UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

Curso de Graduação em Engenharia Civil

CARLOS FILIPE SANTOS CORREIA E SILVA

REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DOS SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO ASFÁLTICA COMO MATERIAL ALTERNATIVO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Ijuí/RS

2012

CARLOS FILIPE SANTOS CORREIA E SILVA

REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DOS SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO ASFÁLTICA COMO MATERIAL ALTERNATIVO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. José Antônio Santana Echeverria, Mestre

Ijuí/RS

2012

CARLOS FILIPE SANTOS CORREIA E SILVA

REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DOS SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO ASFÁLTICA COMO MATERIAL ALTERNATIVO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora

Banca examinadora

_____

Prof. José Antônio Santana Echeverria, Mestre - Orientador

_____

Prof. Carlos Alberto Simões Pires Wayhs, Mestre

Ijuí, 11 de Dezembro de 2012

*Trabadjo ly e dedycado pa nhas pays, **mama** ku **papa**. Nha txon na strada dy byda .*

AGRADECIMENTOS

Ao professor, amigo e orientador deste trabalho, José A. S. Echeverria, que com os seus “rabiscos” e “explica mais” foi lapidando este TCC. E que com os seus 400.000 vocábulos me ensinou a ser um *talenteux.*

Ao professor Luciano P. Specht, pela amizade e pela mestria com que me apresentou ao mundo da geotécnica.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil, Luiz Donato e Felipe Demari , pelo apoio durante os ensaios de laboratório, em especial ao Felipe por sempre gritar: “Força” no último golpe.

Ao Sr. Gederson (Prefeito do Município de Bozano), ao Sr. Firmo e aos engenheiros: Ricardo Simas Dutra, Leonardo Nunes Holderbraum, Nelson Viana e Fabiano Fabri Secchi, pelo apoio durante a execução da pista experimental.

A TODOS os professores e funcionários do Curso de Engenharia Civil, pela amizade e pelas “conversas” nas salas de aula e nos corredores.

A TODOS os colegas do grupo PET (2008 a 2012), pelas várias horas de conversa e descontração.

A TODOS os colegas, de Cálculo I a Projetos Integrados, pela amizade e companheirismo durante o curso.

A TODOS os amigos e familiares que me apoiaram, quer de perto quer de longe, ao longo desta jornada.

“In the midst of winter, I finally learned that there was in me an invincible summer.”

-Albert Camus

RESUMO

Uma técnica de restauração de pavimentos, bastante empregada atualmente, é a fresagem do revestimento asfáltico e recomposição com um novo revestimento. Na operação de fresagem é gerado um grande volume de resíduo, material fresado, que normalmente é descartado em bota-fora. Face ao desafio moderno de dar um destino ecologicamente correto para os resíduos, este trabalho apresenta uma solução para a reutilização do material fresado em camadas granulares de pavimentos flexíveis. Os ensaios de caracterização mostram que a granulometria do fresado não se enquadra nas faixas de estabilização granulométrica, carecendo de finos. Apesar de apresentar certa degradação durante o ensaio de compactação Proctor o material fresado tem um índice de suporte califórnia maior do que 20%, para a energia modificada. Para corrigir a deficiência de finos o material fresado foi misturado com pó-de-pedra em dois teores diferentes (30% e 70%). As misturas apresentaram melhoras no comportamento mecânico, alcançando massas específicas maiores que o fresado e também índices de suporte califórnia maiores. Também é relatado a execução de uma pista experimental numa rua lateral a BR-285 na cidade de Bozano, utilizando material fresado estabilizado granulometricamente com a adição de pó-de-pedra, como material de base de pavimento. Além dos processos executivos são apresentados levantamentos defletométricos que permitem concluir que simultaneamente a um descarte adequado a utilização do material fresado na camada de base é uma ótima solução para pavimentos de baixo volume de tráfego.

Palavras-chave:

material fresado; pista experimental; pavimento baixo custo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resposta mecânica de um pavimento 15
Figura 2: Corte transversal de um pavimento flexível 16
Figura 3: Estados físicos de misturas granulométricas 18
Figura 4: Fresadora de pequeno porte 24
Figura 5: Fresadora de médio porte 24
Figura 6: Fresadora de grande porte 24
Figura 7: Sentido de giro do cilindro 25
Figura 8: Operação de fresagem de um equipamento de grande porte 26
Figura 9: Curvas granulométricas do material fresado 27
Figura 10: Local de coleta do material fresado 30
Figura 11: Fresagem da BR-158, km 196 + 800 30
Figura 12: Secagem ao ar do fresado 31
Figura 13: *Rotarex* 33
Figura 14: Determinação da massa específica dos grãos e absorção 34
Figura 15: Determinação da densidade real do agregado miúdo 35
Figura 16: Aspecto da granulometria padrão adotada, antes da compactação 37
Figura 17: Corpos-de-prova imersos no tanque 38
Figura 18: Penetração do corpo-de-prova 39
Figura 19: Seção esquemática do pavimento 39
Figura 20: Localização da pista experimental 40
Figura 21: Situação da rua lateral antes da construção da pista 40
Figura 22: Pilha do material fresado no pátio da prefeitura 41
Figura 23: Tela do aplicativo RETROANALISE 43
Figura 24: Curva granulométrica dos materiais 45
Figura 25: Curva granulométrica do MF com e sem ligante 46
Figura 26: MF antes (a) e após (b) da compactação na energia intermediária 49
Figura 27: Curvas granulométricas após o ensaio de IDP 49
Figura 28: Curvas de compactação do MF 50
Figura 29: *Bleeding* na compactação do MF 51
Figura 30: Curvas de compactação (energia modificada) do PDP e das misturas 52
Figura 31: Espirro do material fino 53

Figura 32: ISC do MF *versus* ρ_d 54
Figura 33: ISC das misturas *versus* w 55
Figura 34: Curva granulométrica do solo de subleito 56
Figura 35: Curva de compactação (energia normal) do solo..... 57
Figura 36: Curvas granulométricas 58
Figura 37: Curvas de compactação dos fresados e das misturas (energia intermediária) 59
Figura 38 - 1 a 24: Relatório fotográfico da execução e controle tecnológico..... 61
Figura 39: Levantamentos Defletométricos 65
Figura 40: Módulos retroanalisados *versus* estacas..... 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros para Base e Sub-base estabilizadas granulometricamente..... 19
Tabela 2: Faixas granulométricas para material estabilizado granulometricamente..... 32
Tabela 3: Percentagens passantes médias de cada material 44
Tabela 4: Resultados da extração de betume..... 45
Tabela 5: Granulometria das amostras do MF sem ligante 46
Tabela 6: Massas específicas e absorção dos materiais 47
Tabela 7: Resultados do ensaio de IDP para a energia intermediária 48
Tabela 8: Resultados do ensaio de IDP para a energia modificada..... 48
Tabela 9: Resultados do ensaio de compactação Proctor para o MF 50
Tabela 10: Resultados do ensaio de compactação (energia modificada) 52
Tabela 11: Resultados médios do ensaio de ISC para o MF..... 54
Tabela 12: Resultados médios do ensaio de ISC para as misturas 55
Tabela 13: Propriedades físicas do solo de subleito 56
Tabela 14: Percentagens passantes médias..... 58
Tabela 15: Resultados do ensaio de compactação (energia intermediária) 59
Tabela 16: Resultados do ensaio de frasco de areia..... 60
Tabela 17: Bacias de deflexão levantadas com a viga Benkelman..... 66
Tabela 18: Módulos retroanalisados 68

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

%n – percentagem da massa da fração n

30MF/70PDP – Mistura de 30% de material fresado com 70% de Pó-de-pedra

70MF/30PDP – Mistura de 70% de material fresado com 30% de Pó-de-pedra

70MFB/30PDP – Mistura de 70% de material fresado Bozano com 30% de Pó-de-pedra

a – absorção de água

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – *Califórnia Bearing Ratio*

