

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Cléber da Silva Pinto

**REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO:
AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO EM
ATERROS RODOVIÁRIOS**

Porto Alegre
junho 2010

CLÉBER DA SILVA PINTO

**REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO:
AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO EM
ATERROS RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez
Co-orientadora: Luciana Rohde

Porto Alegre
junho 2010

CLÉBER DA SILVA PINTO

**RECICLAGEM DE MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO:
AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO EM
ATERROS RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2010

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela CPGEC/UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Luciana Rohde (Unisinos)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profa. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço à Deus por tudo que Ele me ensina na vida.

Agradeço às pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho. Agradeço à essas pessoas e em especial àquelas que ou estão ou estiveram próximas a mim.

Agradeço aos profissionais que orientaram esse trabalho, são eles: Profa. Carin Maria Schmitt, Profa. Luciana Rohde e o Prof. Washington Peres Núñez. Sem dúvida alguma sem os esforços desses três excelentes profissionais esse trabalho não seria realizado. Agradeço ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti por permitir que eu trabalha-se como bolsista de iniciação científica.

Agradeço à equipe do Laboratório de Pavimentação da UFGRS o conhecimento a mim transmitido e os momentos de descontração que passamos juntos. Agradeço especialmente aos amigos: Diego Treichel que nos anos de 2009 e de 2010 transmitiu a mim parte de seu conhecimento; Rodrigo Carrera que colaborou significativamente com os ensaios de MR realizados nessa pesquisa; João Augusto Fraga Bonzanini por ceder parte do material que ele pesquisará em seu trabalho de mestrado.

Agradeço aos professores da UFRGS, especialmente aos professores da Geotecnia, por contribuírem com a minha formação profissional.

Agradeço ao engenheiro Fábio Hirsch, da empresa Triunfo/Concepa, pela ajuda com a coleta do material fresado.

Agradeço com todas as forças aos meus pais (Sergio e Tereza) pela dedicação e pelo comprometimento com a família. Acredito que a boa base familiar é o alicerce para o sucesso na vida e com certeza vocês criaram essa condição para mim, muito obrigado! Agradeço à minha irmã Liliam e o meu cunhado Gabriel pela parceria!

A felicidade humana geralmente não se consegue com grandes golpes de sorte, que poucas vezes acontecem, mas com pequenas coisas que acontecem todos os dias.

Benjamin Franklint

RESUMO

PINTO, C. S. **Reutilização de Material Asfáltico Fresado:** avaliação da potencialidade de utilização em aterros rodoviários. 2010. 83 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho pretende avaliar a potencialidade de utilização do material asfáltico fresado como material para aterro rodoviário. O material fresado utilizado nessa pesquisa é proveniente dos serviços de restauração da BR-290, duas amostras de material foram coletadas. O estudo se baseou principalmente na amostra 2, de 200 Kg. A amostra 1, de 40 Kg, serviu para que fosse comparada a granulometria de dois materiais asfálticos provenientes de locais distintos. Sendo assim, a amostra 1 foi submetida a análise granulométrica, a extração de ligante para determinação do teor de ligante e a análise granulometria do agregado, sem ligante asfáltico. A amostra 2 passou pelos mesmos procedimentos laboratoriais que a amostra 1. Além disso, na amostra 2 realizou-se: o ensaio de compactação, o ensaio para determinação do ISC e o ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência. A avaliação do fresado asfáltico foi realizada por comparação com a areia que está sendo utilizada na camada de reforço de subleito – nos serviços de ampliação – da BR-290. A areia que é explorada na jazida Gomes, no município de Osório/RS, foi avaliada através do ensaio de compactação e do ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência. Além disso, foram efetuadas análises mecânicas por meio do *software* Everstress 5.0. Para isso, foram consideradas duas estruturas: a estrutura original que é àquela executada na obra de ampliação da BR-290 e a estrutura alternativa que difere da estrutura anterior apenas no material utilizado na camada de reforço de subleito (areia para a estrutura original e material fresado para a estrutura alternativa). As conclusões dessa pesquisa indicam que o material asfáltico fresado pode ser utilizado como material para a camada de reforço de subleito. As análises mecânicas e os ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência mostraram que o comportamento do material fresado é similar ao comportamento da areia se utilizados na camada de reforço de subleito.

Palavras-chave: fresado asfáltico; aterro rodoviário; procedimentos laboratoriais, areia, reforço de subleito, análises mecânicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa	18
Figura 2: camadas que compõem um pavimento flexível	20
Figura 3: representação do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes	26
Figura 4: procedimento de fresagem de pavimentos no autódromo de Interlagos/SP	30
Figura 5: cilindro fresador	33
Figura 6: material asfáltico fresado (amostra 1)	41
Figura 7: material asfáltico fresado (amostra 2)	41
Figura 8: areia utilizada para comparação com o material asfáltico fresado	41
Figura 9: forno de ignição utilizado para determinação do teor de ligante presente nas amostras de material fresado	44
Figura 10: equipamento triaxial para ensaio de módulo de resiliência	47
Figura 11: estrutura original – pavimento da BR-290 analisado nessa pesquisa	50
Figura 12: curva granulométrica média para a amostra 1	52
Figura 13: curva granulométrica da amostra 2	53
Figura 14: faixas de trabalho E e F para base estabilizada granulometricamente (linhas pontilhadas e tracejadas), curvas granulométricas das amostras de fresado asfáltico (linhas contínuas)	54
Figura 15: curva granulométrica do agregado da amostra 1A	57
Figura 16: curva granulométrica média dos agregados das amostras 2A e 2B	57
Figura 17: relação gráfica (peso específico aparente seco x teor de umidade) – material fresado	58
Figura 18: relação gráfica (pressão calculada x penetração) – ensaio de ISC – material fresado	60
Figura 19: relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – ensaio 2	62
Figura 20: relação gráfica (peso específico aparente seco x teor de umidade) – areia – energia intermediária	64
Figura 21: relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – areia	66
Figura 22: estrutura alternativa – pavimento analisado empregando material fresado	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: tipos de reciclagem	28
Quadro 2: fresadoras com cilindro de 2 m de largura	32
Quadro 3: fresadoras com cilindro de 1 m de largura	32
Quadro 4: fresadoras com cilindro de 0,5 m de largura	32
Quadro 5: amostras de material fresado estudadas	51
Quadro 6: granulometria média da amostra 1	52
Quadro 7: granulometria da amostra 2	53
Quadro 8: teor de ligante médio presente na amostra 1	55
Quadro 9: teor de ligante médio presente na amostra 2	55
Quadro 10: granulometria do agregado da amostra 1A	56
Quadro 11: granulometria média dos agregados das amostras 2A e 2B	56
Quadro 12: ensaio de compactação – material fresado	58
Quadro 13: determinação do ISC – material fresado	60
Quadro 14: resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – ensaio 2	62
Quadro 15: ensaio de compactação – areia – energia intermediária	63
Quadro 16: resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – areia	65
Quadro 17: estruturas analisadas	68
Quadro 18: principais solicitações atuantes na estrutura original	69
Quadro 19: principais solicitações atuantes na estrutura alternativa com material fresado	69

LISTA DE SIGLAS

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

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BGS: Brita Graduada Simples

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR: *California Bearing Ratio*

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CCR: Concreto Compactado e Rolado/ Concreto Compactado a Rolo

CDH: *California Division of Highways*

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DERSA: Desenvolvimento Rodoviário S.A. – São Paulo

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ISC: Índice de Suporte Califórnia

MR: Módulo de Resiliência

NBR: Norma Brasileira

PIB: Produto Interno Bruto

PMF: Pré-Misturado a Frio

PMQ: Pré-Misturado a Quente

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.2.1 Objetivos Secundários	14
2.3 HIPÓTESE	15
2.4 PRESSUPOSTOS	15
2.5 PREMISSAS	15
2.6 DELIMITAÇÃO	16
2.7 LIMITAÇÕES	16
2.8 DELINEAMENTO DA PESQUISA	16
3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA	19
3.1 CAMADAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	20
3.1.1 Revestimento asfáltico	21
3.1.2 Base, sub-base e reforço de subleito	22
3.1.3 Subleito	24
3.2 PROJETO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: BREVE ABORDAGEM	24
4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS: EMPREGO DA FRESAGEM	27
4.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	27
4.2 FRESAGEM: CONCEITOS BÁSICOS	29
4.2.1 Principais Equipamentos e Componentes da Operação de Fresagem	30
4.2.1.1 Máquina fresadora	30
4.2.1.2 Cilindro Fresador	33
4.2.1.3 Dentes de Corte	34
4.2.1.4 Equipamentos e Serviços Adicionais	34
4.2.2. Classificação dos Tipos de Fresagem	35
4.2.3 Aplicação da Técnica de Fresagem	37
5 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ..	40
5.1 MATERIAIS	40
5.2 MÉTODOS	42
5.2.1 Análise granulométrica	42
5.2.2 Extração de ligante	43

5.2.3 Ensaio de compactação e ISC	45
5.2.4 Ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência	46
5.2.5 Análises mecánísticas	49
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
6.1 MATERIAL FRESADO	51
6.1.1 Granulometria das amostras	52
6.1.2 Teor de ligante e granulometria do agregado das amostras	55
6.1.3 Ensaio de compactação: amostra 2	58
6.1.4 Determinação do ISC: amostra 2	59
6.1.5 Determinação do módulo de resiliência: amostra 2	60
6.2 AREIA	63
6.2.1 Ensaio de compactação	63
6.2.2 Determinação do módulo de resiliência	64
6.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS	67
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A	75
APÊNDICE B	78
APÊNDICE C	80

1 INTRODUÇÃO

A indústria do transporte representa 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Visto que 60% das cargas são conduzidas por rodovias, tem-se que 2,1% do PIB brasileiro é função do transporte rodoviário (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 20). Sendo assim, a malha rodoviária – que representa uma fração do patrimônio da Nação – deve operar de modo a otimizar os processos (transportes) que nela serão efetuados. No entanto, boa parte da rede pavimentada brasileira encontra-se deteriorada, exigindo grandes investimentos para execução de serviços de restauração (DAVID, 2006, p. 15). Entre os serviços de restauração está a necessidade de recuperar as condições de rolamento, ou seja, empreender obras de restauração do pavimento da via.

Assim, soluções devem ser estudadas de maneira a aproveitar os recursos de maneira racional e eficiente. Nesse sentido a reciclagem de materiais asfálticos vem sendo empregada nos processos de restauração rodoviária. Essa solução possibilita o reaproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorado, conservando a geometria e espessura do pavimento existente, reduzindo custos e preservando o meio ambiente (DAVID, 2006, p. 15).

O processo de restauração de um pavimento flexível (aqueles com revestimento asfáltico) possui como etapa preliminar a fresagem dessa estrutura. Nessa operação retira-se parte do revestimento antigo e então se executa a manutenção exigida pela via. Entende-se fresagem como sendo a operação de corte, com uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via (BONFIM, 2007, p. 20). Desse modo esse procedimento produz um material residual, o fresado asfáltico, que é constituído por brita, areia, fíler e CAP (cimento asfáltico de petróleo).

O desafio é dar um destino adequado a esse material que por muito tempo foi considerado um rejeito da construção civil. Sustentabilidade parece ser o objetivo a ser atingido pela atual sociedade contemporânea. Baseado nesse conceito pretende-se desenvolver um estudo sobre a utilização do resíduo produzido pela fresagem do concreto asfáltico.

O presente trabalho tem como objetivo específico estudar a potencialidade de utilização do material oriundo da fresagem asfáltica como material para aterro rodoviário. A avaliação

desse material foi efetuada através da comparação com um material que está sendo utilizado na camada de reforço de subleito, nos serviços de ampliação, da BR-290. Os materiais foram submetidos a procedimentos laboratoriais e a análises mecánísticas, com o *software* Evestress 5.0.

A estrutura proposta para apresentação deste trabalho é constituída por 7 capítulos. A seguir apresenta-se o capítulo 2 que aborda o método de pesquisa utilizado. Os capítulos 3 e 4 abordam os pavimentos asfálticos e a fresagem asfáltica respectivamente. Nesses capítulos são apresentados os conceitos básicos para que o leitor possa compreender da melhor maneira possível o trabalho em questão.

O capítulo 5 descreve os materiais e os métodos empregados nessa pesquisa para a caracterização dos materiais. O capítulo 6 apresenta os resultados e as análises referentes aos procedimentos descritos. Finalmente o capítulo 7 traz as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual é o desempenho do material oriundo da fresagem padrão do pavimento da BR-290 se comparado à areia explorada pela jazida Gomes, no município de Osório/RS, quando utilizados como material para aterro rodoviário?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do desempenho do fresado asfáltico como material para aterros rodoviários em comparação a um agregado natural.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário deste trabalho é a caracterização dos materiais em estudo: o fresado asfáltico (proveniente da BR-290) e a areia explorada na jazida Gomes, no município de Osório/RS.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese inicial proposta para o trabalho é que os materiais apresentam desempenho equivalente se utilizados como material para aterro rodoviário.

2.4 PRESSUPOSTO

Nesta pesquisa é aceito que as normas que serão utilizadas são suficientes e adequadas para a caracterização dos materiais, são elas:

- a) DNIT 031/2006-ES – pavimentos flexíveis – concreto asfáltico;
- b) DNER-ES 303/97 – pavimentação – base estabilizada granulometricamente;
- c) ASTM D6307 - 05(2010) – *Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method*;
- d) DNER-ME 129/94 – compactação utilizando amostras não trabalhadas;
- e) DNER-ME 049/94 – determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) utilizando amostras não trabalhadas;
- f) AASHTO T 307-99 – *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*.

Além disso, considera-se que o programa Everstress 5.0 é adequado para a realização das análises mecânicas, necessárias para o julgamento do material.

2.5 PREMISSAS

A grande quantidade de agregados necessários para a construção rodoviária exige que sejam buscadas soluções alternativas à exploração de materiais naturais.

2.6 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao estudo do material oriundo da fresagem padrão de pavimentos flexíveis e ao estudo da areia explorada pela jazida Gomes no município de Osório-RS.

2.7 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a realização da caracterização do material fresado proveniente dos serviços de restauração da BR-290 e da areia explorada pela jazida Gomes no município de Osório/RS. Sendo assim, a seguinte relação de ensaios foi efetuada para cada material:

- a) material fresado,
 - a) análise granulométrica;
 - b) determinação do teor de ligante;
 - c) ensaio de compactação;
 - d) ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC);
 - e) ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência;
- b) areia,
 - a) ensaio de compactação;
 - b) ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

Além disso – a fim de complementar a avaliação dos materiais – foram efetuadas análises mecânicas através do programa Everstress 5.0, um software livre na internet.

2.8 DELINEAMENTOS DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa seguiu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) coleta dos materiais;
- c) ensaios laboratoriais;

- d) análises mecánísticas utilizando *software* Everstress 5.0;
- e) interpretação dos resultados;
- f) conclusões.

A pesquisa bibliográfica deste trabalho abrange mais de um conteúdo específico. Inicialmente procurou-se compreender o processo de fresagem de pavimentos considerando todas as variáveis envolvidas na técnica. Além disso, nessa etapa procurou-se ampliar os conhecimentos referentes a pavimentos asfálticos e ao projeto dessas estruturas.

Visto que a literatura científica apresenta poucos trabalhos a cerca da utilização de material fresado como material para aterro, os seguintes procedimentos, em ordem cronológica, foram efetuados com o material:

- a) granulometria do material;
- b) extração de ligante e granulometria do agregado resultante;
- c) ensaio de compactação;
- d) ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia;
- e) ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

O outro material estudado, a areia proveniente da jazida Gomes, foi avaliado através do ensaio de compactação e do ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

Finalmente, a partir da interpretação dos resultados obtidos em laboratório e das análises mecánísticas chegou-se às conclusões desse trabalho. A figura 1 apresenta o delineamento da pesquisa.

