	163.87	-109.48	.000	.000	368.042
24.999	2	124.01	190.98	-292.86	.000	.000	326.088
44.999	3	132.99	157.79	-273.45	.000	.000	265.287

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1148.51	-585.13	.00	-180.79	-35.09	116.24
9.999	1	-133.19	328.46	923.76	-109.48	9.91	163.87
24.999	2	-71.03	48.08	67.21	-292.86	124.01	190.98
44.999	3	-34.11	23.95	27.50	-273.45	132.99	157.79

## APÊNDICE F

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: ResAsfaltico – Proposta 5

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	1300.00
2	.40	15.000	400.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-807.04	-901.58	-560.00	.00	.00	.00
9.999	1	238.05	309.87	-284.43	.00	25.83	.00
24.999	2	56.61	83.20	-92.20	.00	19.00	.00
44.999	3	24.33	31.45	-38.96	.00	6.71	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-227.30	-325.47	29.24	19.229	.000	443.422
9.999	1	176.27	250.85	-366.31	-7.247	.000	422.582
24.999	2	150.53	243.59	-370.31	-21.676	.000	356.053
44.999	3	136.66	186.52	-306.37	-22.731	.000	285.009

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-901.58	-807.04	-560.00	-325.47	-227.30	29.24
9.999	1	-285.71	239.32	309.87	-367.63	177.59	250.85
24.999	2	-94.58	59.00	83.20	-378.67	158.89	243.59
44.999	3	-39.67	25.03	31.45	-311.29	141.59	186.52

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-118.64	-458.06	.00	.00	.00	.00
9.999	1	-118.11	196.92	-165.62	.00	.00	.00
24.999	2	50.20	87.17	-94.60	.00	.00	.00
44.999	3	28.53	34.32	-42.37	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	32.06	-320.41	155.27	.000	.000	420.883
9.999	1	-99.28	227.86	-148.62	.000	.000	423.368
24.999	2	132.94	262.33	-373.88	.000	.000	372.683
44.999	3	158.77	199.27	-337.56	.000	.000	296.181

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-458.06	-118.64	.00	-320.41	32.06	155.27
9.999	1	-165.62	-118.11	196.92	-148.62	-99.28	227.86
24.999	2	-94.60	50.20	87.17	-373.88	132.94	262.33
44.999	3	-42.37	28.53	34.32	-337.56	158.77	199.27

## APÊNDICE G

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+ResAsfálticos – Proposta 6

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	6314.00
2	.30	15.000	1932.00
3	.40	20.000	200.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1076.48	-1205.52	-560.00	.00	.01	.00
9.999	1	280.58	355.04	-258.05	.00	44.98	.00
24.999	2	232.40	286.50	-43.08	.00	8.80	.00
44.999	3	13.35	15.99	-21.81	.00	3.08	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-72.62	-100.21	37.80	8.282	.000	269.988
9.999	1	39.06	54.98	-76.10	-2.196	.000	267.141
24.999	2	82.49	118.89	-102.87	-12.552	.000	251.914
44.999	3	78.39	96.84	-167.71	-12.696	.000	214.699

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1205.52	-1076.48	-560.00	-100.21	-72.62	37.80
9.999	1	-261.78	284.31	355.04	-76.90	39.86	54.98
24.999	2	-43.36	232.68	286.50	-103.06	82.68	118.89
44.999	3	-22.07	13.62	15.99	-169.58	80.26	96.84

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-427.10	-788.58	.00	.00	.00	.00
9.999	1	-46.15	257.20	-135.38	.00	.00	.00
24.999	2	234.89	301.76	-44.62	.00	.00	.00
44.999	3	15.15	17.12	-23.12	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	E <sub>xx</sub> (10 <sup>-6</sup> )	E <sub>yy</sub> (10 <sup>-6</sup> )	E <sub>zz</sub> (10 <sup>-6</sup> )	U <sub>x</sub> (microns)	U <sub>y</sub> (microns)	U <sub>z</sub> (microns)
.001	1	-23.93	-101.22	67.39	.000	.000	269.690
9.999	1	-14.06	50.80	-33.14	.000	.000	271.768
24.999	2	81.65	126.64	-106.42	.000	.000	259.435
44.999	3	87.73	101.56	-180.13	.000	.000	219.735

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-788.58	-427.10	.00	-101.22	-23.93	67.39
9.999	1	-135.38	-46.15	257.20	-33.14	-14.06	50.80
24.999	2	-44.62	234.89	301.76	-106.42	81.65	126.64
44.999	3	-23.12	15.15	17.12	-180.13	87.73	101.56

## APÊNDICE H

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: CBUQ+RCD+RCD – Proposta 7

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.35	10.000	6314.00
2	.40	15.000	420.00
3	.40	20.000	420.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-1349.96	-1576.14	-560.00	.00	.01	.00
9.999	1	889.71	1112.27	-168.76	.00	21.26	.00
24.999	2	4.38	14.43	-73.91	.00	19.80	.00
44.999	3	56.09	64.74	-27.68	.00	4.38	.00

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-95.39	-143.75	73.51	10.073	.000	310.902
9.999	1	88.61	136.20	-137.70	-7.482	.000	307.238
24.999	2	67.08	100.59	-193.91	-10.448	.000	268.972
44.999	3	98.25	127.08	-180.97	-16.212	.000	235.035

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1576.14	-1349.96	-560.00	-143.75	-95.39	73.51
9.999	1	-169.19	890.14	1112.27	-137.79	88.70	136.20
24.999	2	-78.64	9.10	14.43	-209.64	82.82	100.59
44.999	3	-27.91	56.32	64.74	-181.74	99.02	127.08

Line

Line

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Line

## cNormal Stresses

Z-Position Layer (cm)	*	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.001	1	-550.71	-1119.09	.00	.00	.00	.00
9.999	1	295.41	906.23	-140.05	.00	.00	.00
24.999	2	3.40	15.10	-79.21	.00	.00	.00
44.999	3	63.49	69.94	-29.86	.00	.00	.00

Line

## cNormal Strains and Deflections

Z-Position Layer (cm)	*	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.001	1	-25.19	-146.71	92.56	.000	.000	314.270
9.999	1	4.32	134.91	-88.79	.000	.000	314.845
24.999	2	69.14	108.16	-206.22	.000	.000	279.378
44.999	3	113.00	134.49	-198.17	.000	.000	242.442

Line

## cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position Layer (cm)	*	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
.001	1	-1119.09	-550.71	.00	-146.71	-25.19	92.56
9.999	1	-140.05	295.41	906.23	-88.79	4.32	134.91
24.999	2	-79.21	3.40	15.10	-206.22	69.14	108.16
44.999	3	-29.86	63.49	69.94	-198.17	113.00	134.49