CM-30 – asfalto diluído de cura média

CNT – Confederação Nacional de Trânsito

D – diferença percentual

D_0 – deflexão real ou verdadeira

D_n – deflexão a n cm do ponto de prova

D_r – densidade real do agregado miúdo

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes

ES – Especificação de Serviço

FWD – *Falling Weight Deflectometer*

G_m – massa específica média

G_n – massa específica da fração n

G_{sa} – massa específica do agregado na condição seca

G_{sb} – ,massa específica do agregado na condição SSS

G.C. – grau de compactação

γ_s – Peso específico dos grãos

IDP – Índice de Degradação Proctor

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

ID_p – Índice de Degradação Proctor do trabalho

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura Compactada Tropical

ME – Método de Ensaio

MF – Material Fresado

MFB – Material Fresado Bozano

MF/PDP – Mistura de material fresado com pó-de-pedra

M_r – módulo de resiliência do material

MR – módulo retroanalisado

NBR – Norma Brasileira

PDP – Pó-de-Pedra

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

P_a – peso da amostra antes da extração

P_d – peso da amostra depois da extração

ρ_d – massa específica aparente seca

$\rho_{dmáx}$ – massa específica aparente seca máxima

ρ_n – massa específica aparente úmida

R – raio de curvatura

R^2– coeficiente de regressão

S – grau de saturação

SSS – Superfície Saturada Seca

TSD – tratamento superficial duplo

T – teor de betume

UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

VB – viga Benkelman

w_{ot} – umidade ótima

w – umidade do material

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
1.1 ESTRUTURA E MATERIAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS 15
1.1.1 Base e sub-base de pavimentos flexíveis 16
1.1.2 Estabilização granulométrica de base e sub-base 17
1.1.3 Comportamento mecânico dos materiais de base e sub-base 19
1.2 RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS 20
1.3 FRESAGEM 21
1.3.1 Conceitos básicos 21
1.3.1.1 Tipos de fresagem 22
1.3.1.2 Técnicas de fresagem 22
1.3.2 Equipamentos 23
1.3.2.1 Máquina fresadora 23
1.3.2.2 Cilindro fresador 25
1.3.2.3 Dentes de corte 25
1.3.2.4 Correia transportadora 25
1.3.2.5 Equipamentos, sistemas e serviços adicionais 26
1.3.3 Material fresado 26
2 METODOLOGIA 29
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 29
2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA 29
2.3 MATERIAIS 30
2.3.1 Material fresado 30
2.3.2 Pó-de-pedra 31
2.3.3 Misturas 31
2.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO 32
2.4.1 Análise granulométrica 32
2.4.2 Teor de betume e granulometria sem ligante 32
2.4.3 Massa específica dos grãos e absorção de água 34
2.4.4 Ensaio de compactação Proctor 36
2.4.5 Índice de Degradação Proctor 37
2.4.6 Índice de Suporte Califórnia 38

2.5 PISTA EXPERIMENTAL 39
2.5.1 Localização e características 39
2.5.2 Caracterização dos materiais e execução da pista experimental 40
2.5.2.1 Caracterização dos materiais 41
2.5.2.2 Execução e controle tecnológico 42
2.5.3 Retroanálise das bacias de deflexão 42
3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 44
3.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO 44
3.1.1 Granulometria dos materiais e misturas 44
3.1.2 Teor de betume e granulometria sem ligante 45
3.1.3 Massa específica dos grãos e absorção de água 47
3.1.4 Índice de Degradação Proctor 47
3.1.5 Ensaio de Compactação Proctor 50
3.1.6 Índice de Suporte Califórnia 53
3.2 PISTA EXPERIMENTAL 56
3.2.1 Caracterização dos materiais 56
3.2.1.1 Solo do subleito 56
3.2.1.2 Material fresado e mistura 57
3.2.2 Execução e controle tecnológico 60
3.2.3 Retroanálise das bacias de deflexão 66
CONCLUSÃO 69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

INTRODUÇÃO

As obras da Copa 2014 e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) induziram investimentos na melhoria das condições de rodovias, o que vêem trazendo ganhos na eficiência logística, diminuição de custos do transporte, facilitando assim a integração nacional. Porém, segundo pesquisa da Confederação Nacional de Transportes – CNT (2012), 46,0% da extensão das rodovias do país possuem Classificação Geral nos níveis: regular, ruim ou péssimo, ainda de acordo com a CNT (2012) quanto pior a qualidade, menor será a velocidade de tráfego e maior a demora para a entrega de cargas e para as viagens de passageiros, evidenciando a necessidade de intervenções para a restauração e reabilitação do modal rodoviário.

Uma técnica de restauração, bastante empregada atualmente, é a fresagem do revestimento asfáltico e recomposição com um novo revestimento asfáltico. A etapa preliminar de fresagem consiste na operação de corte do revestimento asfáltico, esta atividade destaca-se como uma das que produzem grande quantidade de resíduo nas obras de restauração de rodovias, o fresado asfáltico, que é constituído por: brita, areia, filler e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Este rejeito geralmente é descartado em bota-fora ou utilizado como revestimento primário sem compactação em estradas vicinais e pátios, contrariando a tendência contemporânea de construir sustentavelmente: limitando os gastos energéticos e a geração de resíduos.

Dentro do tema materiais de pavimentação este trabalho tem como principal objetivo avaliar a reutilização deste resíduo em camadas granulares de pavimentos flexíveis. Tendo como objetivos específicos:

- caracterizar e avaliar, do ponto de vista rodoviário, as propriedades físicas e mecânicas do material proveniente da fresagem do revestimento asfáltico;
- sugerir uma solução viável para o emprego em camadas de base, do resíduo dos serviços de restauração asfáltica material;
- construir uma pista experimental para a aplicação e avaliação de uma solução de reutilização do material fresado em camadas granulares.

Ao final deste trabalho pretende-se apresentar uma solução ambientalmente correta, técnica e economicamente viável para a reutilização do material fresado em camadas granulares de pavimentos flexíveis.

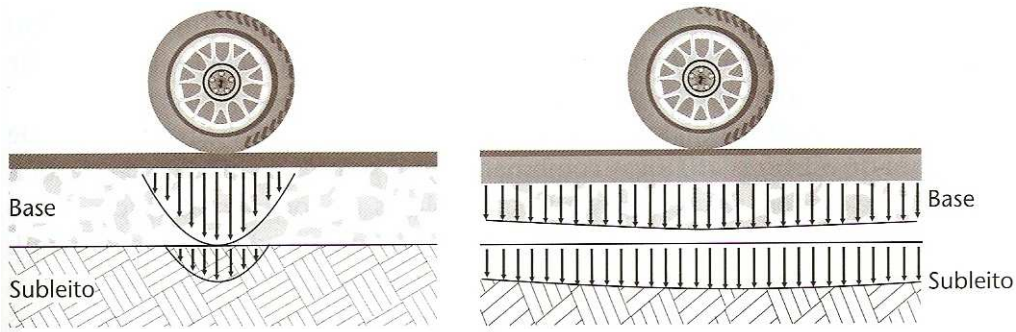
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 ESTRUTURA E MATERIAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da norma NBR 7207/82, conceitua o pavimento como sendo uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; e resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Os pavimentos rodoviários são normalmente classificados em *rígidos* e *flexíveis*. Geralmente os pavimentos rígidos têm revestimento de concreto de cimento Portland e os flexíveis revestimento de concreto de cimento asfáltico de petróleo. Os termos rígidos e flexíveis dizem respeito às respostas estruturais dos materiais isoladamente e, mais importante ainda, às respostas estruturais de todo o pavimento (Figura 1). Um pavimento flexível sob carregamento apresenta um campo de tensões concentrado enquanto um pavimento rígido apresenta um campo bem mais disperso, com as tensões distribuídas em uma área maior (BALBO, 2007; PAPAGIANAKIS & MASAD, 2007).