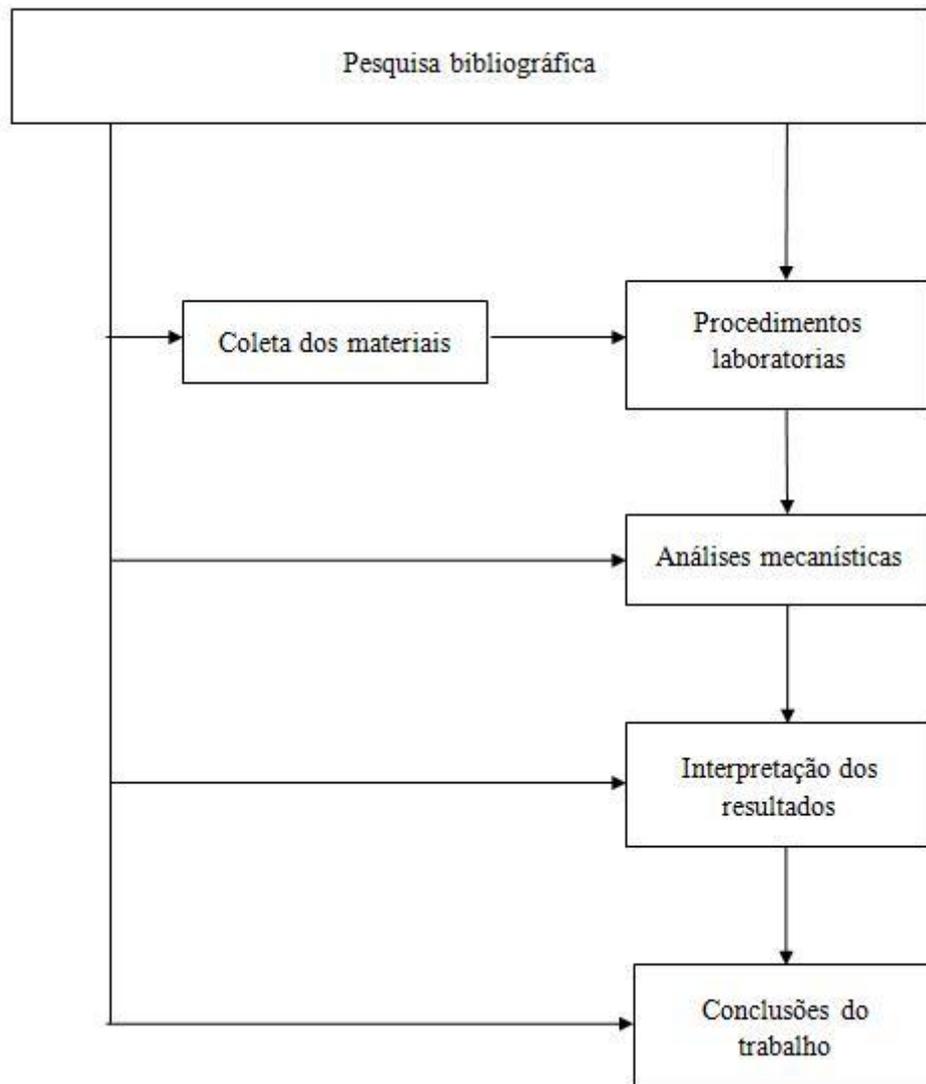


Figura 1: delineamento da pesquisa

3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Este capítulo apresenta conceitos básicos referentes a pavimentação asfáltica. Nele será apresentada a estrutura padrão que compõe um pavimento flexível, descrevendo suas camadas e respectivas funções. Além disso, o capítulo apresenta, resumidamente, informações necessárias ao projeto dessa estrutura. Nesse contexto será dada atenção ao dimensionamento de pavimentos utilizando métodos mecanísticos.

De acordo com Medina e Motta (2005, p. 14):

A norma brasileira de pavimentação NBR 7207/82 da ABNT proveio da antiga norma “Terminologia e classificação de pavimentação”, TB-7, de 1953, revisada em 1969 e em 1982. Nela se encontra a definição:

“O pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, economicamente e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento”.

Os pavimentos rodoviários são classificados, basicamente, em dois tipos: **rígidos e flexíveis**. Os pavimentos rígidos possuem como camada de revestimento placas de concreto. Desta forma, podem ser designados por: pavimentos de concreto de cimento Portland. Essa estrutura possui sua espessura fixada em função da resistência à flexão das placas. Já os pavimentos flexíveis são aqueles que possuem revestimento asfáltico formado basicamente por agregados e ligante asfáltico. Esses podem ser chamados de pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2006, p. 7).

Os pavimentos flexíveis normalmente têm sua estrutura composta por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito, conforme (BERNUCCI et al., 2006, p. 9). Essas camadas serão detalhadas nos próximos itens.

3.1 CAMADAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982) define as camadas constituintes dos pavimentos flexíveis como:

- a) subleito é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- b) sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
- c) base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento;
- d) revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina, economicamente e simultaneamente,
 - a melhorar as condições do rolamento quanto à comodidade e segurança;
 - a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

A figura 2 ilustra as camadas que compõem a estrutura de um pavimento flexível, conforme a definição apresentada por Bernucci et al. (que considera o reforço de subleito). Nos subitens serão descritas essas camadas.

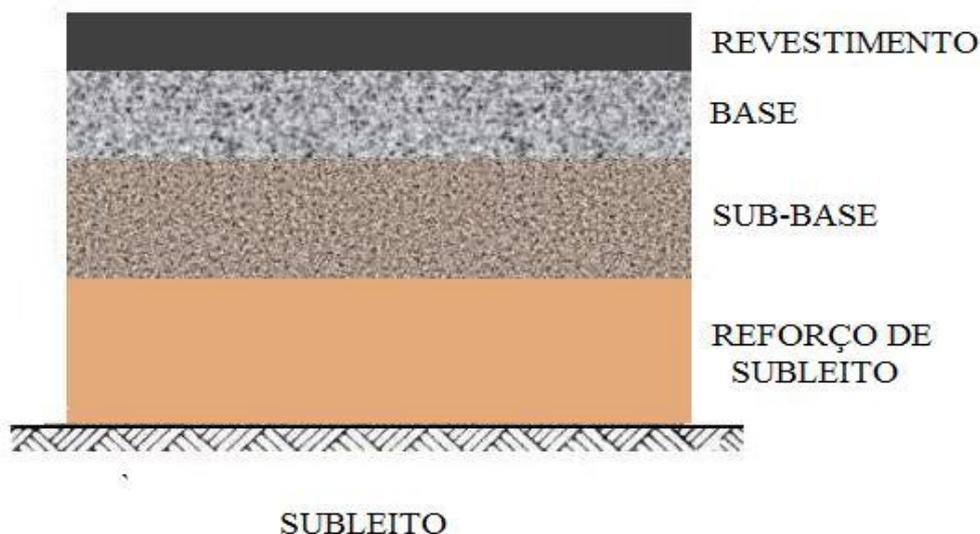


Figura 2: camadas que compõem um pavimento flexível

3.1.1 Revestimento asfáltico

Bernucci et al. (2008, p. 9) afirmam que o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e também do clima. Sendo assim ela deve ter a capacidade de transmitir de forma atenuada às camadas inferiores as solicitações impostas ao pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

De acordo com Balbo (2007, p. 36), o revestimento deve suportar à ação de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Sendo assim, essa camada deve ser provida de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal. Dessa forma os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de ligante asfáltico.

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), pode ser considerado a mistura mais comum empregada nos revestimentos no País. Os materiais empregados em sua fabricação e os processos de controle exigidos para sua execução são fatores que contribuem para sua utilização. Trata-se de uma mistura de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), de material fino (pó-de-pedra, cimento Portland, etc.) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Tem-se a homogeneização, a quente, desses materiais em uma usina misturadora (BALBO, 2007, p. 168).

Sendo assim, deve-se realizar a dosagem desses materiais a fim de se obter uma composição granulométrica de agregados que misturada ao CAP, em temperaturas adequadas e subsequente compactação, formem outro material. Esse material deve oferecer condições mecânicas adequadas para suportar as solicitações impostas ao pavimento (tráfego de veículos, ação do clima, etc.). Uma dosagem de mistura asfáltica visa, entre outros objetivos, obter uma mistura adequadamente trabalhável, pouco suscetível à fissuração por fadiga, com baixa deformação permanente e estável a ação de cargas estáticas ou móveis (BALBO, 2007, p. 171).

No dimensionamento do revestimento asfáltico deve-se atentar às grandes deformações elásticas, as quais são geradas quando uma carga de grande magnitude solicita o pavimento. Sendo assim as tensões atuantes na camada asfáltica devem estar dentro dos limites suportáveis pelo concreto asfáltico que a compõe. O projeto de um revestimento betuminoso

deve levar em consideração, além da resistência a tração da mistura, o seu módulo de resiliência. Esse parâmetro pode ser considerado um dos parâmetros-chave para o dimensionamento empírico-mecânico de pavimentos flexíveis (BRITO, 2006).

Além disso, para que o revestimento apresente um bom comportamento ao longo de sua vida de projeto – a espessura, das camadas estruturais do pavimento, deve ser compatível com as solicitações impostas pelos veículos de carga.

3.1.2 Base, sub-base e reforço de subleito

As camadas de base, sub-base e reforço de subleito devem ser dimensionadas para suportarem as solicitações que não foram absorvidas pela camada de revestimento, protegendo assim o subleito das solicitações impostas à estrutura. Os materiais utilizados ao longo dessas camadas podem ser classificados basicamente em 3 categorias: granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI et al., 2006, p. 352).

A classe de materiais granulares e solos é caracterizada pela utilização de materiais como:

- a) brita graduada simples (BGS) e brita corrida;
- b) macadame hidráulico;
- c) macadame a seco;
- d) misturas estabilizadas granulometricamente;
- e) solo-agregado;
- f) solo natural;
- g) solo melhorado com cimento ou cal.
- h) deve-se acrescentar o emprego de materiais decorrentes da reutilização e reciclagem, como,
 - escória de alto forno;
 - agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições;
 - mistura asfáltica fresada, etc.

Os materiais cimentados mais usados são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado e rolado). As misturas asfálticas mais usadas são: solo asfalto; solo emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI et al., 2006, p. 352).

Em geral, o revestimento asfáltico sofre solicitações de compressão e de tração devido à flexão e as demais camadas sofrem apenas solicitações de compressão. No entanto, em certos casos, a camada subjacente ao revestimento pode ser solicitada, também, por esforços de tração. Nessas situações recomenda-se a utilização de materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração (BERNUCCI et al., 2006, p. 338).

A prática empregada no dimensionamento dessas camadas tem utilizado largamente materiais granulares. Nesse sentido, deve-se estudar principalmente o módulo de resiliência e as deformações permanentes associadas ao comportamento desses materiais. Tais parâmetros são avaliados através de procedimentos laboratoriais (MALYSZ, 2004).

Conforme Malysz (2004, p. 16):

Camadas granulares têm um importante papel no comportamento global de estruturas de pavimentos, especialmente quando possuem revestimentos delgados ou não possuem revestimentos. Para estabelecer métodos de projetos mais eficientes e critérios construtivos, é necessário que a resposta das camadas granulares sob a ação do tráfego seja bem compreendida e levada em consideração.

O projeto de um pavimento requer o conhecimento do agregado que será utilizado. Desse modo Malysz (2004, p. 22) afirma:

Tradicionalmente os órgãos rodoviários responsáveis pela fiscalização da construção de estradas exigem que a qualidade dos agregados obedeça a especificações que envolvem ensaios de caracterização, compactação, índice de suporte Califórnia (ISC), Abrasão Los Angeles e sanidade. No Brasil, nas rodovias da malha federal, o órgão competente é o DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura em Transportes) que veio a substituir o antigo DNER (Departamento Nacional de Estrada de Rodagem), cujas especificações continuam em vigor. Em nível estadual, o DAER/RS (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul) regulamenta as obras rodoviárias. Para o caso de sub-bases e bases granulares, dispõe-se das seguintes especificações:

DAER – ES – P 04/91 – Sub-base Granular

DAER – ES – P 08/91 – Base Granular

DNER – ES – 301/97 – Pavimentação - Sub-base Estabilizada Granulometricamente

DNER – ES – 303/97 – Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente

3.1.3 Subleito

O terreno de fundação ou subleito vem a ser o solo natural encontrado no local de execução de uma rodovia, sobre ele é executada a estrutura do pavimento. Sendo assim, a espessura da estrutura do pavimento dependerá das características desse material. Normalmente, quando esses materiais apresentam baixa capacidade de suporte, executa-se uma camada de reforço de subleito que garante a integridade do terreno de fundação. Em algumas situações, quando as características técnicas do terreno natural estão aquém das necessárias para execução de uma via deve-se realizar a substituição desse material por outro com maior capacidade de suporte.

3.2 PROJETO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: BREVE ABORDAGEM

O projeto de um pavimento exige o conhecimento de materiais, de técnicas de projeto e de solicitações atuantes na estrutura, fatores que somados à experiência de um profissional experiente conduzem a projetos satisfatórios. Para a execução de um projeto de pavimento, é necessário conhecer as características dos materiais que serão utilizados, além disso, deve-se avaliar quais serão as solicitações críticas que atuarão no pavimento (TREICHEL, 2009, p. 20).

O primeiro critério utilizado para o dimensionamento de pavimentos foi o critério *California Bearing Ratio* (CBR). Segundo Balbo (2007, p. 377):

O critério do CBR é atribuído ao engenheiro O. J. Porter (Ahlvin, 1991), do California Division of Highways (CDH), tendo sido o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis criado sobre bases estritamente empíricas, com considerável número de avaliações experimentais e laboratoriais. O critério básico de ruptura adotado é aquele por cisalhamento do subleito e camadas granulares, que causariam o aparecimento de sulcos nas trilhas de roda (deformações permanentes) ou mesmo ruptura plástica do subleito.

O valor do CBR exprime uma porcentagem da resistência à penetração de dado material. No Brasil, a partir desse parâmetro desenvolveu-se o manual de projeto de pavimentos. O responsável por esse estudo foi o engenheiro Murillo Lopes de Souza, do Instituto Militar de Engenharia, no Rio de Janeiro, em meados de 1960, com última edição em 1981 (BALBO, 2007, p. 383).

Lekarp (1999 apud MALYSZ, 2004, p. 22) afirma:

Atualmente a filosofia de dimensionamento de pavimentos flexíveis tem como um dos seus principais objetivos limitar o aparecimento de afundamento de trilhas de roda na estrutura, esse defeito é ocasionado pelo acúmulo excessivo de deformações permanentes.

Sendo assim tem-se que conhecer as solicitações que atuam no pavimento originando deformações resilientes ou elásticas (ϵ_r) e permanentes ou plásticas (ϵ_p) (MALYSZ, 2004, p. 22). Sabe-se que os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos, como é o caso do CBR, não são capazes de prever as deformações que ocorrem no pavimento, sendo assim, tem-se a necessidade de emprego de métodos mecanísticos.

Segundo Medina e Motta (2005, p. 13), a mecânica dos pavimentos estuda os pavimentos como sistemas em camadas sujeitos às solicitações impostas pelos veículos. Assim ela preocupa-se com o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos que atuam nessa estrutura. Desta forma, Brito (2006, p. 1) afirma que se tem evoluído de métodos empíricos para processos empírico-mecanísticos, capazes de determinar solicitações impostas pelo tráfego a partir da mecânica dos pavimentos. A figura 3 apresenta as camadas de um pavimento e as principais tensões atuantes nessa estrutura.

O uso de métodos empírico-mecanísticos exige parâmetros que relacionem tensões e deformações no interior do pavimento quando esse é solicitado pelo tráfego. Nesse contexto, no dimensionamento de pavimentos flexíveis insere-se o conceito de Módulo de Resiliência (MR) dos materiais.

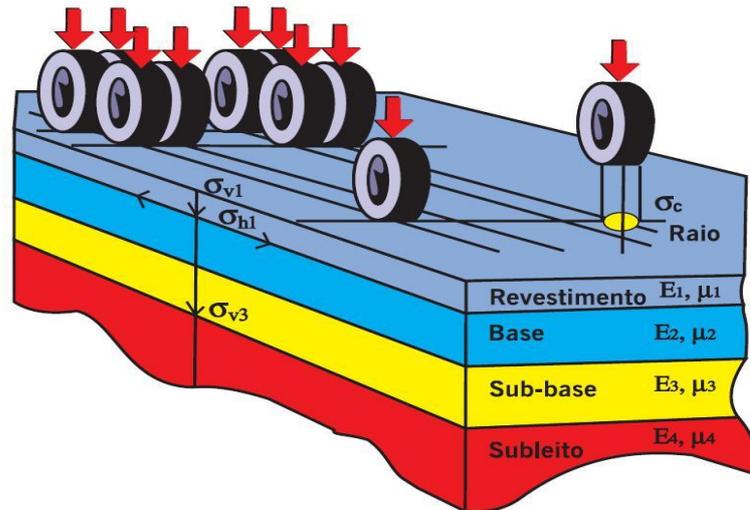


Figura 3: representação do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes (BERNUCCI et al., 2006)

Resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Esse parâmetro é definido como a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando o pavimento é solicitado por carregamentos cíclicos, de baixa duração (MEDINA; MOTTA, 2005, p.194). Atualmente o módulo de resiliência é um parâmetro-chave para o dimensionamento racional de pavimentos.

Bernucci et al. (2006) afirmam que o comportamento estrutural de um pavimento dependerá:

- a) da espessura de cada uma das camadas que o compõe;
- b) da rigidez de cada camada, dada pelo módulo de resiliência;
- c) da interação entre as camadas.

4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS: EMPREGO DA FRESAGEM

4.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de pavimentos consiste na reutilização, após reprocesso, dos materiais existentes em um pavimento deteriorado. Esse processo visa diminuir o consumo de materiais virgens, reduzindo a exploração de materiais pétreos. Pesquisas demonstram que nos processos de restauração de pavimentos, o reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento antigo minimiza os custos da obra. Mesmo em regiões com abundância de recursos minerais, a reciclagem pode ser a solução mais viável economicamente (DAVID, 2006, p. 19).

A técnica de reciclagem iniciou nos Estados Unidos em 1915. No entanto, a partir de 1930 a operação perdeu força devido ao aumento da oferta de petróleo. Em 1970, com a falta de materiais asfálticos e com a crise econômica internacional, voltou-se novamente a atenção ao reaproveitamento de materiais presentes em pavimentos deteriorados. No Brasil a técnica foi empregada pela primeira vez em 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro em ruas daquela cidade (DAVID, 2006, p. 20).

Segundo Bonfim (2007, p. 17):

A partir da crise do petróleo, na década de 1970, com a escassez de materiais asfálticos mais a crise econômica internacional, os técnicos rodoviários internacionais, em conjunto com os organismos de fomento, voltaram-se para a idéia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas, por meio da reciclagem, de forma a restaurar as condições de trafegabilidade de vias a níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro.