Figura 1: Resposta mecânica de um pavimento



(a) flexível: tensões concentradas (b) rígido: tensões distribuídas

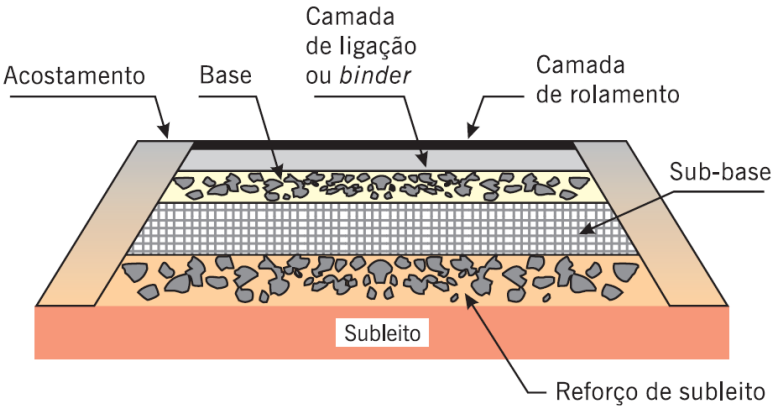
Fonte: Adaptado de Balbo (2007, p. 47)

Porém esses termos podem ser inadequados para classificar um pavimento quando se toma o revestimento como referência, pois o comportamento mecânico deste pode não ser representativo do pavimento, devendo-se nestes casos delimitar qual o tipo de material do revestimento (BALBO, 2007).

Tradicionalmente os pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Formados normalmente por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 2). O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento - em contato direto com as rodas dos veículos - e por camadas intermediárias ou de ligação (BERNUCCI et al., 2008).

Yoder e Witczak (1975) definem pavimento flexível como aquele em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento. Dimensionado normalmente à compressão e a tração na flexão.

Figura 2: Corte transversal de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et. al. (2008, p. 10)

Balbo (2007) defende que o pavimento poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço, mas a existência de revestimento e subleito são condições mínimas para que a estrutura seja chamada de pavimento. Ainda explica que a estrutura do pavimento é concebida para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes.

Para dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento deve-se conhecer as propriedades dos materiais utilizados, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente à repetição de carga e ao efeito do clima (SENÇO, 1997).

1.1.1 Base e Sub-Base de pavimentos flexíveis

Papagiannakis e Masad (2007) salientam que as propriedades da base têm um papel vital na integridade estrutural e desempenho dos pavimentos. Em pavimentos flexíveis, esta

camada deve ser dimensionada de modo a ter resistência suficiente para absorver as solicitações impostas pelo tráfego, distribuindo-as de forma atenuada sobre o subleito.

Quando, em função desse dimensionamento, a camada de base se tornar muito espessa, procura-se dividi-la em duas camadas, criando-se uma sub-base, geralmente de menor custo (BALBO, 2007).

Os materiais utilizados nas camadas do pavimento são usualmente constituídos por: agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros, podendo ser classificados segundo o seu comportamento frente aos esforços em: granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

Para as camadas de base e sub-base constituídas com materiais granulares e solos, tradicionalmente são utilizados os seguintes materiais:

- Brita Graduada Simples (BGS);
- Bica Corrida;
- Macadame Hidráulico;
- Macadame Seco (MS);
- Macadame Betuminoso;
- Misturas Estabilizadas Granulometricamente;
- Solo-Agregado;
- Solo Natural;
- Solo melhorado com cimento ou cal.

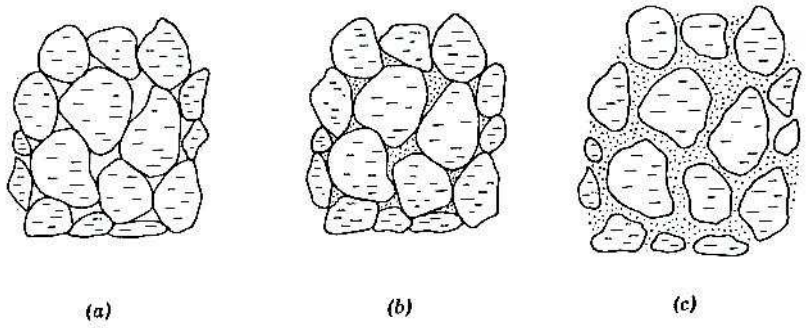
As camadas com materiais que não empregam estabilização com ligante hidráulico ou asfáltico são denominadas de camadas granulares. Recebem estabilização puramente mecânica por compactação e adensamento dos materiais. Por não possuírem coesão e não resistirem à tração, trabalham sob esforços de compressão. Quando bem graduadas, são denominadas de misturas estabilizadas granulometricamente (BALBO 2007, BERNUCCI et al., 2008).

1.1.2 Estabilização granulométrica de base e sub-base

A estabilidade granulométrica de misturas depende do tamanho das partículas (distribuição granulométrica), do formato das partículas, da densidade relativa e do atrito interno. Dentre estes fatores, a distribuição granulométrica ou seja a proporção de material

fino para material grosso, é considerado o aspecto mais influente na resistência ao cisalhamento, devido ao atrito gerado entre as partículas (YODER e WITCZACK, 1975).

Figura 3: Estados físicos de misturas granulométricas



Fonte: Yoder e Witczack (1975, p. 357)

A Figura 3 ilustra os três estados distintos de misturas granulométricas:

a) não contém material fino, a resistência é movida pelo contato grão-a-grão; baixa densidade, porém é de difícil manuseio durante a construção;
b) contêm material fino suficiente para preencher os vazios entre o material graúdo; alta densidade e mais resistente que o 3.a; manuseio de moderada dificuldade;
c) grande quantidade de finos, não havendo contato grão-a-grão; densidade e estabilidade menor do que 3.b; manuseio relativamente fácil durante a construção.

Para bases de pavimentos as misturas onde o contato grão-a-grão seja garantido são as preferenciais, desde que atendam as faixas granulométricas dadas em norma. Uma das características do agregado que influenciam a estabilização é a resistência mecânica do agregado, que deve ser suficiente para reter aproximadamente a mesma distribuição granulométrica durante a compactação e a posterior utilização pelo tráfego, pois o fator determinante no sucesso do emprego da estabilização granulométrica é a correta compactação do material, o que lhe confere grande resistência aos esforços verticais de compressão (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; YODER e WITCZACK, 1975).

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) – atual Departamento Nacional de Infra-Estrutura em Transportes (DNIT) – através das suas especificações de serviço:

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

- DNER – ES – 303/97 – Base Estabilizada Granulometricamente;

estabelece os procedimentos de execução e os parâmetros de aceitação e qualidade para materiais de base e sub-bases estabilizadas granulometricamente. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros.

Tabela 1: Parâmetros para Base e Sub-base estabilizadas granulometricamente

Parâmetro Normalizado		**Base**	**Sub-Base**
Índice de Suporte Califórnia (%)	$N \leq 5x10^6$	≥ 60	≥ 20
	$N \geq 5x10^6$	≥ 80	
Expansão (%)		$\leq 0,5$	≤ 1
Limite de Liquidez – LL (%)		≤ 25	-
Equivalente de areia para LL> 25 (%)		≤ 30	-
Índice de Plasticidade (IP)		≤ 6	-
Desgaste a abrasão Los Angeles (%)		≤ 55	-
Composição granulométrica dentro de uma das faixas estabelecidas na própria norma		Sim	-
Fração retida na peneira nº 10 deve ser constituída de partículas duras e isentas de substância prejudiciais		sim	sim

Fonte: DNER-ES 301/97 e DNER-ES 303/97

1.1.3 Comportamento mecânico dos materiais de base e sub-base

Em pavimentos flexíveis a camada de base esta próxima a superfície, então, deve possuir elevada resistência à deformação, de modo a suportar as elevadas pressões impostas pelo tráfego. Por isso bases e sub-bases são usadas sob pavimentos flexíveis para aumentar a capacidade de carga do pavimento, assim como criando camadas relativamente espessas para distribuir a carga sobre o subleito (YODER E WITCZAK, 1975).

Tradicionalmente a resistência a deformação é avaliada pelo ensaio de *Califórnia Bearing Ratio (CBR)*, em português Índice de Suporte Califórnia (ISC.). Este ensaio foi concebido para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, sendo obtida por meio de ensaio penetrométrico em laboratório, que compara a resistência a penetração de determinado material com a resistência de um material considerado como padrão. No entanto, o modo de ruptura e as condições de deformabilidade implícitas ao ensaio

não correspondem ao estado de tensões atuantes num pavimento e deve se levar isto em consideração quando se adota este ensaio para avaliar as propriedades mecânicas de um material (BERNUCCI et al., 2008).

É explicado por Papagianakis e Masad (2007) que os materiais granulares de bases/sub-bases apresentam um comportamento elasto-plástico em resposta ao carregamento e descarregamento, tendo componentes elásticas (recuperáveis) e plásticas (permanentes). A resposta elástica do material é denominada de resiliência que é definida como a propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica, esta propriedade é medida no ensaio triaxial de cargas repetidas.

A mecânica dos pavimentos é a disciplina da engenharia que trata dessa forma de entendimento do pavimento, como um sistema em camadas no qual devem estar compatibilizadas as tensões e deslocamentos solicitantes com as propriedades dos materiais e espessuras das camadas. Esses conceitos devem ser utilizados no dimensionamento da estrutura e condicionam a escolha dos materiais (MEDINA E MOTTA, 2005).

1.2 RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A pavimentação tem como principal objetivo garantir a trafegabilidade e proporcionar ao usuário conforto ao rolamento e segurança. Portanto, para o usuário o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos na superfície afetam o conforto ao rolamento e aumentam os custos operacionais. O fato do pavimento apresentar deterioração funcional e estrutural, acumuladas ao longo da sua vida de projeto, faz com que uma manutenção periódica seja necessária para assegurar as condições mínimas de trafegabilidade, conforto e segurança (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com o Manual do DNIT (2006) a definição das expressões relativas a Manutenção Rodoviária, tais como Restauração do Pavimento e Reabilitação do Pavimento, entre outras, não é uma tarefa simples. Estão ambas associadas à Recuperação dos Atributos Funcionais e Estruturais do Pavimento.

O termo Restauração do Pavimento deve ser entendido como a recuperação de um pavimento deteriorado, porém o grau de deterioração não compromete a sua habilitação. A Reabilitação do Pavimento, por outro lado, se aplica a pavimentos com elevado grau de

deterioração, apresentando defeitos irreversíveis e normalmente envolve a reconstrução do pavimento (DNIT, 2006).

Antes da adoção de qualquer alternativa de restauração um bom diagnóstico geral dos defeitos é imprescindível para o estabelecimento da melhor solução. Este diagnóstico é precedido por uma avaliação funcional ou uma avaliação estrutural. Na avaliação funcional é verificada a condição de superfície do pavimento, sendo os principais defeitos considerados: área trincada e severidade do trincamento, deformações e irregularidade longitudinal. Enquanto na avaliação estrutural é avaliada a resposta do pavimento face as cargas solicitantes, considerando-se a deflexão como principal parâmetro (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 2006).

Restauração está associada a uma variedade de correções de defeitos funcionais superficiais, através da aplicação de técnicas como: tratamentos superficiais, recapeamentos, etc., mas independentemente da técnica, a superfície existente precisa ser reparada, caso contrário a solução adotada terá seu desempenho comprometido pela reflexão das trincas (BERNUCCI et al., 2008; PAPAGIANAKIS E MASAD, 2007).

Atualmente a técnica de preparo de superfície empregada e recomendada em pavimentos flexíveis, é a fresagem de parte ou toda a camada de revestimento.

1.3 FRESAGEM

"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." (BONFIM, 2001, p. 19).

1.3.1 Conceitos Básicos

Com a crise do petróleo, na década de 70 e consequentemente a escassez de materiais asfálticos, voltou-se para a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas, de forma a restaurar as condições das vias a níveis satisfatórios. Inicialmente o material da pista era extraído por escarificação do pavimento. Esta técnica foi considerada inadequada pois implicava a retirada de toda a camada betuminosa, o que tornava impossível extrair apenas uma espessura pré-determinada. Concebeu-se então, a partir da segunda metade

da década de 70, o equipamento de fresagem como ferramenta adequada para possibilitar o corte do pavimento em profundidades pré-determinadas (BONFIM, 2001).

A fresagem de pavimentos é conceituada por Bonfim (2001) como o corte 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 na restauração de pavimentos.

A técnica que teve início tanto na Europa como na América do Norte em meados da década de 70, no Brasil teve início no ano de 1980 nas obras de restauração da via Anchieta em São Paulo, com o emprego de uma fresadora dos Estados Unidos, desde então serviços de fresagem tornaram-se corriqueiros no Brasil, dada a sua vantagem na manutenção do greide da via evitando assim a ocorrência de problemas da ordem estética, funcional e de segurança (BALBO, 2007; BONFIM, 2001).

1.3.1.1 Tipos de fresagem

Na literatura existem várias divergências quanto à classificação dos tipos de fresagem e suas aplicações, mas de acordo com Bonfim (2001) pode se classificar a fresagem de acordo com as espessuras de corte em três categorias: superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial é destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento, podendo ser dispensado o posterior recapeamento da pista, visto que a textura final garante rolamento de forma segura. Já a fresagem rasa atinge as camadas superiores do pavimento, normalmente esse tipo de intervenção tem uma profundidade da ordem de 5 cm. Quando a operação atinge as camadas de ligação, base e até sub-base é denominada de fresagem profunda, esta operação já visa o aspecto estrutural (BONFIM, 2001).

1.3.1.2 Técnicas de fresagem

Quanto à temperatura de ocorrência a fresagem pode ser realizada a frio ou a quente. Na primeira situação, o pavimento é fresado à temperatura ambiente, com isto ocorre a quebra de parte dos agregados, havendo a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Na fresagem a quente, o revestimento é pré-aquecido diminuindo a resistência ao corte do material, preservando a integridade do agregado o que conserva a curva granulométrica original do material (BONFIM, 2001).

1.3.2 Equipamentos

1.3.2.1 Máquina Fresadora

No Brasil, existe uma extensa quantidade de máquinas de fresagem, de vários tamanhos e modelos, capazes de atender a todas as necessidades do mercado. Usualmente a nomenclatura da máquina é referência à largura do cilindro fresador que, dependendo do fabricante, é expresso em milímetros ou em centímetros (BONFIM, 2001).

Para Bonfim (2001), apesar da variedade de modelos e tamanhos estes equipamentos podem ser subdivididos quanto ao seu tamanho, como:

1) pequeno porte: destinado à fresagem de arremates, principalmente para execução de pequenas intervenções em pontos localizados como remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro (Figura 4), entre outros. Possui cilindro com largura de fresagem variando de 300 mm a 600 mm.