Atualmente o Brasil vem executando projetos que contemplam o processo de reciclagem do pavimento. Devido ao sucesso apresentado pelas soluções que abordam a técnica, percebe-se que esta tecnologia vem se consolidando nos serviços de restauração de pavimentos no País. Existem diversas maneiras de executar a reciclagem e um dos problemas apresentados em

projetos que contemplam a técnica diz respeito à granulometria resultante do material fresado. Segundo Bonfim (2007, p. 92), a composição granulométrica do material fresado dependerá:

- a) da profundidade de corte;
- b) do grau de oxidação do pavimento;
- c) do estado do pavimento antigo;
- d) do estado dos dentes de corte;
- e) da temperatura ambiente.

O quadro 1 apresenta a classificação dos tipos de reciclagem mais comuns (BONFIM, 2007, p. 103).

Tipos de Reciclagem		
quanto à geometria original	sem modificação	quando se mantem as cotas do greide
quanto ao local de processamento	em usina	fixa ou móvel, a quente ou a frio
	"in situ"	a quente ou a frio
	mista	reciclagem "in situ" da base e aplicação de reciclagem a quente, processada em usina com material fresado
quanto à fresagem do material	a frio	
	a quente	realizada com pré-aquecimento do pavimento
quanto à profundidade de corte	superficial	somente da camada de revestimento
	profunda	camada de revestimento, base e até sub-base
quanto à mistura reciclada	mistura a frio	PMF
	mistura a quente	CBUQ, PMQ
quanto ao uso da Mistura	como base reciclada	
	como camada de ligação	BINDER
	como revestimento	
quanto aos materiais adicionados	agregados	correção granulométrica
	cimento portland e cal	aumento da capacidade estrutural
	emulsão especial, CAP, polímeros	rejuvenecimento
	mistura asfáltica	adição de material fresado

Quadro 1 : tipos de reciclagem (BONFIN, 2007, p. 104)

O avanço do conhecimento possibilitou o desenvolvimento de equipamentos capazes de fresar, peneirar, rebitar, dosar e misturar os componentes reciclados (DAVID, 2006, p. 21). A primeira etapa da reciclagem consiste em fresar o pavimento existente na profundidade especificada em projeto. No próximo item este procedimento é apresentado.

4.2 FRESAGEM: CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Bonfim (2007, p. 19), “A origem do termo fresagem remonta à técnica de desbaste ou corte de metais, ou outras peças, por intermédio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de ângulos diversos, ou de várias freses, em movimento giratório contínuo.”.

O DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – em seu Glossário de Termos Técnicos Rodoviários (BRASIL, 1997, p. 118), define a fresagem de pavimentos como o, “Desbastamento a quente ou a frio de superfícies asfálticas, como parte de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico.”. Bonfim (2007, p. 20) conceitua a fresagem de pavimentos como: “[...] corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando a restauração de pavimentos.”.

Na década de 1970, quando iniciou-se o processo de reciclagem de pavimento, o material era extraído da pista por meio de escarificação do pavimento. Esse processo resultava em um material que, devido as suas grandes dimensões, necessitava ser rebitado para posterior reutilização. Dessa forma, considerou-se a técnica inadequada. A máquina para fresar foi desenvolvida a partir da segunda metade da década de 1970. O equipamento foi considerado útil na realização do desbaste do pavimento em profundidades pré-determinadas, o que antes não era possível (BONFIM, 2007, p. 17).

No Brasil, a técnica teve início no ano de 1980, com o emprego de uma fresadora americana nas obras de restauração da via Anchieta para a DERSA – Desenvolvimento Rodoviário S.A. – de São Paulo. Dessa forma, este serviço pode ser considerado recente no que diz respeito ao seu emprego e ao conhecimento adquirido em torno do tema – o que garante a motivação da questão de pesquisa desse trabalho –. Ilustra-se na figura 4 o procedimento de fresagem, na

imagem o equipamento possui uma esteira rolante por onde o material fresado é transportado até um caminhão basculante.



Figura 4: procedimento de fresagem de pavimentos no autódromo de Interlagos/SP (PAULIFRESA FRESAGEM E RECICLAGEM LTDA)

4.2.1 Principais equipamentos e componentes da operação de fresagem

O presente item apresenta uma breve abordagem dos principais equipamentos necessários para o emprego da técnica.

4.2.1.1 Máquina Fresadora

O principal equipamento para realização da operação de fresagem é a máquina fresadora. Esse equipamento é responsável por efetuar o desbaste da camada superficial do pavimento por meio do movimento de rotação de um cilindro, chamado de cilindro fresador. Atualmente o mercado disponibiliza algumas opções deste equipamento. Conforme será apresentado, existe mais de uma técnica de fresagem, definida pela configuração do equipamento utilizado.

Segundo Bonfim (2007, p. 28), pode-se afirmar que os equipamentos para fresar dividem-se em:

- a) de pequeno porte: destinados a arremates junto a diversas interferências existentes nos pavimentos, além disso, são usados em serviços de remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro, junto a sarjetões, entre outros;
- b) de médio porte: destinados à execução de fresagem tanto de pequenas quanto de grandes áreas, possuem cilindros de fresagem (equipamento constituinte das máquinas fresadoras – descrito no próximo item) com largura em torno de 1 a 1,5 metros, sendo dotados de correia transportadora para o carregamento de material fresado em caminhões basculantes;
- c) de grande porte: destinados a grandes áreas, por tratar-se de equipamentos com cilindro fresador com largura superior as citadas anteriormente. Há a venda no mercado equipamentos que podem atingir a largura de 4 metros de fresagem.

A produtividade apresentada pela máquina fresadora pode variar dependendo das condições impostas à execução desse serviço. Na fresagem de pavimentos urbanos, o número de interferência durante a operação é maior do que as interferências necessárias em vias expressas (áreas contínuas), por exemplo. Além disso, a produtividade pode variar em função:

- a) do estado do pavimento a ser restaurado;
- b) da espessura de corte;
- c) da temperatura do ambiente,
- d) do estado dos dentes de corte.

Apresentam-se, nos quadros 2 a 4, valores de produtividade média diária apresentada pelo equipamento. Esses valores são referentes a uma jornada de trabalho de 8 horas e levam em conta fatores como: o tempo destinado a sinalização da pista, a parada do equipamento para manutenção (abastecimento de água e de óleo), a mudança de local de serviço, entre outros fatores. Além disso, eles são válidos para o profundidade de corte de 5 cm (BONFIM, 2007, p. 93).

Tipo de Serviço	MODELO DE FRESADORA		
	2000 VC	2000 DC	W 1900
Fresagem de áreas contínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	5000 m ²	8000 m ²	10000 m ²
Fresagem de áreas descontínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	3500 m ²	4000 m ²	5000 m ²
Fresagem de áreas descontínuas com vinculação à aplicação do revestimento	1800 m ²	2000 m ²	3500 m ²

Quadro 2: fresadoras com cilindro de 2 m de largura (BONFIM, 2007)

Tipo de Serviço	MODELO DE FRESADORA		
	1000 C	W 1000 L	W 1000
Fresagem de áreas contínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	1800 m ²	4000 m ²	5000 m ²
Fresagem de áreas descontínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	1500 m ²	3000 m ²	3500 m ²
Fresagem de áreas descontínuas com vinculação à aplicação do revestimento	1000 m ²	2000 m ²	2500 m ²

Quadro 3: fresadoras com cilindro de 1 m de largura (BONFIM, 2007)

Tipo de Serviço	MODELO DE FRESADORA
	W 50
Fresagem de áreas contínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	1500 m ²
Fresagem de áreas descontínuas sem vinculação à aplicação do revestimento	1200 m ²
Fresagem de áreas descontínuas com vinculação à aplicação do revestimento	900 m ²

Quadro 4: fresadoras com cilindro de 0,5 m de largura (BONFIM, 2007)

4.2.1.2 Cilindro Fresador

Além de especificações referentes à máquina fresadora mostra-se necessário a descrição de outros componentes desse processo. Nesse contexto insere-se o cilindro fresador, um componente da máquina fresadora. Esse equipamento pode ser descrito como um tambor rígido construído em aço especial, no qual dentes de corte são fixados. É também conhecido como rolo fresador ou tambor fresador. Esse equipamento gira em alta rotação e quando em contato com o pavimento inicia o desgaste do mesmo (BONFIM, 2007, p.35). A figura 5 mostra um tipo de cilindro fresador. Pode-se perceber a grande quantidade de dentes de corte.



Figura 5: cilindro fresador (BONFIM, 2007)

Atualmente já estão a disposição máquinas fresadoras que possuem a particularidade de substituição do cilindro fresador por cilindros de diferentes larguras. A largura do cilindro fresador normalmente está associada ao tamanho do equipamento de fresagem (BONFIM, 2007, p. 41).

Segundo Bonfim (2007, p. 35):

A maioria dos cilindros possui os dentes de corte dispostos em forma de “V”, resultado do desenho formado por dois helicóides a partir da parte mediana do cilindro. Isso faz com que o material fresado, em função do giro, seja conduzido para o centro da caixa do cilindro fresador, facilitando seu lançamento na correia transportadora [...].

Certamente o cilindro fresador foi o componente do sistema que mais evoluiu nos equipamentos de fresagem (BONFIM, 2007, p. 37). Atualmente o mercado disponibiliza cilindros fresadores com diferentes larguras, sistemas de fixação dos dentes de corte no cilindro e distâncias entre os dentes de corte. Especificações como as citadas são úteis para a configuração do tipo de fresagem a ser executada. Comparando a altura dos dentes de corte utilizados na fresagem padrão e na microfresagem, por exemplo, percebe-se que a primeira situação é resultado de dentes de corte de maior altura.

4.2.1.3 Dentes de Corte

Os dentes de corte são as pontas de ataque que agem diretamente no pavimento, responsáveis pelo desgaste do mesmo. Bonfim (2007, p. 45) salienta:

Essas peças são constituídas por corpo forjado em aço, com ponta em material mais duro, de carboneto de tungstênio e cobalto. Os dentes de corte possuem um anel cilíndrico que envolve a sua base para que os mesmos sejam fixados sob pressão no interior do suporte, possibilitando girarem livremente durante o processo de fresagem, de forma a desgastá-los por igual.

Os dentes de corte são fixados ao tambor fresador através de suportes, os quais têm posições em ângulos de ataque definidos de forma a resultar, no pavimento, uma superfície de textura rugosa, porém plana e sem desníveis (BONFIM, 2007, p. 47). Dependendo do tipo cilindro a ser usado, a fixação do suporte dos dentes de corte ao rolo fresador se dará de maneira diferente.

4.2.1.4 Equipamentos e Serviços Adicionais

Além da descrição de alguns componentes básicos à máquina fresadora percebe-se que há a necessidade de citar equipamentos e serviços operacionais complementares ao processo. Os sistemas de fresagem não possuem sistemas para aspiração e coleta de material fresado. Assim, o material é lançado em correias transportadoras que descarregam o material em um caminhão basculante. Deve-se prever a utilização de um caminhão pipa, necessário para aspergir água sobre o cilindro fresador para diminuir o desgaste dos dentes de corte e

minimizar o nível de poeira durante os serviços de fresagem. Além disso, é necessário possuir uma carreta equipada com prancha apropriada ao transporte da máquina fresadora (BONFIM, 2007).

Além dos equipamentos adicionais citados, sugere-se a utilização de um detector de metais, para verificação da presença de material metálico situado sob a camada de revestimento. Executa-se a detecção passando o aparelho sobre a superfície a ser fresada. É comum encontrar tampões de ferro sob revestimentos onde foram executados os recapeamentos sem o levantamento dos mesmos, se não detectado, o tampão pode vir a danificar a máquina fresadora (BONFIM, 2007, p. 56).

Algumas operações adicionais à fresagem propriamente dita podem ser comentadas. É o caso de operações de arremates em locais fresados. Essa operação é indicada junto a sarjetões ou em torno de tampões de ferro. Para tal processo aconselha-se a utilização de um equipamento de fresagem de pequeno porte. Tal operação pode ser realizada também por intermédio de serra de disco e/ou rompedor pneumático (BONFIM, 2007).

No mesmo contexto insere-se a varrição da pista. Após a fresagem ficam presentes, sobre a pista, materiais soltos os quais podem causar inconveniências aos usuários da via (BONFIM, 2007, p. 60). Além disso, se executada a camada de recapeamento pós-fresagem, a pista deve estar isenta de pó, o que prejudicaria a execução da restauração da via. Salienta-se que deve ser prevista a sinalização da via onde se executará o processo de fresagem, garantindo a segurança dos usuários.

4.2.2 Classificação dos tipos de fresagem

Segundo Bonfim (2007, p. 21), “Vários autores divergem quanto à classificação dos tipos de fresagem e suas aplicações; mas, de maneira resumida, pode-se classificar a fresagem de pavimentos quanto à espessura de corte e à rugosidade resultante na pista.”.

A classificação referente à espessura de corte é subdividida em superficial, rasa e profunda. A fresagem superficial é destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Sendo assim, dispensa o posterior recapeamento da pista, uma vez que permite

níveis mínimos de conforto e segurança. Dessa forma, defeitos como exudação e deformações plásticas podem ser tratados com essa técnica (BONFIM, 2007, p. 22).

A fresagem rasa atinge profundidades maiores, em torno de 5 cm. Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. Aplicado principalmente em vias urbanas, onde se deseja manter o greide do pavimento (BONFIM, 2007, p. 22).

A fresagem profunda é aquela em que o corte atinge níveis consideráveis, podendo alcançar a camada de base e até mesmo de sub-base do pavimento. Essa técnica normalmente é utilizada em pavimentos que necessitam de reparos estruturais. Além disso, pode ser empregada em serviços de pequeno porte como o requadramento de buracos (BONFIM, 2007, p. 23).

A classificação referente à rugosidade resultante na pista é subdividida em padrão, fina e microfresagem. Bonfim (2007, p. 23) comenta, “A rugosidade resultante na pista, depende do tipo de cilindro utilizado na execução da fresagem, além da velocidade de operação.”.

A fresagem padrão é resultante do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos. Nessa situação a distância lateral entre os dentes de corte do cilindro fresador é de aproximadamente 15 mm. Empregada em projetos que especificam posterior aplicação de nova camada de revestimento (BONFIM, 2007, p. 24).

Já a fresagem fina, de acordo com Bonfim (2007, p. 24): “[...] (*fine milling*) foi introduzida posteriormente, como resultado da aplicação de cilindros fresadores com distância lateral entre os dentes de corte de aproximadamente 8 mm, resultando sulcos menores e menor rugosidade na pista, o que possibilitou essa classificação.”.

Finalmente a microfresagem é empregada para remoção de espessuras muito delgadas do pavimento, sendo assim, os dentes de corte posicionam-se lateralmente a uma distância de aproximadamente 2 a 3 mm. Esse procedimento pode ser empregado na remoção da faixa de sinalização horizontal da pista, visando alterar o *layout* viário. Além disso, o procedimento pode ser empregado na adequação do perfil longitudinal da via, dispensando aplicação de nova camada de revestimento (BONFIM, 2007, p. 25).

4.2.3 Aplicação da técnica de fresagem

A fresagem de um pavimento pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura de ocorrência: a frio ou a quente. Na primeira situação, o processo é realizado na temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do pavimento. Nessa situação ocorre a quebra de parte dos agregados, havendo, assim, a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Já na fresagem a quente, utilizada como parte do processo de reciclagem *in situ* a quente, é efetuado o pré-aquecimento do revestimento. O prévio aquecimento do material faz com que a sua resistência ao corte seja diminuída não ocasionando alteração significativa na curva granulométrica do material, como é o caso da fresagem a frio (BONFIM, 2007, p. 103).

A técnica de fresagem pode ser empregada na solução dos mais variados tipos de defeitos apresentados por um pavimento. Dessa forma, a execução dos serviços dependerá, de certa forma, do defeito encontrado na via. Nesse contexto, segundo Bonfim (2007, p. 66), pode-se descrever diferentes procedimentos para emprego da técnica, são eles, fresagens:

- a) para correção de defeitos superficiais: empregada para correção de defeitos na superfície dos revestimentos, normalmente empregada para correção de deformações plásticas ou exsudações sendo capaz de aumentar a aderência pneu-pavimento;
- b) de áreas descontínuas: esta aplicação consiste na execução da fresagem em áreas localizadas, podendo não cobrir a largura total da pista;
- c) contínuas de toda a pista: execução da fresagem em toda a pista. Essa técnica é empregada, principalmente, em pavimentos com muitos defeitos superficiais;
- d) em cunha: procedimento empregado apenas nas bordas das pistas, junto à sarjeta, com o intuito de promover a ancoragem da nova camada de revestimento;
- e) para correção da inclinação do pavimento;
- f) de arremate: esta aplicação consiste em executar a fresagem do pavimento junto às diversas interferências existentes no mesmo, normalmente empregada em vias urbanas;
- g) superficiais de sonorização: empregada em acostamentos. Nesse caso a superfície fresada servirá de alerta aos usuários quando o veículo trafegar fora dos limites das faixas de rolamento.

Com base na ampla potencialidade de emprego da técnica de fresagem de pavimentos tem-se utilizado esse procedimento nos mais variados tipos de problemas apresentados por uma via. De maneira resumida, conforme Bonfim (2007, p. 74) aborda, a técnica pode ser utilizada na correção de defeitos como:

- a) trincamentos;
- b) remendo em buracos;
- c) afundamento nas trilhas de rodas: defeito ocasionado pela utilização de uma mistura asfáltica imprópria para as condições locais ou por deficiência estrutural das camadas inferiores;
- d) deformação plástica do revestimento: normalmente são defeitos funcionais associados a utilização de uma mistura asfáltica inadequada;
- e) agregados polidos: defeito aonde acontece a diminuição da aderência pneu-pavimento devido ao desgaste das arestas dos agregados;
- f) exsudação: defeito resultante da afloração de material betuminoso na superfície do pavimento;
- g) bombeamento de finos: defeito presente em pavimentos com alto grau de deterioração aonde a água infiltra até as camadas inferiores da estrutura sendo posteriormente bombeada para a superfície através da sobrecarga exercida pelo tráfego;
- h) manutenção do greide de vias que receberão camada de recapeamento;
- i) manutenção do desnível máximo entre a pista e o acostamento.