2) médio porte: utilizado tanto para a fresagem de pequenas áreas como de grandes áreas. Geralmente possui uma correia transportadora para o carregamento de material fresado em caminhões (Figura 5). O cilindro fresador pode ter larguras entre 1000 mm a 1500 mm.

3) grande porte: empregado na fresagem de grandes áreas (Figura 6), por tratar-se de equipamentos com cilindro fresador de 2000 mm a 2200 mm de largura. São indicados para rodovias, em função do seu tamanho.

A fresagem pode ser aplicada em inúmeras situações, quer em grandes áreas, quer em locais onde existam muitas interferências, portanto a produtividade destes equipamentos é diretamente influenciada pelo tipo de obra. Fresagens em áreas contínuas (rodovias) resultam em produtividades maiores enquanto fresagem em pavimentos urbanos tem produtividade sempre menor (BONFIM, 2001).

Figura 4: Fresadora de pequeno porte

Fonte: Wirtgen

Figura 5: Fresadora de médio porte

Fonte: Wirtgen

Figura 6: Fresadora de grande porte

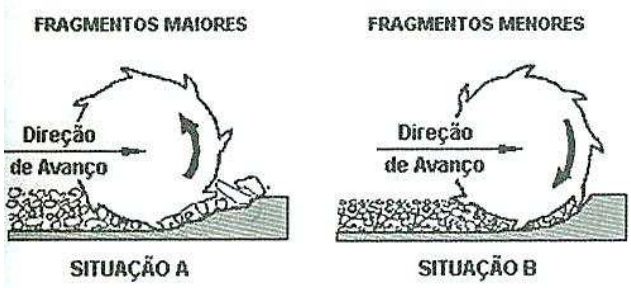
Fonte: Wirtgen

1.3.2.2 Cilindro Fresador

Também chamado de rolo fresador ou tambor fresador é um tambor rígido construído em aço especial, no qual os dentes de corte são fixados. O cilindro gira em alta rotação, quando colocado para cortar, iniciando o desbaste do pavimento. Geralmente possuem os dentes de corte dispostos em forma de “V” fazendo com que o material fresado, em função do giro, seja conduzido para o meio do cilindro, facilitando seu lançamento na correia transportadora (BONFIM, 2001).

A atuação do cilindro no pavimento (Figura 7) pode ser anti-horário (Situação A) ou horária (Situação B), o que poderá alterar a granulometria do material resultante. A atuação do cilindro no sentido horário, apesar de resultar em material de dimensões menores, é desfavorável para o corte para grandes espessuras de material oxidado (BONFIM, 2001).

Figura 7: Sentido de giro do cilindro



Fonte: Bonfim (2001, p. 35)

1.3.2.3 Dentes de corte

São as ferramentas de corte fixadas no cilindro fresador que agem diretamente no pavimento. Estas peças são constituídas por corpo forjado em aço com pontas de material mais duro, de carboneto de tungstênio e cobalto. As peças nas quais os dentes são fixados têm posições e ângulos de ataque definidos, para que se possa obter uma superfície de textura rugosa, porém plana e sem desníveis (BONFIM, 2001).

1.3.2.4 Correia transportadora

A correia transportadora é a parte do equipamento utilizada para o descarregamento do material em caminhões basculantes. Os equipamentos de pequeno e médio porte possuem este descarregamento pela parte traseira, enquanto os de maior porte possuem descarregamento frontal.

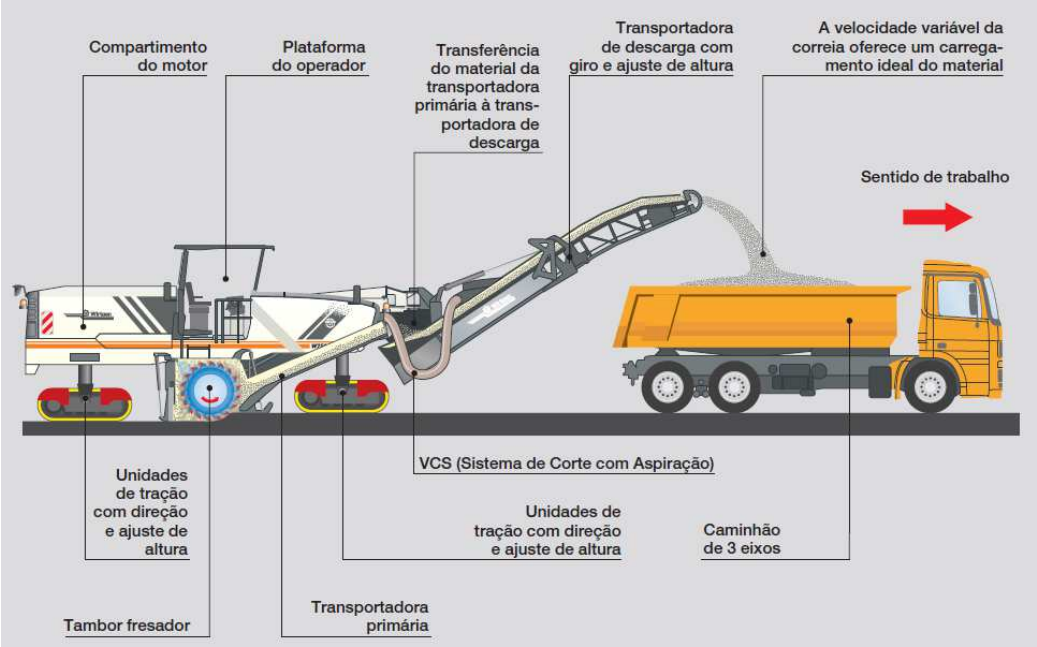
1.3.2.5 Equipamentos, sistemas e serviços adicionais

Complementando os equipamentos já citados, as operações de fresagem (Figura 8) necessitam de sistemas para: controle de velocidade, de modo a harmonizar a velocidade de deslocamento e a efetiva de trabalho; controle da espessura de corte, sendo manual ou eletrônico; apoio dos equipamentos: sobre pneus, para equipamentos de médio e pequeno porte, ou sobre esteiras para equipamentos de grande porte (BONFIM, 2001).

Bonfim (2001) recomenda que durante a operação de fresagem sejam utilizados equipamentos auxiliares como: caminhão-pipa, para espargir água sobre o cilindro fresador atenuando o desgaste dos dentes e minimizando a emissão de poeira; detector de metais, para verificação de material metálico sob a camada a ser desbastada e caminhões basculantes, para o transporte do material fresado.

Outros serviços como: sinalização da pista, arremates em locais fresados e varição da pista após a fresagem são indispensáveis para uma operação eficaz (BONFIM, 2001).

Figura 8: Operação de fresagem de um equipamento de grande porte



Fonte: Wirtgen

1.3.3 Material fresado

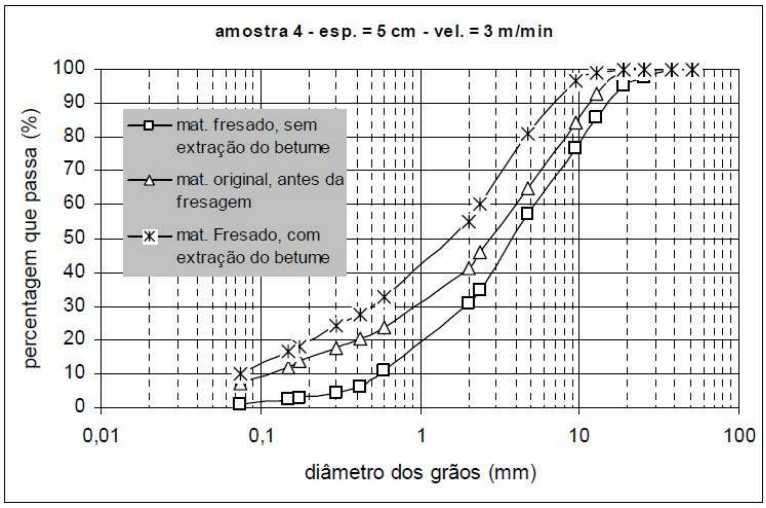
Balbo (2007) defende a necessidade de uma solução alternativa para a destinação final do grande volume de material fresado que é produzido em função dos serviços de fresagem, frisando que a aplicação apenas como revestimento primário (“cascalhamento”) tem-se

mostrado ineficiente e ambientalmente agressivo, pois em curto período de tempo o material é arrancado e carreado.