Percebe-se que a operação de fresagem está associada à solução de inúmeros defeitos presentes em um pavimento. A escolha da solução a ser adotada dependerá do tipo de problema encontrado e dos recursos que estarão disponíveis. Cabe ressaltar que a experiência do profissional mostra-se relevante nesse momento.

Deve-se tomar cuidado em relação aos problemas que podem ocorrer devido à utilização da fresagem, pois alguns dos problemas são inerentes ao processo. Nesse sentido, uma vez executada a fresagem de um pavimento é estabelecido um degrau na pista. Nesse caso, deve-se atentar às situações em que ocorre a liberação ao tráfego antes de ser executada a nova camada de recapeamento. Dependendo da profundidade de corte é necessário o isolamento total da área. Além disso, a técnica pode provocar o aparecimento de buracos ou panelas em virtude da desagregação do pavimento remanescente. Esse tipo de problema acontece, por

exemplo, quando a espessura de corte for superior ao revestimento asfáltico (BONFIM, 2007, p. 88).

Tem-se como prática recomendável executar o recapeamento, após a fresagem, o mais breve possível, minimizando transtornos aos usuários (BONFIM, 2007, p.89). O projeto realizado por um engenheiro experiente pode minimizar alguns problemas executivos inerentes ao processo. Além disso, para a execução da técnica de fresagem e até mesmo para a reciclagem do material fresado deve-se fazer uso das especificações contidas nas normas rodoviárias. O DNER disponibiliza algumas normas com essa finalidade, podem ser citadas:

- a) DNER-ES 405/00 – pavimentação – reciclagem de pavimento à frio “in situ” com espuma de asfalto
- b) DNIT 033/2005- ES - pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina;
- c) DNIT 034/2005- ES – pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente no local.

5 MATERIAIS E MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os procedimentos laboratoriais efetuados para caracterização e avaliação dos materiais estudados nessa pesquisa. Os ensaios em laboratório são abordados de maneira resumida, assim, apresentam-se as normas técnicas para realização desses procedimentos, nas quais constam de maneira detalhada os ensaios.

5.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa foram estudados dois materiais distintos: o material asfáltico fresado (proveniente da fresagem do pavimento da BR-290) e a areia explorada na jazida Gomes no município de Osório/RS. O primeiro material está sendo utilizado na pavimentação de acostamentos da *freeway*. Enquanto que o segundo material é usado como material para camada de reforço de subleito entre os km 17 e 19 na pista sul (sentido capital/litoral) da BR-290.

O material fresado teve origem nos serviços de restauração da BR-290. As operações de fresagem que produziram o material em estudo foram realizadas a frio pela máquina fresadora W 1000 L da marca Wirtgen com um cilindro de 1 metro de largura. A exata espessura de corte – no local da coleta das amostras – não é conhecida. No entanto, os serviços de fresagem realizados no pavimento da BR-290 atingem a totalidade da camada de revestimento asfáltico. Assim, as profundidades de corte variam de 5 cm até 10 cm. Essas espessuras caracterizam a fresagem profunda. O fresado asfáltico é um material granular coberto por ligante asfáltico. Duas amostras representativas do material foram coletadas. A amostra 1 foi coletada no dia 24 de novembro de 2009 no km 106+100 (pista sul da BR-290) e a amostra 2 foi coletada no dia 1 de abril de 2010 no km 55+420 (pista norte – sentido litoral/capital – da BR-290) tendo, respectivamente, 40 kg e 200 kg de material. Ambas as amostras foram coletadas sobre a caçamba do caminhão que é utilizado para o transporte do material até o local de deposição.

As figuras 6 a 8 apresentam, respectivamente, as amostras 1 e 2 de material fresado, e a amostra de areia.



Figura 6: material asfáltico fresado (amostra 1)



Figura 7: material asfáltico fresado (amostra 2)



Figura 8: areia utilizada para comparação com o material asfáltico fresado

5.2 MÉTODOS

Os métodos empregados para caracterização dos materiais estudados nessa pesquisa compreendem procedimentos laboratoriais e análises mecânicas por meio do programa Everstress 5.0.

Os procedimentos laboratoriais empregados para a caracterização do material fresado foram:

- a) análise granulométrica antes e após a extração do ligante asfáltico;
- b) determinação do teor de ligante da amostra;
- c) ensaio de compactação;
- d) ensaio de ISC;
- e) ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

Para realização dos ensaios mencionados acima, as amostras de material fresado tiveram seu volume reduzido por processos sucessivos de quarteamento. Visto que as amostras são provenientes de locais distintos, julgou-se adequado trabalhar apenas com a amostra 2, de 200 kg. A amostra 1 foi submetida apenas aos procedimentos “a” e “b”. Desse modo, pode-se comparar a granulometria resultante entre os agregados de duas fresagens distintas de pavimentos asfálticos.

A areia, utilizada para comparação com o material fresado, foi submetida ao ensaio de compactação e ao ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

A seguir são descritos os procedimentos laboratoriais executados ao longo dessa pesquisa. Além disso, no final desse capítulo, aborda-se o programa Everstress 5.0.

5.2.1 Análise granulométrica

O primeiro procedimento laboratorial empregado nesse estudo foi a análise granulométrica do material. Dessa forma, para a análise granulométrica da amostra 1 de material fresado, a relação de peneiras adotadas baseou-se naquela sugerida pela norma DNER-ES 303/97 para base estabilizada granulometricamente. Para análise granulométrica da amostra 2 de material

fresado e para a análise granulométrica dos agregados das amostras, adotou-se a relação de peneiras que compõem a faixa C para projeto de misturas asfálticas do DNIT que consta na norma DNIT 031/06-ES. A adoção de normas diferentes para as análises granulométricas ocorreu, pois a proposta inicial para utilização do material fresado era para a camada de base, então, em um momento inicial, foi adotada a norma DNER-ES 303/97. No entanto, o projeto das misturas asfálticas fresadas respeitavam os limites da faixa C do DNIT então julgou-se coerente adotar a norma DNIT 031/06-ES para as análises granulométricas.

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras e no tratamento estatístico dessa informação. Para isso, a distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento. Nessa análise a amostra de agregados é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores. Assim pesa-se a fração de partículas retida em cada peneira e esse valor é comparado com a massa total da amostra. A distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira (BERNUCCI et al., 2006, p. 121).

Dessa forma a granulometria de um material pode ser avaliada a partir de uma amostra representativa desse material. A denominação das possíveis graduações que os materiais podem apresentar são: densa ou bem graduada, aberta (ausência de material fino), uniforme (partículas com mesmo tamanho) e descontínuas (aquelas que apresentam pequenas porcentagem de agregados com tamanhos intermediários) (BERNUCCI et al., 2006, p. 122).

5.2.2 Extração de ligante

A determinação do teor de ligante presente nas amostras foi realizada através da extração do ligante por meio do forno de ignição da marca Troxler. Para esse procedimento, que não é normalizado pelas pelos órgãos rodoviários nacionais, a co-orientadora dessa pesquisa – Luciana Rohde – recomenda a utilização da norma ASTM D6307 - 05(2010): *Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method*. O ensaio consiste em aquecer a amostra de mistura asfáltica a temperaturas da ordem de 300 a 400 °C por meio do forno de ignição. O ligante presente na mistura se transforma em gás e pó e por sucção é extraído do interior do equipamento que é ilustrado pela figura 9.



Figura 9: forno de ignição utilizado para determinação do teor de ligante presente nas amostras de material fresado

A determinação do teor de ligante presente na amostra é dada pela diferença de massa que a amostra apresenta no início e no fim do ensaio. Assim, o equipamento é provido de uma balança que determina a massa da mistura ao longo do ensaio. O término do ensaio se dará quando não houver registros de variação da massa da amostra ao longo do tempo. Um alarme anuncia o fim do procedimento.

Sabe-se que a sucção do ligante presente na amostra pode carregar pequenos agregados minerais acarretando em erros na determinação do teor de ligante presente na mistura. Assim sugere-se a utilização de um fator de correção que deve reduzir o esse erro.

A amostra deve ser ensaiada com a maior superfície de contato possível, assim tem-se maior eficiência no procedimento. Sendo assim, inicialmente a amostra deve ser aquecida por aproximadamente 30 minutos a temperatura de 150 °C por meio de estufas. O próximo passo é depositar o material, de modo a atingir a maior superfície de contato possível com o meio, no interior de uma caixa metálica vazada. Essa caixa é colocada no forno de ignição, que já deverá estar na temperatura de 300 °C para o início do ensaio.

A duração do ensaio dependerá da quantidade de material presente em cada amostra. Assim, pode-se afirmar que valores entre 600 e 1200 gramas de material garantem um tempo de ensaio de não mais de uma hora.

De acordo com David (2006), a determinação do teor de ligante também pode ser feita por refluxo ou utilizando o extrator centrífugo e esses procedimentos são detalhados pelas respectivas normas:

- a) DAER/RS-EL 213/01: Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosas utilizando o extrator por refluxo;
- b) DAER/RS-EL 214/01: Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosas utilizando o extrator centrífugo.

5.2.3 Ensaio de compactação e ISC

O ensaio de compactação pode ser realizado seguindo as recomendações das normas DNER-ME 129/94 e pela NBR 7182/98: Solo – Ensaio de Compactação (MALYSZ, 2004, p. 63). A pesquisa em questão seguiu os procedimentos sugeridos na DNER-ME 129/94. A norma fixa um método para determinação da correlação entre o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca. O objetivo é determinar qual valor de umidade do solo está associado ao maior valor de massa específica aparente seca. Sendo assim, esse valor de umidade foi tido como alvo para a realização dos demais ensaios com o material fresado e com a areia.

O peso específico aparente seco de um material não é calculado diretamente. O ensaio de compactação fornece o peso específico aparente úmido. Dessa forma, a seguinte fórmula deve ser utilizada para o cálculo do peso específico aparente seco do material.

$$\gamma_d = \gamma / (1+w) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco (kN/m^3);

γ = peso específico aparente úmido (kN/m^3);

w = umidade do material (em decimal).

O ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia foi realizado conforme preconiza a norma DNER-ME 049/94. A norma NBR 9895/87: Solo – Índice de Suporte Califórnia também pode ser utilizada para realização desse ensaio (MALYSZ, 2004, p. 63).

O valor do ISC exprime uma porcentagem da resistência à penetração de dado material, tido como valor de referência o resultado de materiais britados e bem graduados (valor-padrão 100%). Pode-se afirmar que a realização desse procedimento consiste em duas etapas. Inicialmente determina-se a expansão apresentada pelo material após o corpo-de-prova sofrer imersão em água por 4 dias. Terminado o período de imersão pode-se realizar o ensaio de penetração para determinação do ISC.

O ensaio de penetração é realizado com velocidade de penetração constante de 1,27 mm/min por 10 minutos. O valor de ISC é obtido a partir da pressão aplicada para manutenção da velocidade de penetração. Assim, o valor de ISC é dado pela seguinte fórmula:

$$\text{ISC} = (\text{pressão calculada ou pressão corrigida}) / (\text{pressão padrão}) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

pressão aplicada ou pressão corrigida = dada pelo ensaio de penetração;

pressão padrão = valor padrão presente na norma.

O valor adotado de ISC é o maior valor obtido nas penetrações de 2,54 mm (0,1 polegadas) e 5,08 mm (0,2 polegadas).

5.2.4 Ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência

O ensaio triaxial cíclico foi realizado segundo o descrito na norma “*Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*” (AASHTO Designation: T 307-99). Além disso, a realização desse ensaio pode seguir as recomendações sugeridas pela norma DNER ME 131/91: solos – determinação do módulo de resiliência.

Nesse ensaio o material é submetido a 15 estados de tensões diferentes, para cada situação distinta o módulo de resiliência é calculado. Para cada estado de tensão aplica-se um total de 100 ciclos de carga.

Durante o ensaio duas tensões agem sobre o material: a confinante e a desvio. A primeira simula os possíveis confinamentos que o material pode sofrer quando utilizado ao longo da estrutura de um pavimento. Já a segunda, simula o tráfego de veículos solicitando o pavimento. Sendo assim, tem-se a aplicação de 5 valores distintos de tensão confinante associados a aplicação de 3 valores distintos de tensão desvio. Dessa forma, atingem-se os 15 estados de tensões recomendados pela especificação da AASHTO T 307-99.

Inicialmente devem-se eliminar as grandes deformações plásticas que ocorrem no início da aplicação de carga (MEDINA, 1997). Assim a norma do DNER especifica que o material sofra um condicionamento prévio ao ensaio com 500 a 1000 ciclos de carga. Após a etapa de condicionamento inicia-se o ensaio propriamente dito. A figura 10 ilustra o equipamento triaxial para ensaio de módulo de resiliência em solos.



Figura 10: equipamento triaxial para ensaio de módulo de resiliência

Segundo Malysz (2004, p. 35), o módulo de resiliência é calculado a partir da fórmula 3:

$$M_r = (\sigma_d) / (\epsilon_r) \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

M_r = módulo de resiliência;

σ_d = tensão desvio;

ϵ_r = deformação resiliente.

Segundo Malysz (2004, p. 68), a deformação resiliente é calculada a partir da fórmula 4:

$$\epsilon_r = (\Delta h) / (H_o) \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

ϵ_r = deformação resiliente;

Δh = variação da altura do corpo de prova em cada ciclo de carga

H_o = altura inicial do corpo de prova.

Segundo Malysz (2004, p. 69), os materiais granulares têm seus resultados apresentados por gráficos que relacionam os valores de módulo, no eixo das abscissas, e os valores de tensão confinante, no eixo das ordenadas, ambos em escala logarítmica. O modelo sugerido para esses materiais é:

$$M_r = (k_1) * (\sigma_3)^{k_2} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

M_r = módulo de resiliência;

σ_3 = tensão confinante;

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo.

Outros modelos podem ser utilizados para a modelagem dos valores de módulo de resiliência de solos empregados na pavimentação. Assim, para que um modelo de MR de um material possa ser utilizado como dado de entrada no programa Everstress 5.0 a modelagem dos valores de MR deve seguir o seguinte modelo:

$$Mr = (k_1) * (\theta/P_{atm})^{k_2} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

Mr = módulo de resiliência;

$\theta = \sigma_{desvio} + 3 * \sigma_{confinante}$;

$P_{atm} = 0,101$ MPa;

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo.

5.2.5 Análises mecánísticas

As análises mecánísticas realizadas nessa pesquisa têm o objetivo de comparar a estrutura do pavimento da BR-290 com uma solução alternativa que emprega material fresado ao longo da camada de reforço de subleito. Essa camada atualmente é executada utilizando um agregado natural explorado pela jazida Gomes no município de Osório/RS. Sendo assim, será avaliado o comportamento da estrutura quando se tem a substituição total da areia pelo material fresado, que é proveniente dos serviços de restauração do pavimento da BR-290.

Sabe-se que a estrutura do pavimento da BR-290 apresenta bastante heterogeneidade ao longo da extensão da via. Sendo assim, a figura 11 ilustra a estrutura do pavimento da BR-290 entre os km 17 e 19 da pista sul.

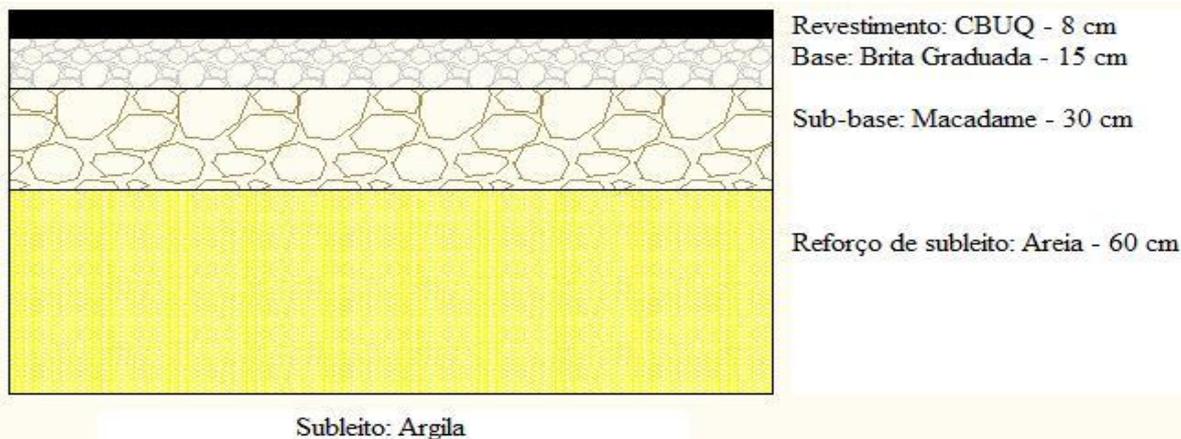


Figura 11: estrutura original – pavimento da BR-290 analisado nessa pesquisa

Nessa etapa do trabalho fez-se uso do programa computacional Everstress 5.0, um software disponível na internet que foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDOT). Esse programa analisa estruturas contendo no máximo 5 camadas que podem ser solicitadas por até 20 cargas. O *software* é capaz de avaliar até 20 pontos do pavimento, calculando valores de tensão, deformação e deslocamentos provocados pelas solicitações (FRANCO, 2004, p. 26).

Os dados de entrada do programa são:

- a) o módulo de resiliência das camadas asfálticas em MPa;
- b) os modelos de MR das camadas granulares e/ou coesivas em MPa;
- c) o coeficiente de Poisson de cada camada;
- c) a espessura de cada camada em cm;
- d) a pressão de inflação dos pneus em kPa;
- e) o carregamento em Newton, a coordenadas (x,y) do carregamento e o raio de aplicação da carga;
- e) as coordenadas cartesianas dos pontos onde se deseja conhecer as tensões e as deformações;

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o material fresado em com a areia. Além disso, é abordada a análise desses resultados e dos resultados das análises mecânicas.

6.1 MATERIAL FRESADO

Os ensaios foram realizados com duas amostras distintas de material fresado, as quais são provenientes de fresagens – realizadas em datas diferentes – do pavimento da BR-290. O quadro 5 traz informações dessas amostras.

Amostras	Local	Data da fresagem	Massa (kg)
1	km 106+100 (pista sul, BR-290)	24/11/2009	40
2	km 55+420 (pista norte, BR-290)	01/04/2010	200

Quadro 5: amostras de material fresado estudadas

As amostras não sofreram adição de outro material. Sendo assim, na seguinte ordem, o item 6.1 aborda a análise:

- a) da granulometria das amostras de material fresado;
- b) do teor de ligante e da granulometria do agregado das amostras;
- c) do ensaio de compactação da amostra 2
- d) do Índice de Suporte Califórnia da amostra 2;
- e) do módulo de resiliência da amostra 2.

6.1.1 Granulometria das amostras

Para a análise granulométrica das amostras de material fresado adotou-se a relação de peneiras apresentadas pelas normas DNER-ES 303/97 (para a amostra 1) e DNIT 031-ES (faixa C, para a amostra 2). O quadro 6 apresenta valores médios para a granulometria da amostra 1, já que a amostra foi dividida em 4 partes e todas as partes tiveram a granulometria avaliada. Além disso, apresenta-se na figura 12 a curva granulométrica para a amostra 1 (linha contínua) e a faixa C do DNIT, que foi adotada para o projeto da mistura asfáltica fresada (linhas tracejadas). O quadro 7 e a figura 13 apresentam os resultados referentes a granulometria da amostra 2.

Peneira		massa média retida (g)	massa média retida acumulada (g)	% média retida	% média passante
(mm)	nº ou "				
50,8	2"	0	0	0,00%	100,00%
25,4	1"	1254,1	1254,1	13,14%	86,86%
9,525	3/8"	2672,925	3927,025	41,13%	58,87%
4,76	4	1955,425	5882,45	61,61%	38,39%
2	10	1789,925	7672,375	80,36%	19,64%
0,42	40	1338,325	9010,7	94,38%	5,62%
0,074	200	499,725	9510,425	99,61%	0,39%

Quadro 6: granulometria média da amostra 1

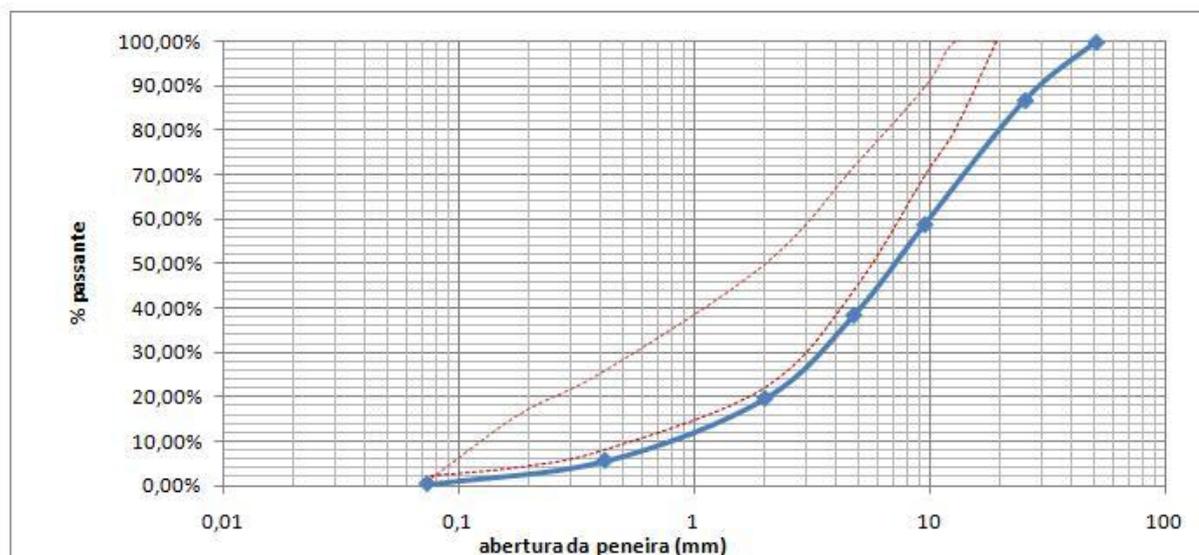


Figura 12: curva granulométrica média para a amostra 1

Peneira		massa retida (g)	massa retida acumulada (g)	% retida	% passante
(mm)	n° ou "				
25,4	1"	105,5	105,5	1,63%	98,37%
19,05	3/4"	149	254,5	3,92%	96,08%
12,7	1/2"	1037	1291,5	19,90%	80,10%
9,525	3/8"	724,8	2016,3	31,07%	68,93%
4,76	4	1875,3	3891,6	59,96%	40,04%
2	10	1326,3	5217,9	80,39%	19,61%
0,42	40	1210,5	6428,4	99,04%	0,96%
0,177	80	45,1	6473,5	99,74%	0,26%
0,074	200	14,3	6487,8	99,96%	0,04%

Quadro 7: granulometria da amostra 2

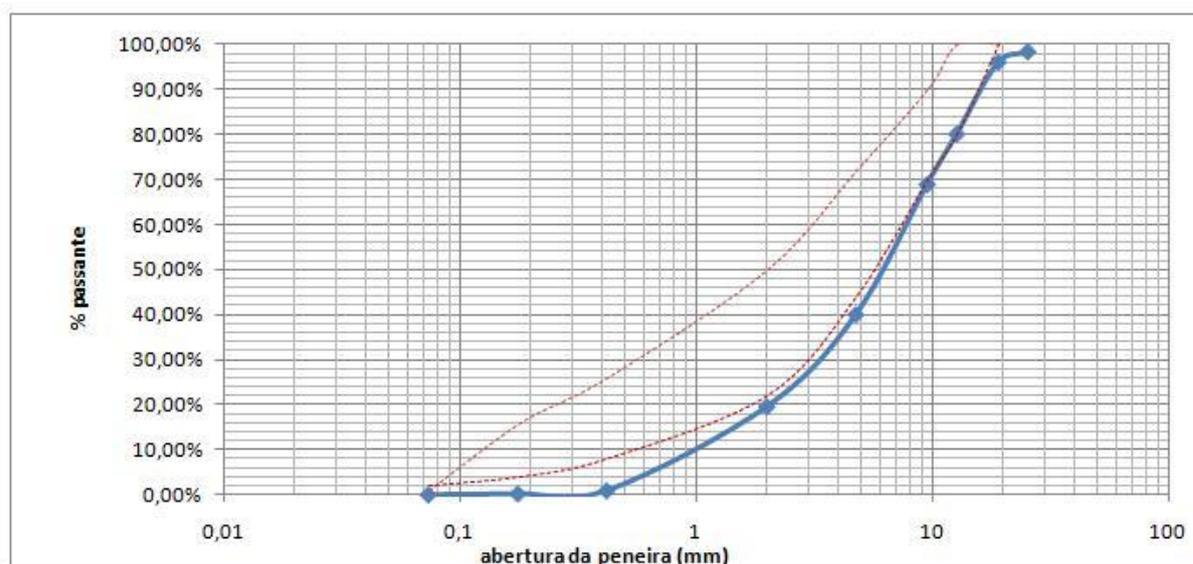


Figura 13: curva granulométrica da amostra 2

Analisando os resultados obtidos pode-se perceber que há pouca diferença entre a distribuição granulométrica das amostras. A partir da análise do formato das curvas obtidas pode-se afirmar que as amostras apresentaram boa graduação. Cabe destacar que a amostra 1 possui 13,14% de material com tamanho máximo nominal superior a 1 polegada, enquanto que a amostra 2 possui 1,63% de material com as mesmas dimensões. Isso significa que a fresagem 1 produziu um material com maiores dimensões que a fresagem 2; é necessário comentar que as amostras estudadas foram produzidas pelo mesmo tipo de fresagem (fresagem profunda). A fração areia (peneiras n° 4 e n° 10) encontrada para cada amostra é bastante similar (38,39% retido na peneira n° 4 e 19,64% retido na peneira n° 10 para a amostra 1; 40,04% e 19,61% de

material retido para as mesmas peneira para a amostra 2). Percebe-se pouca quantidade de material fino nas amostras, isso ocorre pois essa parcela de material encontra-se misturada ao ligante asfáltico que encontra-se envolta dos agregados da mistura asfáltica. Além disso, as curvas granulométricas das amostras de material fresado ficaram fora dos limites estabelecidos na faixa C para misturas asfálticas.

Conforme mencionado, a granulometria do material fresado varia em função de diversos fatores (temperatura de fresagem, estado dos dentes de corte, tipo de mistura asfáltica fresada, etc.). Devido a falta de informações não é possível definir qual fator foi mais significativo para a presença de agregados com maiores dimensões na amostra 1.

A figura 14 apresenta a faixa E (pontilhada), a faixa F (tracejada) para base estabilizada granulometricamente e as curvas granulométricas para as amostras estudadas (a linha contínua sem marcador é referente à amostra 1 e a linha contínua com marcador é referente à amostra 2). As curvas encontradas para as amostras não se enquadram em nenhuma das faixas. Assim, percebe-se que o material estudado, para ser utilizado na camada de base de pavimentos e para atender a essas faixas de trabalho, deve haver adição de outros materiais ao fresado asfáltico.

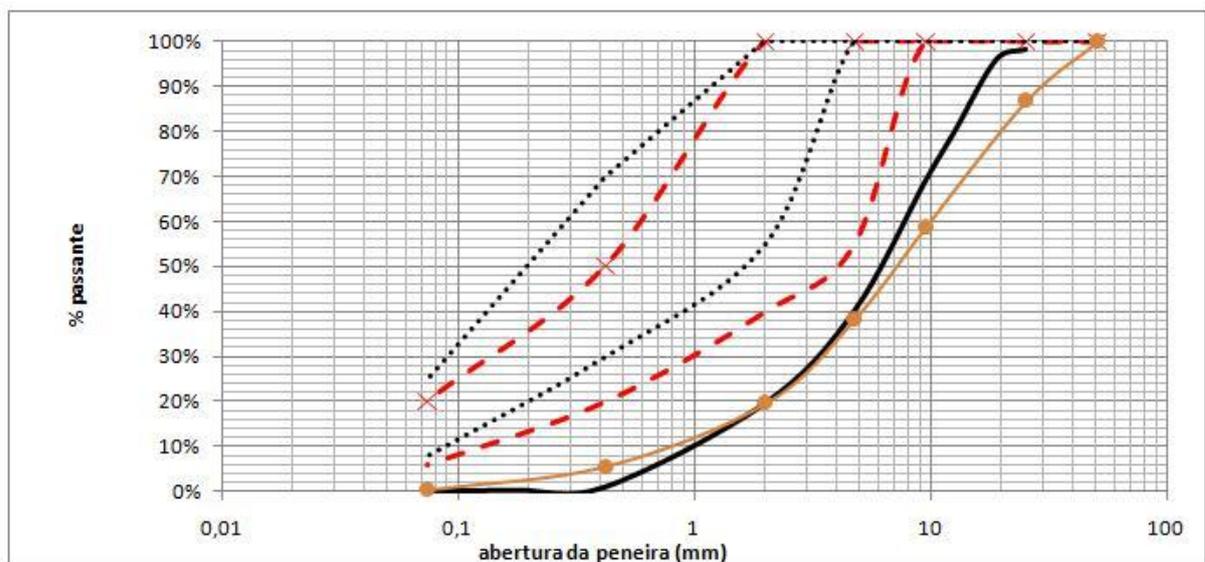


Figura 14: faixas de trabalho E e F para base estabilizada granulometricamente (linhas pontilhadas e tracejadas), curvas granulométricas das amostras de fresado asfáltico (linhas contínuas)

6.1.2 Teor de ligante e granulometria dos agregados das amostras

Para a determinação do teor de ligante presente nas amostras foram realizadas duas determinações para cada amostra de material. Desse modo, são apresentados os quadros 8 e 9 onde constam o teor de ligante para cada amostra e os valores médios obtidos.

AMOSTRA 1			
Amostra	Massa da amostra (g)	Massa da amostra s/ ligante asf. (g)	Teor de Ligante (%)
1A	1098,8	1037	5,62
1B	1378	1301	5,58
		Média	5,60

Quadro 8: teor de ligante médio presente na amostra 1

AMOSTRA 2			
Amostra	Massa da amostra (g)	Massa da amostra s/ ligante asf. (g)	Teor de Ligante (%)
2A	699,4	665,8	4,8
2B	721,5	688,4	5,58
		Média	4,69

Quadro 9: teor de ligante médio presente na amostra 2

Pode-se perceber que a amostra 1 apresenta, aproximadamente, 1% a mais de ligante asfáltico que a amostra 2. Essa variação pode ter influenciado a granulometria do material produzido pela fresagem.

A seguir é apresentado a granulometria dos agregados das amostras sem o ligante asfáltico. Para isso, após ter sido feita a extração de ligante presente na amostra, o material foi lavado com água. A amostra 1B, durante o processo de lavagem, teve parte de seu material perdido. Sendo assim, apenas o agregado presente na amostra 1A teve a sua granulometria avaliada. Para a amostra 2 é apresentada a granulometria média dos agregados presentes nas amostras 2A e 2B. Sendo assim, os quadros 10 e 11, respectivamente, apresentam a granulometria do agregado da amostra 1A e a granulometria média dos agregados das amostras 2A e 2B.

Peneira		massa retida (g)	massa retida acumulada (g)	% retida	% passante	limites para a faixa C do DNIT	
(mm)	n° ou "					superior	inferior
25,4	1"	0	0	0,00%	100,00%	-	-
19,05	3/4"	0	0	0,00%	100,00%	100,0%	100,0%
12,7	1/2"	59,18	59,18	5,99%	94,01%	100,0%	80,0%
9,525	3/8"	75,55	134,73	13,63%	86,37%	90,0%	70,0%
4,76	4	180,81	315,54	31,93%	68,07%	72,0%	44,0%
2	10	286,85	602,39	60,95%	39,05%	50,0%	22,0%
0,42	40	242	844,39	85,44%	14,56%	26,0%	8,0%
0,177	80	73,91	918,3	92,92%	7,08%	16,0%	4,0%
0,074	200	70	988,3	100,00%	0,00%	1,0%	2,0%

Quadro 10: granulometria do agregado da amostra 1A

Peneira		massa média retida (g)	massa média retida acumulada (g)	% média retida	% média passante	limites para a faixa C do DNIT	
(mm)	n° ou "					superior	inferior
25,4	1"	0	0	0,00%	100,00%	-	-
19,05	3/4"	0	0	0,00%	100,00%	100,0%	100,0%
12,7	1/2"	31,15	31,15	4,96%	95,04%	100,0%	80,0%
9,525	3/8"	33,77	64,92	10,33%	89,67%	90,0%	70,0%
4,76	4	105,23	170,15	27,08%	72,92%	72,0%	44,0%
2	10	187,415	357,565	56,91%	43,09%	50,0%	22,0%
0,42	40	199,805	557,37	88,71%	11,29%	26,0%	8,0%
0,177	80	41,425	598,795	95,30%	4,70%	16,0%	4,0%
0,074	200	29,505	628,3	100,00%	0,00%	1,0%	2,0%

Quadro 11: granulometria média dos agregados das amostras 2A e 2B

As figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, a curva granulométrica para os agregados da amostra 1A e a curva granulométrica média para os agregados das amostras 2A e 2B, ambas em linhas contínuas. As curvas granulométricas tracejadas definem os limites para a faixa C do DNIT, pois essa foi a faixa utilizada para o projeto original da mistura asfálticas.