Bonfim (2001) mostra que o material fresado apresenta uma curva granulométrica bem graduada, contudo tem uma considerável falta de finos, pois estes estão aglomerados nos grumos que, de acordo com este autor, são pedaços constituídos de um ou mais agregados, envoltos por material fino e CAP. A ocorrência de grumos esta diretamente relacionada com a velocidade de operação da máquina fresadora, assim aumentando a velocidade de operação aumenta-se a quantidade de grumos. Fatores como a técnica de fresagem e o sentido do giro do cilindro fresador também influenciam a granulometria do material fresado, como explanado anteriormente.

Estudos realizados por Balbo (2007) mostram que antes da extração da película de CAP o material apresenta menos de 20% de material com diâmetro inferior a 1 mm, que aumenta para mais de 50% após a extração do betume da mistura fresada. Queiroz (2011) também obteve resultados semelhantes, concluindo que o diâmetro máximo do material fresado, sem extração de betume, era 19,1 mm. Araújo (2004) ao observar resultados semelhantes classificou o material como granular.

Figura 9: Curvas granulométricas do material fresado



Fonte: Araújo, 2004 (modificado – Bonfim, 1999)

A busca para uma solução ambientalmente correta para a destinação do material fresado levou alguns autores a misturar este material com solos para aplicação em bases/sub-bases e reforços do subleito (ARAÚJO, 2004; QUEIROZ, 2011; PORTO, 2011). Estes estudos caracterizaram o material empregando tecnologia tradicional, e avaliaram a resistência mecânica das misturas pelo ensaio do ISC. Porto (2011), mostra que a natureza

granular resulta em um aumento do peso específico aparente seco de misturas de solo com fresado, e concomitantemente, da redução do teor de umidade ótima de compactação, à medida que se aumenta o teor de material fresado nas misturas. Outra solução são as misturas de fresado com agregado virgem, prática adotada nos Estados Unidos da América, onde já existem estudos que determinam o teor ideal de fresado a ser incorporado nessas misturas, em função da influência do fresado no comportamento mecânico (MCGARRAH, 2007).

A característica granulométrica do material fresado levou Moreira (2006) a defender a mistura do material fresado com um agregado britado de granulometria fina, visando colmatar os vazios do material fresado, funcionando assim como corretor granulométrico.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos laboratoriais efetuados para a caracterização e avaliação dos materiais estudados. Os ensaios de laboratório são descritos de forma resumida, apresentando as normas técnicas nas quais constam os detalhes destes.

No item 2.5 descrevem-se as características da pista experimental, a sua localização, a execução e os procedimentos realizados para a retroanálise dos módulos resilientes.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é classificada como quantitativa e laboratorial, pois amostras de material foram coletadas a campo, preparadas e ensaiadas em laboratório e os resultados pertinentes analisados graficamente. Tendo também uma aplicação experimental em escala real.

2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Concluída a etapa de revisão bibliográfica foram coletadas amostras de material fresado (MF) e de pó-de-pedra (PDP), que foram preparadas e caracterizadas através de ensaios laboratoriais. Após isso efetuaram-se misturas do material fresado com o pó-de-pedra (MF/PDP) em proporções pré-determinadas. Estas misturas foram submetidas a ensaios laboratoriais para a avaliação das suas propriedades físico-mecânicas relevantes a aplicação em camadas granulares de pavimentos flexíveis.

Realizou-se ainda o acompanhamento e o controle tecnológico da execução de uma pista experimental, com o emprego de uma mistura MF/PDP, realizando-se levantamentos defletométricos para retroanálise dos módulos resilientes.

Depois da análise e interpretação dos resultados dos ensaios laboratoriais são traçadas conclusões acerca da viabilidade ou não, da utilização do material como camada de pavimento flexível.

2.3 MATERIAIS

2.3.1 Material fresado

O material fresado (MF) foi coletado no pátio da Unidade Local do DNIT em Cruz Alta, seguindo as diretrizes da DNER-PRO 120/97.

Este material proveio da fresagem da camada superficial do revestimento (5 cm), que era um concreto asfáltico denso (faixa C– DNIT), do pavimento da BR-158, nas proximidades do município de Cruz Alta, entre o km 196 e o km 201.

Figura 10: Local de coleta do material fresado

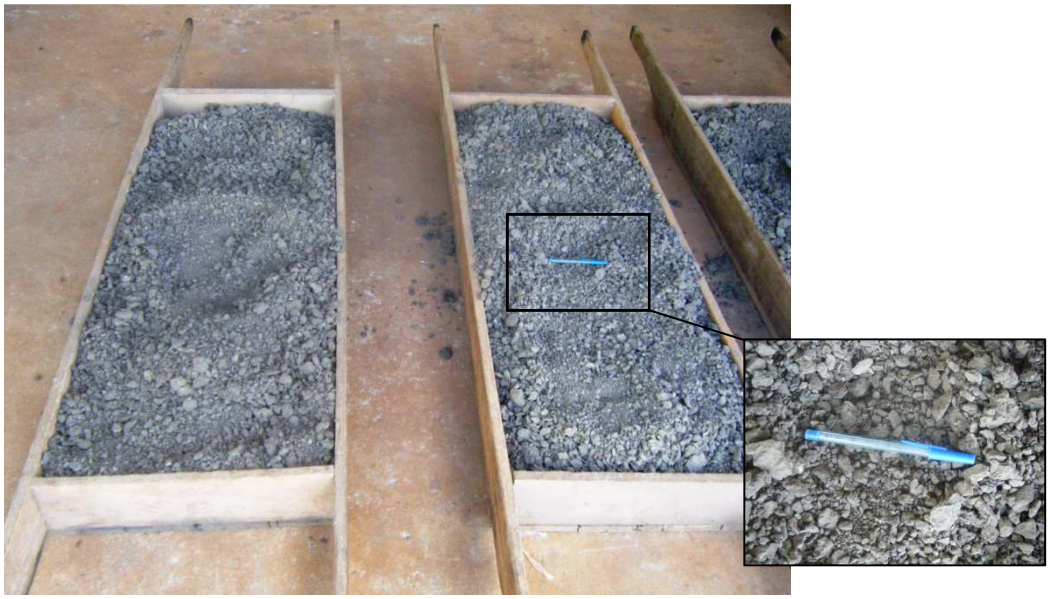
Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 11: Fresagem da BR-158, km 196 +800

Fonte: Prof. Echeverria

O material fresado coletado foi passado pela peneira 37,5 mm, eliminando-se os grumos retidos nesta peneira, e exposto ao ar para secagem até a umidade higroscópica (Figura 12). Durante todo o período do trabalho o material foi estocado dentro de sacos em lugar coberto para preservar a condição de umidade higroscópica.

Figura 12: Secagem ao ar do fresado



Fonte: Próprio autor (2012)

2.3.2 Pó-de-Pedra

De acordo com a nomenclatura comercial, pó-de-pedra (PDP) é o agregado proveniente da britagem que tem partículas de diâmetro máximo igual a 4,8 mm. Foi coletado numa unidade de britagem em pedreira de rocha basáltica no Município de Coronel Barros, seguindo também as diretrizes da DNER-PRO 120/97.