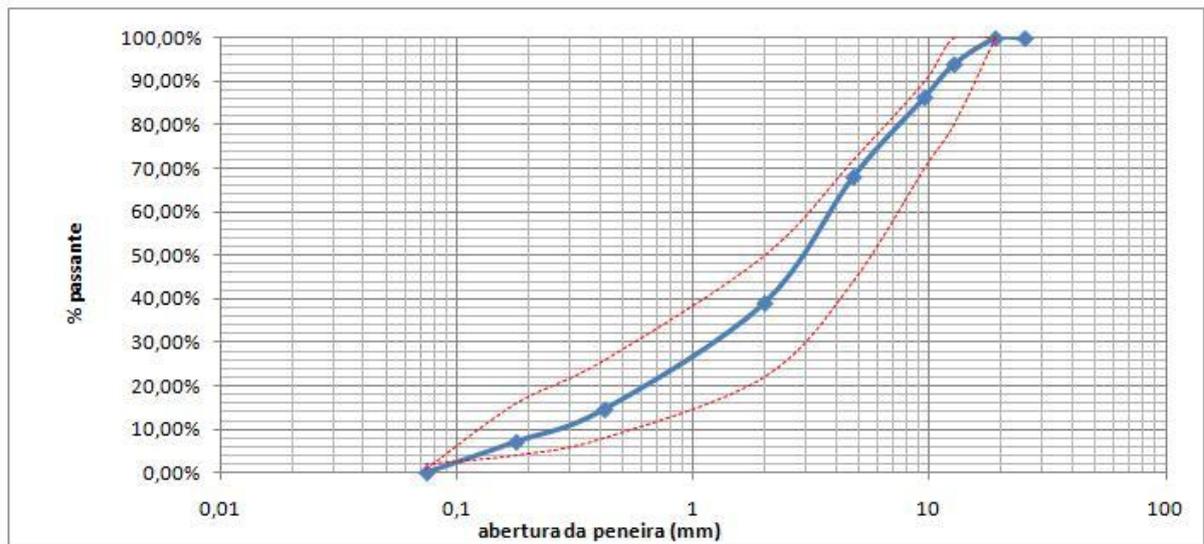


Figura 15: curva granulométrica do agregado da amostra 1A

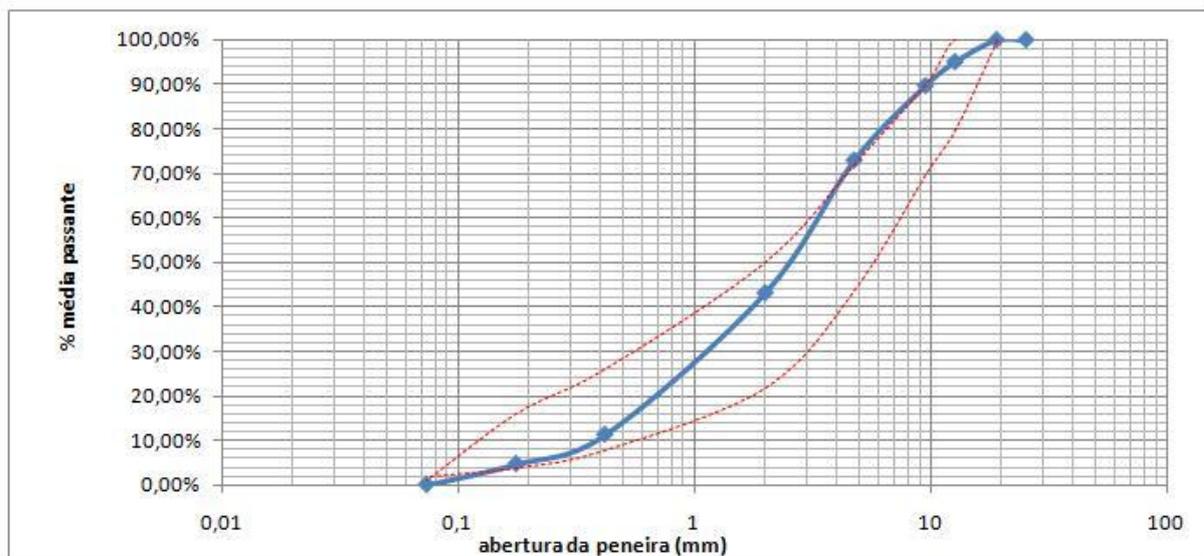


Figura 16: curva granulométrica média dos agregados das amostras 2A e 2B

Os agregados que compunham as duas amostras de material fresado estudadas nessa pesquisa estão dentro de uma variação admissível para faixa de trabalho especificada na norma DNIT ES 031/2006. Pode-se perceber que a curva granulométrica, que representa os agregados da amostra 1, está praticamente dentro dos limites estabelecidos pela faixa C, não houve coerência apenas na peneira nº 200. A faixa C para misturas asfálticas estabelece que deva passar de 1% a 2% de material pela peneira nº 200, tanto para a amostra 1 quanto para a amostra 2 (não houve material passante pela peneira nº 200). Além disso, a amostra 2

apresenta parte da curva sobre o limite superior da faixa C. Visto que não se dispõe dos dados de projeto das misturas, não é possível afirmar se houve ou não a alteração da granulometria dos agregados presentes nas amostras.

6.1.3 Ensaio de compactação: amostra 2

O ensaio de compactação foi realizado apenas com a amostra 2 de material fresado. O ensaio foi realizado sem reutilização de material e seguiu as recomendações da norma DNER-ME 129/94. A energia aplicada para a moldagem dos corpos-de-prova foi a energia intermediária. Sendo assim, o quadro 12 apresenta a relação encontrada para o teor de umidade e o peso específico aparente seco do material. A figura 17 apresenta a mesma relação na forma gráfica.

Teor de Umidade (%)	2,71	3,98	4,82	5,35	5,77	6,04
Peso específico aparente seco (kN/m³)	17,73	17,78	18,26	17,90	17,98	17,95

Quadro 12: ensaio de compactação – material fresado

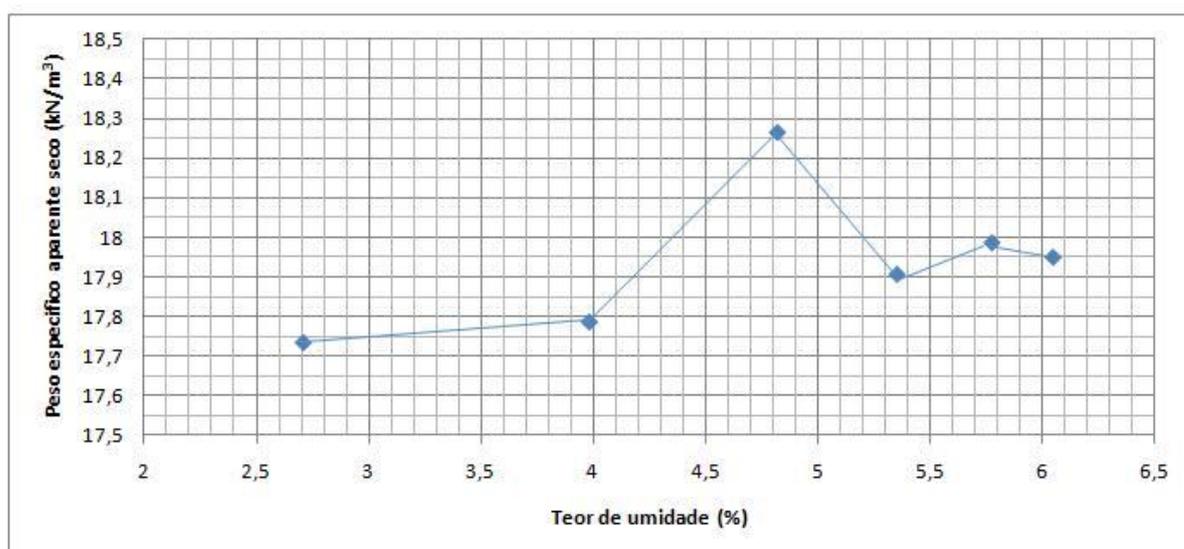


Figura 17: relação gráfica (peso específico aparente seco x teor de umidade) – material fresado

Pode-se perceber que o peso específico aparente seco varia muito pouco em relação ao teor de umidade presente no material. Durante o ensaio pode-se notar que o material apresenta bastante dificuldade para absorver água. Esse fato deve-se a pouca quantidade de material fino presente na amostra, além disso, os agregados encontram-se recobertos por ligante asfáltico, o que dificulta a absorção de água pelo material. O material apresenta um comportamento típico dos materiais granulares ditos abertos, aqueles com insuficiência de material fino, onde não há definição do ramo seco e do ramo úmido na curva de compactação. Sendo assim, pode-se afirmar que a umidade ótima para a compactação do material está em torno de 4,5% a 5%. Assim, o peso específico aparente seco máximo fica em torno de 18,3 kN/m³.

6.1.4 Determinação do ISC: amostra 2

O ensaio para determinação do ISC foi realizado apenas com a amostra 2 e seguiu as recomendações da norma DNER-ME 049/94. A umidade de compactação do material foi de 4,61% e a energia de compactação do corpo-de-prova foi a energia intermediária.

No ensaio de expansão o material apresentou contração de 0,19 mm. O cálculo da expansão em % não foi efetuado devido à ausência de um valor para a altura do corpo-de-prova (não foi medido).

O ensaio de penetração resultou em um valor de ISC de 11% e é apresentado pelo quadro 13 e pela figura 18, respectivamente, o resumo do ensaio e a relação gráfica (pressão calculada x penetração). O valor encontrado para ISC do material fresado pode ser considerado baixo, no entanto, pode ser considerado aceitável se esse material for utilizado em um aterro rodoviário.

Tempo (min)	penetração (pol)	pressão padrão (kg/cm ²)	leitura no extensômetro (mm)	pressão calculada (kg/cm ²)	ISC (%)
0,5	0,025	-	13	2,38	-
1	0,05	-	24	3,65	-
1,5	0,075	-	37	5,15	-
2	0,1	70	53	7,00	10,005
3	0,15	-	74	9,43	-
4	0,2	105	95	11,86	11,294
6	0,3	132	137	16,71	12,662
8	0,4	161	156	18,91	11,746
10	0,5	182	189	22,73	12,486

Quadro 13: determinação do ISC – material fresado

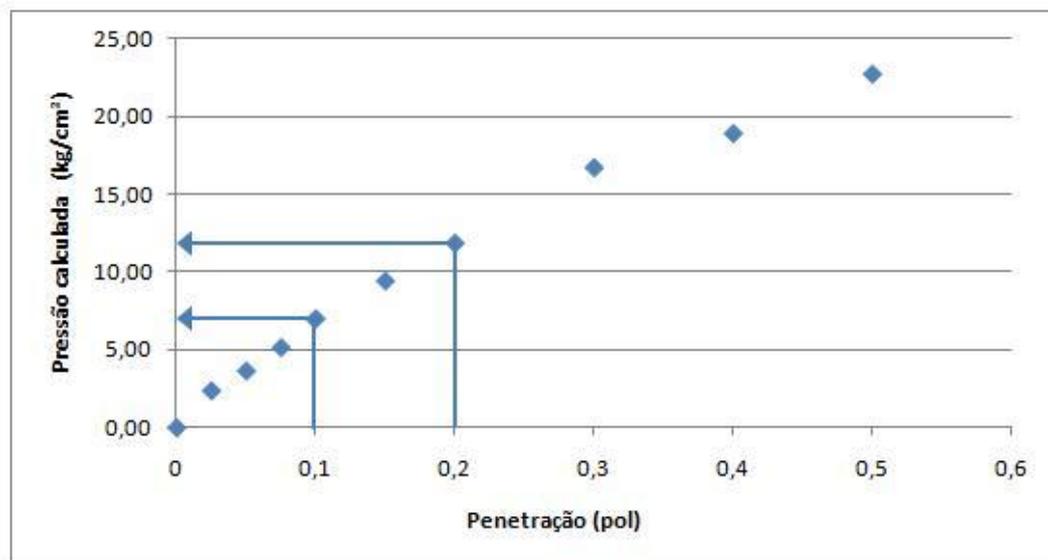


Figura 18: relação gráfica (pressão calculada x penetração) – ensaio de ISC – material fresado

6.1.5 Determinação do módulo de resiliência: amostra 2

O ensaio para determinação do módulo de resiliência foi realizado apenas com a amostra 2 de material fresado e seguiu as recomendações da norma da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (TP46-O4).

Foram realizados três ensaios com a amostra 2 de material fresado. O ensaio 1 e o ensaio 3 são apresentados no final do trabalho na seção Apêndice A. Nesses ensaios o corpo-de-prova não suportou todos os estados de tensões que são aplicados pelo procedimento: no primeiro ensaio o corpo-de-prova rompeu no 9º estado de tensão; no terceiro ensaio o corpo-de-prova rompeu no 6º estado de tensão. A umidade presente no corpo-de-prova do ensaio 2 foi de 5,09% e está próxima a umidade ótima (4,5% a 5%) determinada pelo ensaio de compactação. Além disso, a energia aplicada para a moldagem dos corpos-de-prova, nos três ensaios, foi a energia intermediária.

O ensaio 2 é apresentado pelo quadro 14 e pela figura 19; foi através desse ensaio que determinou-se o comportamento do módulo de resiliência apresentado pelo material fresado. A modelagem dos valores de MR exigiu que os valores encontrados para o MR no 7º, no 10º, no 13º e no 15º estado de tensão fossem ignorados, pois esses valores prejudicavam o modelo obtido.

Analisando o resultado obtido com o ensaio percebe-se que o módulo de resiliência independe do estado de tensão aplicado. O critério adotado para a modelagem desses valores levou em consideração o modelo utilizado pelo programa Everstress 5.0. Sendo assim, a modelagem dos valores de módulo de resiliência apresentados nessa pesquisa é função do parâmetro θ/P_{atm} ($\theta = \sigma_{desvio} + 3*\sigma_{confinante}$); sabe-se que $P_{atm} = 0,101$ MPa. Assim, para o ensaio 2, chegou-se ao seguinte modelo para o módulo de resiliência do material fresado:

$$MR = 105,39 * (\theta/P_{atm})^{0.0718} \quad (\text{fórmula 7})$$

O valor de R^2 apresentado por esse modelo é 0,4609. Pode-se perceber que o valor de R^2 é pequeno, ou seja, o modelo adotado não se ajusta adequadamente ao comportamento apresentado pelo material fresado. Além disso, percebe-se que o valor do MR depende muito pouco do parâmetro (θ/P_{atm}) , já que esse parâmetro está elevado na potência 0,0718. Sendo assim, para a análise mecânica será considerado que o módulo de resiliência do material fresado não varia com o estado de tensão e apresenta o valor fixo de 105 MPa.

Estado de tensão	σ_3 (MPa)	σ_d (kPa)	θ/P_{atm}	MR (MPa)
1	0,021	0,019	0,812	107,311
2	0,021	0,037	0,990	99,093
3	0,021	0,056	1,178	100,288
4	0,035	0,031	1,347	117,086
5	0,035	0,062	1,653	108,95
6	0,035	0,093	1,960	108,128
8	0,069	0,124	3,277	124,601
9	0,069	0,186	3,891	114,822
11	0,103	0,093	3,980	121,074
12	0,103	0,186	4,901	112,596
14	0,138	0,124	5,327	115,231

Quadro 14: resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – ensaio 2

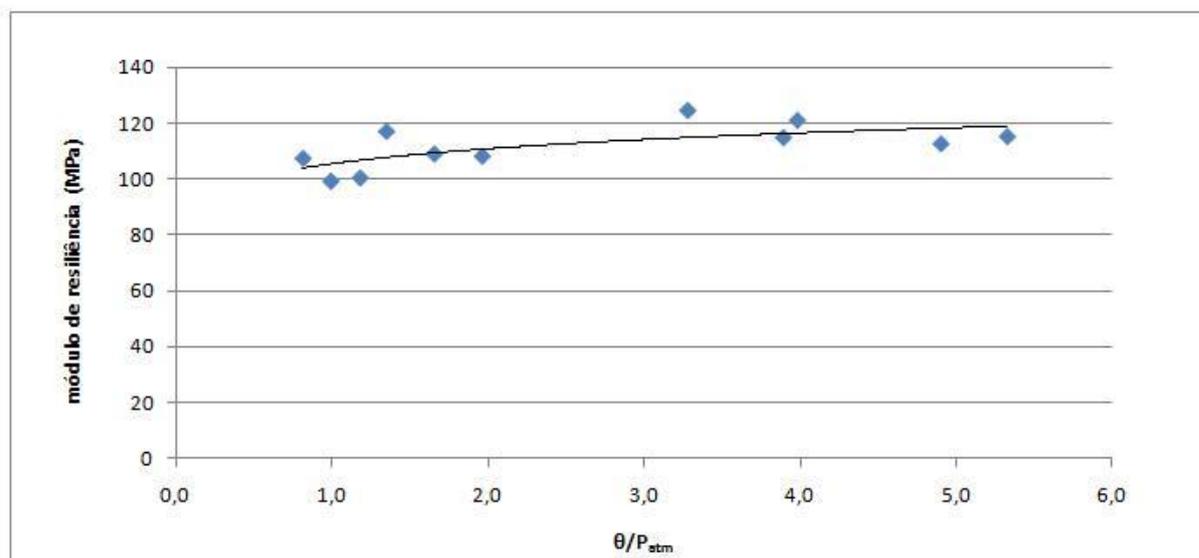


Figura 19: relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – ensaio 2

Os resultados de MR para o material fresado poderiam ter sido modelados por outros modelos. A fórmula 8 apresenta a modelagem dos valores de MR, em função da tensão confinante (σ_3), para os valores apresentados no quadro 14. Esse modelo apresentou $R^2 = 0,5548$, ou seja, esse modelo é capaz de representar de forma mais adequada o comportamento apresentado pelo módulo de resiliência do material fresado se comparado ao modelo expresso na fórmula 7.

$$MR = 140,76 * (\sigma_3)^{0,0765} \quad (\text{fórmula 8})$$

6.2 AREIA

A areia utilizada na pesquisa é proveniente da jazida Gomes do município de Osório – RS. Esse material está sendo utilizado como camada de reforço de subleito, na espessura de 60 cm, entre os km 17 e 19 na pista-sul da BR-290. Para a caracterização e a avaliação do material foram realizados o ensaio de compactação e o ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência.

6.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação seguiu as recomendações da norma DNER-ME 129 e foi realizado empregando a energia intermediária. Além disso, na seção Apêndice B é apresentada a curva de compactação para o material na energia normal. Durante os ensaios houve reutilização do material. O quadro 15 e a figura 20 apresentam a relação umidade x peso específico aparente seco. A umidade ótima obtida no ensaio foi de aproximadamente 14% onde o peso específico aparente seco atinge valores da ordem de 16,6 kN/m³.

Teor de Umidade (%)	8,07	9,61	11,12	12,63	13,86	15,94	17,00
Peso específico aparente seco (kN/m³)	15,67	16,27	16,41	16,31	16,58	16,28	16,34

Quadro 15: ensaio de compactação – areia – energia intermediária

Pode-se perceber que o peso específico aparente seco apresenta pequena variação em relação à umidade do material. Durante o ensaio percebeu-se que o método utilizado para a compactação do material (compactação dinâmica pela queda de um soquete) pode não ser o mais correto. Pôde-se perceber que o material não absorvia completamente a energia de queda

do soquete. Assim, toda vez que o soquete atingia a camada a ser compactada parte da camada afundava enquanto que o resto da camada sofria o processo inverso.

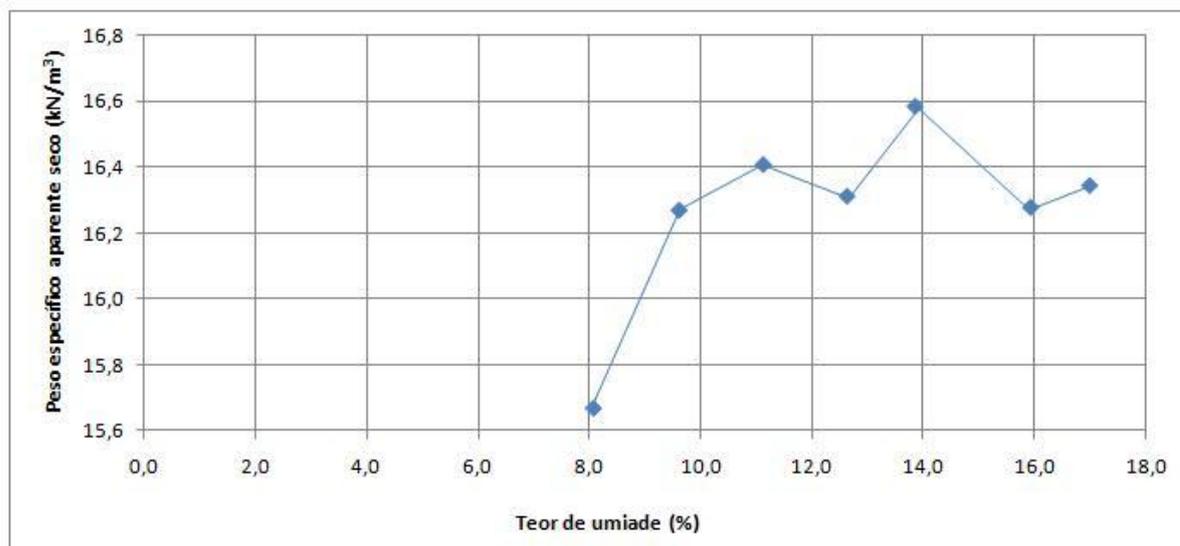


Figura 20: relação gráfica (peso específico aparente seco x teor de umidade) – areia – energia intermediária

6.2.2 Determinação do módulo de resiliência

O ensaio para determinação do módulo de resiliência da areia, utilizada para comparação com o material fresado, seguiu as recomendações da norma da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (TP46-O4). Dois corpos-de-prova foram moldados aplicando a energia intermediária de compactação. O ensaio 1 não resultou em dados numéricos para essa pesquisa, uma vez que o corpo-de-prova acumulou deformações permanentes excessivas ao longo da etapa de condicionamento. Acredita-se que a última camada do corpo-de-prova estava com material fofo. Conforme foi comentado na seção anterior o método de compactação adotado pode não ser o mais correto para esse tipo de material. A umidade de compactação do primeiro ensaio foi de 13,69%. Esse valor está próximo a umidade ótima de compactação (em torno de 14%) obtida pelo ensaio de compactação.

O ensaio 2 é apresentado pelo quadro 16 e pela figura 21. Através dele foi determinado o comportamento do módulo de resiliência apresentado pela areia. Para realização desse ensaio,

a última camada do corpo-de-prova, além de sofrer a compactação dinâmica, teve a sua parte superior adensada por compactação manual. Assim, acredita-se que foram diminuídos os efeitos provocados pela má compactação dessa camada, uma vez que a má compactação dessa camada possa ter comprometido o ensaio 1. A umidade de compactação para o ensaio 2 foi de 10,05%. A adoção desse valor de umidade não seguiu critérios técnicos, optou-se por reduzir a umidade de compactação do material no ensaio 2 pois não se sabia o que provou a falha do ensaio 1. Assim, julgou-se coerente a realização de um ensaio com um valor de umidade diferente do ensaio 1, pois a umidade poderia ter prejudicado o ensaio 1. Sendo assim, pode-se afirmar que além de avaliar o método de compactação é importante avaliar a influência da umidade no comportamento do MR desse material.

Estado de tensão	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	θ/P_{atm}	MR (MPa)
1	0,021	0,019	0,812	66,127
2	0,021	0,037	0,990	71,315
3	0,021	0,056	1,178	71,759
4	0,035	0,031	1,347	98,488
5	0,035	0,062	1,653	102,413
6	0,035	0,093	1,960	98,225
7	0,069	0,062	2,663	157,943
8	0,069	0,124	3,277	160,282
9	0,069	0,186	3,891	153,547
10	0,103	0,062	3,673	202,603
11	0,103	0,093	3,980	201,649
12	0,103	0,186	4,901	211,636
13	0,138	0,093	5,020	245,29
14	0,138	0,124	5,327	253,217
15	0,138	0,248	6,554	267,985

Quadro 16: resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – areia

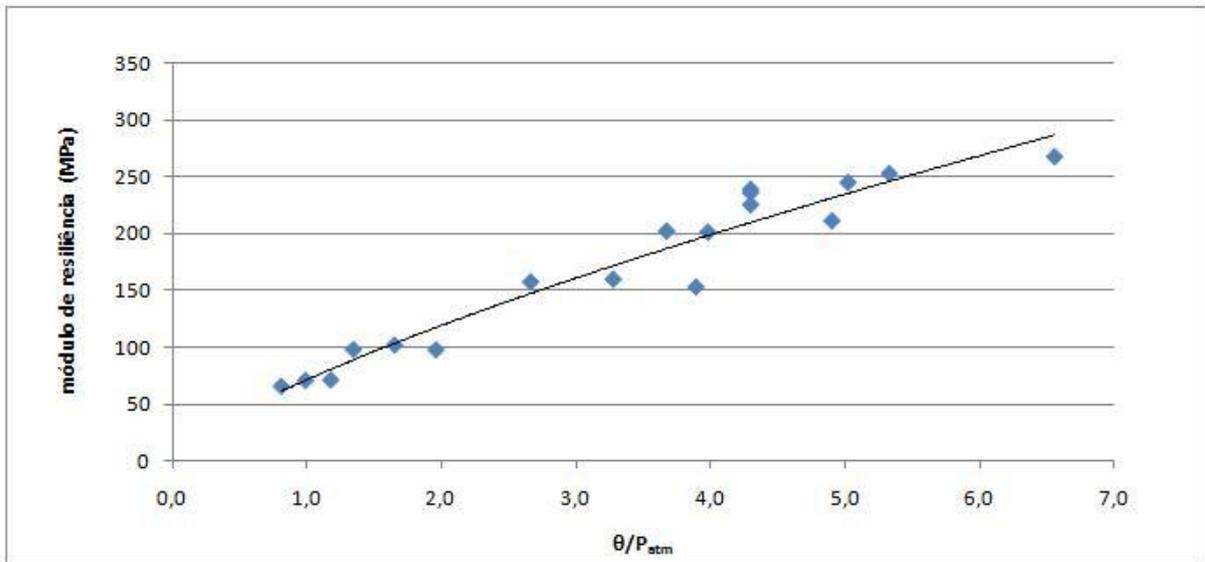


Figura 21: relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – areia

Analisando o resultado obtido com o ensaio percebe-se que o módulo de resiliência depende do estado de tensão aplicado sobre o material. O critério adotado para a modelagem desses valores foi o mesmo critério adotado para o material fresado no qual o módulo de resiliência é função do parâmetro (θ/P_{atm}). Sendo assim o modelo obtido para o comportamento do módulo de resiliência da areia é:

$$MR = 71,457 * (\theta/P_{atm})^{0,7142} \quad (\text{fórmula 9})$$

O valor de R^2 apresentado por esse modelo é 0,959. Dessa forma, esse modelo foi utilizado para representar o comportamento da areia na estrutura do pavimento. Assim, esse modelo foi utilizado como dado de entrada para as análises mecânicas.

Além disso, a fórmula 10 apresenta a modelagem dos valores de MR, em função da tensão confinante (σ_3), para os valores apresentados no quadro 16. Esse modelo apresentou $R^2 = 0,9964$, ou seja, esse modelo é capaz de representar de forma mais adequada o comportamento apresentado pelo módulo de resiliência da areia se comparado ao modelo expresso na fórmula 9.

$$MR = 981,77 * (\sigma_3)^{0.6842} \quad (\text{fórmula 10})$$

6.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS

Nessa pesquisa foram analisadas apenas duas estruturas de pavimentos. A análise 1 é referente a estrutura do pavimento que está sendo executada entre os km 17 e 19 da pista sul da BR-290. A análise 2 propõem a substituição integral da camada de areia por material fresado mantendo as demais camadas inalteradas. Assim a análise 2 é referente ao pavimento ilustrado pela figura 22.

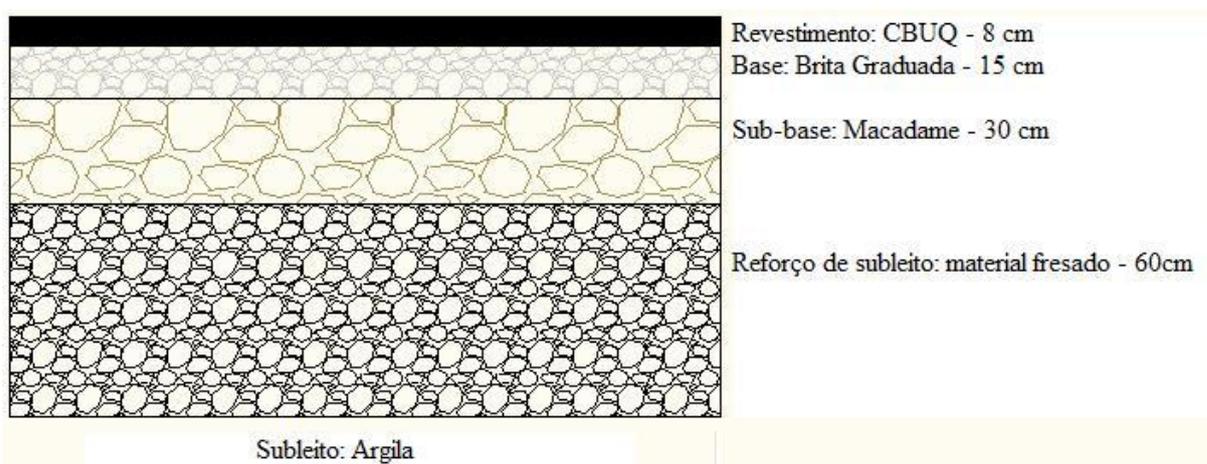


Figura 22: estrutura alternativa – pavimento analisado empregando material fresado

Os dados de projeto foram obtidos a partir da sugestão do projetista da estrutura original – o Professor Washington Peres Núñez – que é o orientador dessa pesquisa –. Além disso, a camada de reforço de subleito será avaliada a partir da adoção dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxial de módulo de resiliência para cada material. Sendo assim, o quadro 17 apresenta um resumo com dados de projeto utilizados nas duas análises mecânicas.

Camada	Estrutura original		Estrutura com fresado		Espessura (cm)
	Material da camada	MR ou modelo (Mpa)	Material da camada	MR ou modelo (Mpa)	
revestimento	CBUQ	5000	CBUQ	5000	8
base	brita graduada	$MR = 180 * (\theta / P_{atm})^{0,6}$	brita graduada	$MR = 180 * (\theta / P_{atm})^{0,6}$	15
sub-base	macadame	250	macadame	250	30
reforço de subleito	areia	$MR = 71,457 * (\theta / P_{atm})^{0,7142}$	material fresado	105	60
subleito	argila	100	argila	100	-

Quadro 17: estruturas analisadas

Foram escolhidos 5 pontos ao longo da estrutura para que fossem avaliadas as tensões e os deslocamentos que estavam solicitando pavimento. Dessa forma foi analisado:

- a) o topo do revestimento ($z = 0$ cm);
- b) a fibra inferior do revestimento ($z = 7,999$ cm);
- c) o topo da camada de reforço de subleito ($z = 53,001$ cm);
- d) o meio da camada de reforço de subleito ($z = 83,000$ cm);
- e) o topo da camada de subleito ($z = 113,001$ cm).

Os quadros 18 e 19 resumem as principais solicitações impostas às duas estruturas analisadas.

Analisando as principais solicitações atuantes na estrutura percebe-se que tensão de tração atuante na fibra inferior da camada asfáltica é menor quando se utiliza o material fresado na camada de reforço de subleito. Os valores encontrados para essa solicitação foram: 1,41 MPa para a estrutura original e 1,37 MPa para a estrutura alternativa com material fresado. Além disso, as tensões de compressão que atingem a camada de reforço de subleito estão dentro dos limites aceitáveis para esse esforço em ambas as estruturas. A camada de subleito não sofre tensões de compressão em nenhuma das situações. Ademais, a utilização de material fresado reduziu as deflexões impostas a estruturas e a deformação de extensão crítica na fibra inferior do revestimento asfáltico que na estrutura original foi de 0,228 mm e na estrutura alternativa com material fresado foi de 0,222 mm.

Os relatórios das análises mecânicas, que o *software* gera, são apresentados no final do trabalho na seção Apêndice C.

Posição	Solicitações avaliadas			
	Tipo	Valor numérico	Tipo	Valor numérico
z = 0	-	-	Deflexão (10 ⁻² mm)	47,6
z = 7,999	Tensão de tração	1,41 Mpa		47,6
z = 53,001	Tensão normal	0,022 MPa		32,1
z = 83,000	Tensão normal	0,013 MPa		20,8
z = 113,001	Tensão normal	0		0

Quadro 18: principais solicitações atuantes na estrutura original

Posição	Solicitações avaliadas			
	Tipo	Valor numérico	Tipo	Valor numérico
z = 0	-	-	Deflexão (10 ⁻² mm)	39,7
z = 7,999	Tensão de tração	1,37 MPa		39,8
z = 53,001	Tensão normal	0,031 MPa		24,4
z = 83,000	Tensão normal	0,015 MPa		17,6
z = 113,001	Tensão normal	0		0

Quadro 19: principais solicitações atuantes na estrutura alternativa com material fresado

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise granulométrica do material fresado mostrou que a fresagem do pavimento da BR-290 produziu um material com boa distribuição granulométrica, mas com pequena quantidade de material fino. O material retido na peneira número 200 foi de 0,39% para a amostra 1 e de 0,04% para a amostra 2. O material fino encontra-se misturado ao ligante asfáltico que recobre o agregado da mistura. A amostra 1 apresentou 13,14% de massa retida na peneira 1” enquanto que a amostra 2 apresentou apenas 1,63% de massa retida na mesma peneira. Não foi possível aferir qual o motivo que provocou essa diferença granulométrica nas amostras. A composição granulométrica de um material asfáltico fresado depende de fatores que não foram considerados nessa pesquisa (temperatura de fresagem, projeto da mistura asfáltica fresada, estado dos dentes de corte durante a operação, etc.)

A determinação do teor de ligante presente em cada amostra apontou valores coerentes com o esperado para misturas asfálticas convencionais (5,60% para a amostra 1 e 4,69% para a amostra 2). Ainda, a análise granulométrica dos agregados que compunham cada amostra mostrou que o processo de fresagem não provocou alterações significativas nas dimensões dos agregados de cada amostra. As curvas granulométricas dos agregados das duas amostras encontram-se dentro de uma variação admissível, visto que elas ficaram dentro da faixa C (faixa utilizada para o projeto dessas misturas asfálticas) especificada pela norma DNIT ES 031/2006.

O ensaio de compactação e o ensaio para determinação do ISC do material fresado mostraram que esse material apresenta um comportamento típico de materiais granulares abertos aqueles que apresentam insuficiência de material fino. Na curva de compactação não ficaram claramente definidos o ramo seco e o ramo úmido. Sendo assim, o peso específico aparente seco do fresado atinge valores máximos quando a umidade desse material fica em torno de 4,5% a 5%. O valor máximo encontrado para o peso específico aparente seco do material fresado foi $18,26 \text{ kN/m}^3$ com 4,82% de umidade. No ensaio de expansão o material fresado apresentou contração de 0,19 mm e no ensaio de penetração o valor de ISC encontrado foi de 11%. O ISC encontrado para o material fresado é baixo, no entanto é satisfatório já que se trata de um material utilizado em camada para aterro rodoviário.

Os ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência mostraram que o material fresado apresenta comportamento atípico, uma vez que o valor do MR não sofre alteração com o estado de tensão que solicita o material. Dessa forma não foi possível obter um modelo satisfatório para o comportamento do módulo de resiliência do material fresado. Sendo assim, pode-se afirmar que o valor de MR para esse material está em torno de 100 MPa, quando a umidade do corpo-de-prova estava em 5,09%. Para valores de umidade abaixo da umidade ótima o material fresado não suportou todos os estados de tensões que são aplicados pelo ensaio.