2.3.3 Misturas

De acordo com as informações coletadas na etapa de revisão bibliográfica, sabia-se de antemão que o material fresado apresentava na sua constituição granulométrica uma deficiência de finos, o que dificulta o seu enquadramento em faixas de estabilização granulométrica utilizadas para camadas de base granular (vide 2.4.1). Portanto além de estudar as propriedades do material fresado, realizaram-se misturas deste com o pó-de-pedra, nas seguintes relações de massa: 70% de material fresado para 30% de pó-de-pedra

(70MF/30PDP) e o inverso, ou seja, 30% de material fresado para 70% de pó-de-pedra (30MF/70PDP), com o objetivo de enquadrar o material nas faixas granulométricas.

2.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

2.4.1 Análise granulométrica

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a reutilização do material fresado para a aplicação em camadas granulares, realizou-se a análise granulométrica para verificar o enquadramento dos materiais nas faixas, propostas pela DNER-ES 303/97, para base estabilizada granulometricamente. Portanto adotou-se a relação de peneiras da referida norma. O processo de peneiramento manual foi orientado pela DNER-ME 083/98.

A Tabela 2 apresenta as relações de peneiras e os limites para a percentagem de material passando por elas, de acordo com a faixa granulométrica que se queira enquadrar o material.

Tabela 2: Faixas granulométricas para material estabilizado granulometricamente

Tipos	**Para N> 5 x 10^6**				**Para N <5 x 10^6**		**Tolerâncias da faixa de projeto**
Peneiras	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	
	% em peso passando						
2”	100	100	-	-	-	-	± 7
1”	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8”	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNER-ES 303/97

2.4.2 Teor de betume e granulometria sem ligante

A determinação do teor de betume (Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP) do material fresado seguiu os procedimentos do método de ensaio DNER-ME 053/94, que orienta a extração pelo extrator centrífugo com solvente. Este método de extração por centrifugação do

ligante betuminoso consiste em colocar o material fresado dentro de um aparelho, denominado *rotarex* (Figura 13), em conjunto com um solvente, que com a centrifugação separa o ligante dos agregados.

Figura 13: *Rotarex*

Fonte: Próprio autor (2012)

Devido aos grumos do material fresado, quarteou-se aproximadamente 6000 g de fresado e foram retiradas três amostras com 1010 g cada, na tentativa de minimizar a variabilidade dos resultados. O teor de betume foi determinado conforme equação abaixo:

Equação 1: $T = \frac{P_a - P_d}{P_a} \times 100$

onde:

P_a: peso da amostra antes da extração, em g

P_d: peso da amostra depois da extração, em g

T: teor de betume, em %

A média das três amostras foi adotada como o teor de betume característico do material fresado. Após a extração as amostras foram levadas a secar em estufa por um período de 24 horas para realizar a análise granulométrica. Para esta análise utilizou-se a relação de peneiras da especificação para concreto asfáltico, a DNIT 031/06-ES, podendo assim verificar em que faixa se enquadrava a mistura original.

2.4.3 Massa específica dos grãos e absorção de água

Os materiais estudados são constituídos por diferentes frações granulométricas, o que dificulta a determinação da massa específica dos grãos e a absorção. A recomendação de Bernucci et al. (2008) é que pode-se computar um valor para a massa específica média através de um valor ponderado das várias frações da mistura, pela expressão:

Equação 2: $$G_m = \frac{1}{\frac{\%1}{G1}+\frac{\%1}{G1}+\cdots+\frac{\%n}{Gn}}$$

onde:

G_m: massa específica média, em g/cm³

$G1, G2, \ldots, Gn$: massa específica das frações 1,2, ..., n, em g/cm³

$\%1, \%2, \ldots, \%n$: percentagem das massas das frações 1, 2, ..., n, em %

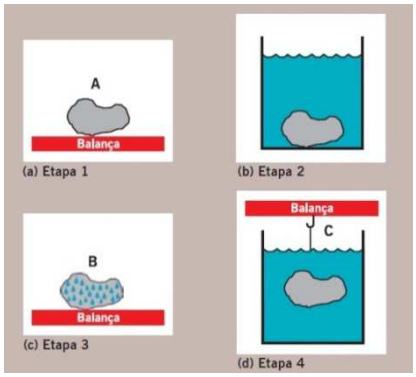
Para a fração do material fresado e do pó-de-pedra com grãos maiores do que 4,8 mm (peneira nº 4), a massa específica dos grãos foi determinada através dos procedimentos (Figura 14) do DNER-ME 195/97, que traz as seguintes definições:

- Absorção de água: aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como percentagem de sua massa seca (Equação 5);

- Massa específica na condição seca: relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis, conforme Equação 3;

- Massa específica na condição superfície saturada seca (SSS): relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e o seu volume, excluídos os vazios permeáveis, calculado de acordo com a Equação 4.

Figura 14: Determinação da massa específica dos grãos e absorção



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 148)

Equação 3: $G_{sa} = \frac{A}{A-C}$

Equação 4: $G_{sb} = \frac{A}{B-C}$

Equação 5: $a = \frac{B-A}{A} \times 100$

onde:

G_{sa}: densidade do agregado na condição seca, em g/cm³

G_{sb}: densidade do agregado na condição SSS, em g/cm³

a : absorção de água, em %

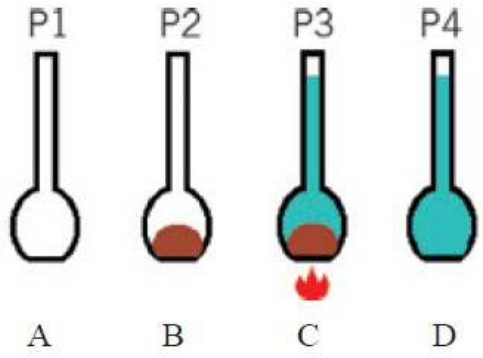
A : massa do agregado seco, em g

B : massa do agregado na condição saturada superfície seca, em g

C : leitura correspondente ao agregado imerso em água, em g

Para a fração do material fresado e do pó-de-pedra com grãos menores do que 4,8 mm a densidade real foi determinada pelos procedimentos da DNER-ME 084/95, com o auxílio de um picnômetro, determinando-se os pesos ilustrados na Figura 15. Com a obtenção destes pesos pode-se calcular a densidade real, através da Equação 6, multiplicando esta pela massa específica real da água, obtêm-se a massa específica real do agregado miúdo (G_r).

Figura 15: Determinação da densidade real de agregado miúdo



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008, p. 148)

Equação 6: $D_r = \frac{B-A}{(D-A)-(C-B)}$

onde:

D_r: densidade real do agregado miúdo;

A : massa do picnômetro vazio e seco, em g;

B : massa do picnômetro mais amostra, em g

C : massa do picnômetro mais amostra mais água, em g

D : massa do picnômetro cheio d`água, em g

As massas específicas dos grãos das misturas foram computadas conforme a Equação 2, com as massas específicas médias do material fresado e do pó-de-pedra.

2.4.4 Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de compactação foi realizado seguindo as recomendações da norma DNER-ME 129/94. O objetivo deste ensaio é determinar qual o valor de umidade (w_{ot}) que leva ao maior valor de massa específica seca ($\rho_{dmáx}$), para a energia de compactação aplicada.