O ensaio de compactação realizado com a areia mostrou que o material não apresenta curva da compactação com ramo seco e ramo úmido bem definidos. Sendo assim a umidade ótima de trabalho obtida foi em torno de 14%. O valor máximo obtido para o peso específico aparente seco da areia foi de 16,58 kN/m³ quando a umidade do material atingiu 13,86%. Deve-se salientar que o método utilizado para compactação da areia (compactação dinâmica pela queda de uma massa definida) deve ser revista. O material apresentou dificuldade para absorver a energia transmitida pela compactação. Enquanto a queda do soquete compactava o material que estava em contato com a ponta do soquete, o material ao seu redor perdia compactação.

Para a areia estudada foram realizados dois ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência. O ensaio 1 não acrescentou dados numéricos a essa pesquisa, uma vez que o corpo-de-prova apresentou deformações permanentes excessivas na etapa de condicionamento do ensaio. Não se sabe qual a causa desse problema, então duas possibilidades foram levantadas: primeiro, o método de compactação pode ter ocasionado tal falha; segundo o teor de umidade do material. Percebeu-se que a última camada do corpo-de-prova poderia estar com material fofo. Nesse ensaio a umidade do material foi de 13,41%, próximo a umidade ótima. Para o ensaio 2 optou-se por reduzir a umidade do material e o ensaio foi realizado na umidade de 10,23%. Além disso, a última camada do corpo-de-prova, além de sofrer a compactação dinâmica, sofreu adensamento manual. Dessa forma conseguiu-se realizar o ensaio e obter um modelo de comportamento para o módulo de resiliência do material. Esse modelo é: $MR = 71,457 * (\theta/P_{atm})^{0.7142}$ com $R^2 = 0,959$.

Comparando os ensaios de MR da areia e do material fresado (na umidade de 5,09%) pode-se perceber que para os menores valores de estado de tensão o material fresado apresenta valores

superiores de MR do que a areia. Para os estados de tensões maiores a areia apresentou valores de MR superiores ao material fresado. Como o estado de tensão que age sobre a camada reforço de subleito é bem pequeno, o material fresado pode apresentar comportamento similar a areia ao longo dessa camada.

As análises mecânica mostraram que o material fresado quando utilizado como material de reforço de subleito é capaz de apresentar desempenho satisfatório. As análises realizadas mostraram que esse material apresenta um comportamento bastante similar ao material que vem sendo utilizado ao longo dessa camada nos serviços de ampliação da BR-290. Assim, a substituição de um agregado natural pelo material fresado mostra-se tecnicamente viável além de ser uma atitude ambientalmente correta.

Trabalhos futuros poderiam avaliar o comportamento do módulo de resiliência do material asfáltico fresado a partir da adição de agregados virgens ao fresado asfáltico e até mesmo a partir da adição de resíduos de outros processos industriais. Assim, poderia ser avaliada a adição de cinza pesada ao material fresado, já que o material fresado apresenta pequena quantidade de material fino.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 049**: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ME 129**: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **DNER-ES 303**: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviário**. Rio de Janeiro, 1997.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031-ES**: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio**: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FRANCO, M. L. O. **Estudo do efeito de intervenções sobre o comportamento de pavimentos de um grupo de rodovias do estado do Paraná**. 2004. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MALYSZ, R. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2005.

PAULIFRESA FRESAGEM E RECICLAGEM LTDA. **Paulifresa executou serviço de microfresagem no Autódromo de Interlagos.** Jaguari/SP: 2007.

TREICHEL. D. S. **Estrutura de revestimento asfáltico de um pavimento rodoviário:** otimização com base em ensaios laboratoriais. 2009. 64 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WASHINGTON STATE, Department of Transportation. **Everseries Pavement Programs**, versão 5: Washington State. Conjunto de programas para análises diversas em pavimentos, desde análises mecánísticas até retroanálises. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/apps/epg.htm>>. Acesso em junho 2010.

APÊNDICE A – Resultado do ensaio triaxial para determinação do módulo de resiliência – material fresado: ensaios 1 e 3

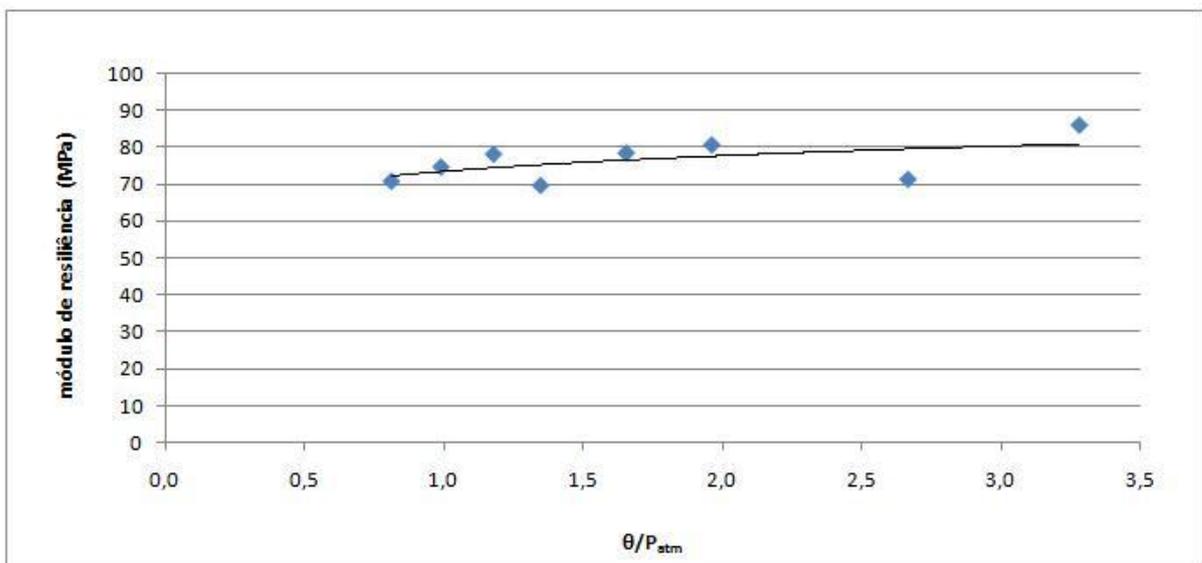
ENSAIO TRIAXIAL PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA – MATERIAL FRESADO: ENSAIO 1

Energia aplicada para moldagem do corpo-de-prova: energia intermediária

Umidade do corpo-de-prova: 2,6%

Estado de tensão	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	θ/P_{atm}	MR (MPa)
1	0,021	0,019	0,812	70,94
2	0,021	0,037	0,990	74,771
3	0,021	0,056	1,178	78,245
4	0,035	0,031	1,347	69,803
5	0,035	0,062	1,653	78,529
6	0,035	0,093	1,960	80,731
7	0,069	0,062	2,663	71,466
8	0,069	0,124	3,277	86,07

Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – ensaio 1



Relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – ensaio 1

Modelagem dos valores de módulo de resiliência: $MR = 73,424 * (\theta/P_{atm})^{0,0811}$, $R^2 = 0,2886$

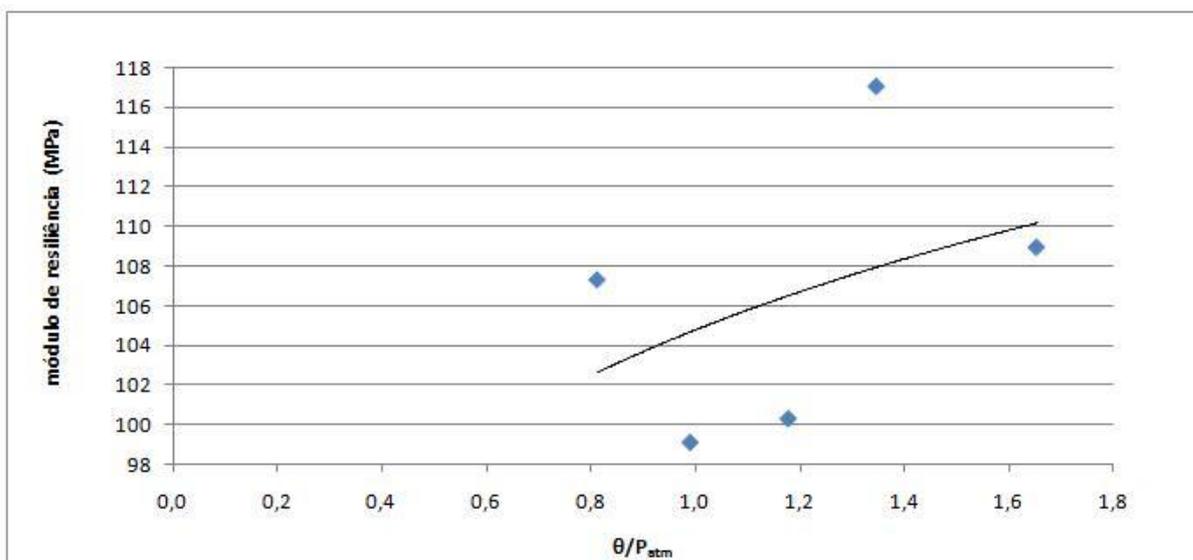
ENSAIO TRIAXIAL PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA – MATERIAL FRESADO: ENSAIO 3

Energia aplicada para moldagem do corpo-de-prova: energia intermediária

Umidade do corpo-de-prova: 3,82%

Estado de tensão	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	θ/P_{atm}	MR (MPa)
1	0,021	0,019	0,812	107,311
2	0,021	0,037	0,990	99,093
3	0,021	0,056	1,178	100,288
4	0,035	0,031	1,347	117,086
5	0,035	0,062	1,653	108,95

Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência – ensaio 3



Relação gráfica (módulo de resiliência x θ/P_{atm}) – ensaio 3

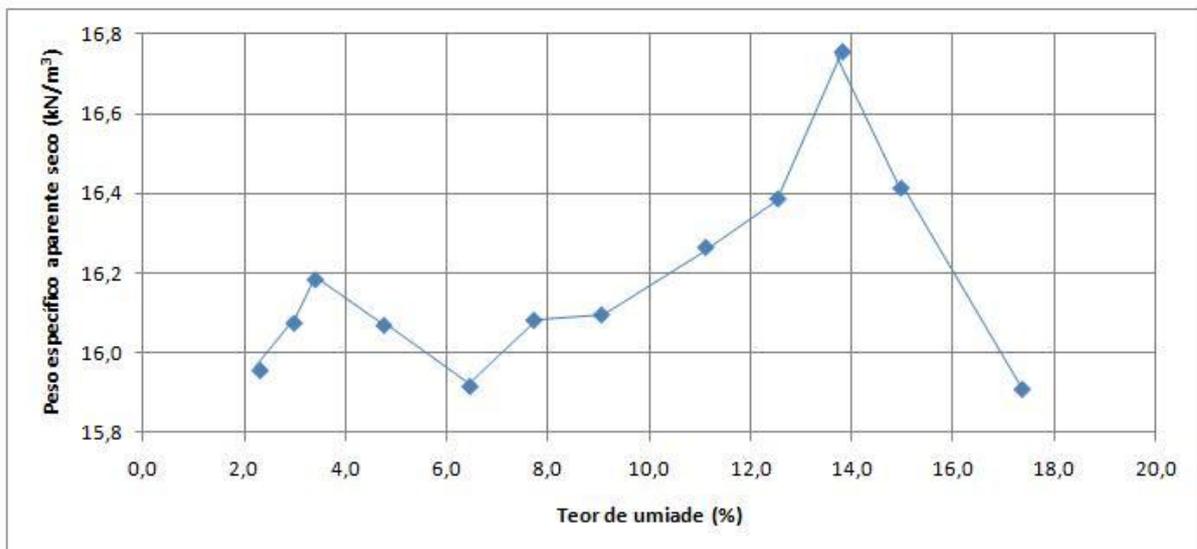
Modelagem dos valores de módulo de resiliência: $MR = 104,78 * (\theta/P_{atm})^{0,0997}$, $R^2 = 0,1629$

**APÊNDICE B – Resultado do ensaio de compactação – areia: energia
normal**

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO: AREIA – ENERGIA NORMAL

Teor de umidade (%)	Peso específico aparente seco (kN/m^3)
2,29	15,96
2,97	16,07
3,39	16,18
4,75	16,07
6,45	15,92
7,71	16,08
9,05	16,10
11,11	16,26
12,54	16,39
13,82	16,76
14,98	16,41
17,38	15,91

Ensaio de compactação – areia – energia normal



Relação gráfica (peso específico aparente seco x teor de umidade) – areia – energia normal

**APÊNDICE C – Resultados das análises mecânicas – programa
Everstress 5.0**

RELATÓRIO COMPUTACIONAL (EVERSTRESS 5.0)

Análise Mecânica: estrutura original

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: ARELA							
No of Layers: 5		No of Loads: 2		No of X-Y Evaluation Points: 2			
Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power	
1	30	8.000	5000.00				
2	35	15.000	250.00	238.49	180.00	.600	
3	35	30.000	250.00				
4	35	60.000	150.00	45.17	71.46	.714	
5	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		
No of Iteration: 6			Maximum Error in Modulus: 6.3				
Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Szx (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1587.47	-1915.90	-560.00	.00	.00	.00
7.999	1	1108.31	1414.61	-197.53	.00	20.81	.00
53.001	4	-.48	.77	-21.16	.00	3.08	.00
83.000	4	-.98	-.62	-12.87	.00	1.25	.00
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Emm (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-168.94	-254.33	98.20	15.171	.000	470.251
7.999	1	148.64	228.28	-190.88	-10.393	.000	466.277
53.001	4	147.31	184.76	-470.64	-24.200	.000	311.527
83.000	4	82.91	93.59	-272.61	-13.144	.000	204.338
113.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000
Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1915.90	-1587.47	-560.00	-254.33	-168.94	98.20
7.999	1	-197.87	1108.64	1414.61	-190.97	148.72	228.28
53.001	4	-21.61	-.03	.77	-484.04	160.71	184.76
83.000	4	-13.00	-.85	-.62	-276.52	86.82	93.59
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Szx (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-476.97	-1414.42	.00	.00	.00	.00
7.999	1	149.81	1110.99	-159.11	.00	.00	.00
53.001	4	.01	.88	-22.59	.00	.00	.00
83.000	4	-.82	-.61	-13.36	.00	.00	.00
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-10.53	-254.27	113.48	.000	.000	476.088
7.999	1	-27.15	222.76	-107.47	.000	.000	476.618
53.001	4	168.48	194.42	-507.06	.000	.000	321.654
83.000	4	90.03	96.32	-284.63	.000	.000	208.003
113.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1414.42	-476.97	.00	-254.27	-10.53	113.48
7.999	1	-159.11	149.81	1110.99	-107.47	-27.15	222.76
53.001	4	-22.59	.01	.88	-507.06	168.48	194.42
83.000	4	-13.36	-.82	-.61	-284.63	90.03	96.32
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Análise Mecânica: estrutura alternativa (com material fresado na camada de reforço de subleito)

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: Fresado							
No of Layers: 5		No of Loads: 2			No of X-Y Evaluation Points: 2		
Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power	
1	30	8.000	5000.00				
2	35	15.000	250.00	246.73	180.00	600	
3	35	30.000	250.00				
4	35	60.000	105.00				
5	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		
No of Iteration: 3			Maximum Error in Modulus: 0				
Location No: 1		X-Position (cm): .000			Y-Position (cm): .000		
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	S _{xx} (kPa)	S _{yy} (kPa)	S _{zz} (kPa)	S _{yz} (kPa)	S _{zx} (kPa)	S _{xy} (kPa)
.000	1	-1512.69	-1832.03	-560.00	.00	.00	.00
7.999	1	1072.16	1371.46	-201.55	.00	19.07	.00
53.001	4	1.00	3.11	-29.39	.00	5.25	.00
83.000	4	1.16	1.76	-15.21	.00	2.12	.00
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
.000	1	-159.02	-242.04	88.68	13.642	.000	393.963
7.999	1	144.24	222.05	-186.93	-9.759	.000	389.766
53.001	4	97.08	124.28	-293.57	-16.071	.000	236.978
83.000	4	55.92	63.59	-154.62	-8.892	.000	173.081
113.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1832.03	-1512.69	-560.00	-242.04	-159.02	88.68
7.999	1	-201.84	1072.45	1371.46	-187.00	144.31	222.05
53.001	4	-30.27	1.88	3.11	-304.88	108.39	124.28
83.000	4	-15.48	1.43	1.76	-158.08	59.38	63.59
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Szx (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-400.12	-1327.46	.00	.00	.00	.00
7.999	1	116.68	1067.56	-161.75	.00	.00	.00
53.001	4	1.81	3.29	-31.80	.00	.00	.00
83.000	4	1.46	1.81	-15.94	.00	.00	.00
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Emm (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-.38	-241.49	103.65	.000	.000	397.732
7.999	1	-31.01	216.22	-103.40	.000	.000	398.037
53.001	4	112.27	131.31	-319.87	.000	.000	244.580
83.000	4	60.99	65.55	-162.73	.000	.000	176.112
113.001	5	.00	.00	.00	.000	.000	.000

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1327.46	-400.12	.00	-241.49	-.38	103.65
7.999	1	-161.75	116.68	1067.56	-103.40	-31.01	216.22
53.001	4	-31.80	1.81	3.29	-319.87	112.27	131.31
83.000	4	-15.94	1.46	1.81	-162.73	60.99	65.55
113.001	5	.00	.00	.00	.00	.00	.00