O ensaio consiste em compactar com um soquete o material passante na peneira ¾", num molde cilíndrico de dimensões padronizadas. A compactação é feita em camadas, aplicando-se um determinado número de golpes/camada conforme a energia de compactação pretendida: normal (12 golpes); intermediária (26 golpes) ou modificada (55 golpes). Após a compactação pesa-se o cilindro determinando a massa específica úmida do material, obtendo assim a massa específica aparente seca pela fórmula:

Equação 7: $$\rho_d = \frac{\rho_n}{(1+w)}$$

onde:

ρ_d: massa específica aparente seca, em g/cm³

ρ_n: massa específica aparente úmida, em g/cm³

w: umidade do material, em decimal

A umidade do material é determinada pela secagem em estufa a 110ºC de uma amostra retirada de dentro do corpo-de-prova. Neste trabalho o processo de secagem teve de ser alterado devido a volatilidade do CAP e ao amolecimento do mesmo sob altas temperaturas, então a temperatura de secagem utilizada foi de 70ºC.

2.4.5 Índice de Degradação Proctor

Durante o ensaio de compactação Proctor verificou-se que as energias intermediária e modificada levavam a quebra dos grãos do material fresado alterando a composição granulométrica do MF, então investigou-se o quanto cada energia degradava o MF através da determinação de um Índice de Degradação Proctor (IDP). O IDP determinado neste trabalho difere em dois aspectos do ID_p (índice de degradação determinado pela DNER-ME 398/99), estes aspectos são comentados a seguir:

1) O ID_p é determinado somente para a energia intermediária, mas neste trabalho o IDP foi determinado também para a energia modificada, já que o objetivo era comparar a degradação entre as energias;
2) O ID_p é determinado para uma granulometria padrão. Para enquadrar o material fresado nesta granulometria seria necessário um grande volume de material e esta granulometria não seria representativa do fresado, portanto criou-se uma granulometria padrão praticamente igual a granulometria do material fresado (vide 3.1.4).

Figura 16: Aspecto da granulometria padrão adotada, antes da compactação

Fonte: Próprio autor (2012)

Para cada energia foram ensaiadas 3 amostras da granulometria padrão adotada (Figura 16). O ensaio consistiu em compactar no cilindro Proctor a amostra em 5 camadas, com o número de golpe/camada respectivo a cada energia, após a compactação as amostras foram peneiradas e determinou-se a média das percentagens passante em cada peneira e o IDP foi calculado pela expressão:

Equação 8: $IDP = \frac{\sum D}{6}$

onde:

IDP: índice de Degradação Proctor

D:diferença percentual, em cada peneira, entre a média das amostras e a granulometria padrão adotada

2.4.6 Índice de Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi determinado conforme preconiza a norma DNER-ME 049/94. O valor do ISC exprime a percentagem da resistência à penetração do material em relação à resistência de uma brita-padrão (100%).

O ensaio começou com a moldagem do corpo-de-prova, que é semelhante ao ensaio de compactação Proctor. Após as moldagens os corpos-de-prova foram imersos em um tanque cheio de água (Figura 17) por um período de 4 dias, leituras de deslocamento vertical foram efetuadas para o cálculo da expansão axial do material em relação à altura inicial do corpo-de-prova.

Figura 17: Corpos-de-prova imersos no tanque

Fonte: Próprio autor (2012)

Terminado o período de imersão realizou-se o ensaio de penetração (Figura 18) a uma velocidade constante de 1,27 mm/min. O valor de ISC foi calculado pela Equação 9, e o valor adotado foi o maior valor entre as medidas de penetração em 2,54 mm e 5,08 mm.

Equação 9: $ISC = \frac{(pressão\ aplicada\ ou\ pressão\ corrigida)}{(pressão\ padrão)}$

onde:

$pressão\ aplicada\ ou\ pressão\ corrigida$: dada pelo ensaio de penetração

$pressão\ padrão$: valor padrão presente na norma

Figura 18: Penetração do corpo-de-prova

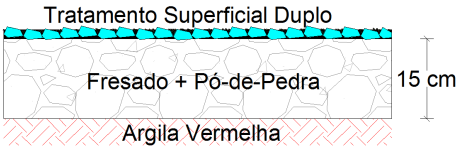
Fonte: Próprio autor (2012)

2.5 PISTA EXPERIMENTAL

2.5.1 Localização e características

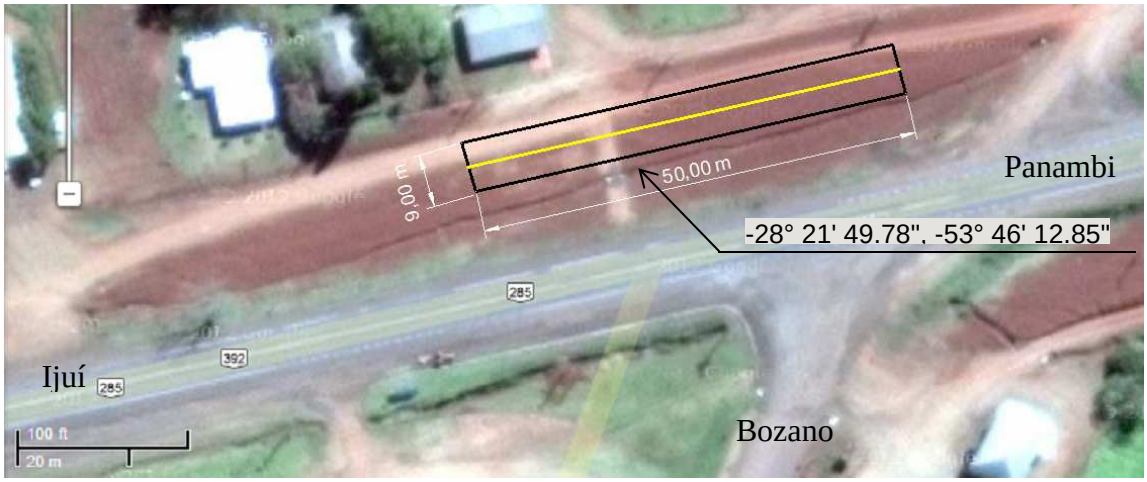
A pista experimental, de 50 metros de extensão e 9 metros de largura, situa-se numa das ruas laterais à BR-285/RS no Município de Bozano (Figura 20 e Figura 21). A base do pavimento é constituída por uma mistura de material fresado com pó-de-pedra (PDP) sobre um subleito de argila vermelha e revestida com um tratamento superficial duplo (Figura 19).

Figura 19: Seção esquemática do pavimento



Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 20: Localização da pista experimental



Fonte: Adaptado de Google maps (2012)

Figura 21: Situação da rua lateral antes da construção da pista

Fonte: Próprio autor (2012)

2.5.2 Caracterização dos materiais e execução da pista experimental

O material fresado utilizado na execução da camada de base encontrava-se estocado no pátio de máquina da Prefeitura Municipal de Bozano (Figura 22), oriundo das operações de manutenção promovidas pelo DNIT/RS na BR-285 no período de 2009 a 2010.

Misturou-se este material fresado com o pó-de-pedra na proporção, em volume, de 70% para 30%, respectivamente. A escolha desta proporção foi influenciada por relatos do

bom desempenho desta (MOREIRA, 2006) e também por possibilitar uma reutilização de grande volume do material fresado.

Figura 22: Pilha de material fresado no pátio da prefeitura

Fonte: Próprio autor (2012)

2.5.2.1 Caracterização dos materiais

Amostras do solo local foram coletadas e preparadas para ensaios de caracterização no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI. Foge ao escopo deste trabalho o detalhamento dos ensaios de caracterização, portanto são citadas abaixo as normas que guiaram os procedimentos:

- granulometria por peneiramento (NBR 6457);
- granulometria por sedimentação (NBR 7181);
- limites de Atterberg (NBR 6459 e NBR 7180);
- massa específica real (NBR 6508);
- ensaio de compactação (NBR 7182);
- índice de Suporte Califôrnia (NBR 9895).

. O pó-de-pedra utilizado pela prefeitura é proveniente da mesma pedreira do pó-de-pedra utilizado nos estudos em 2.4. Então foram coletadas somente amostras do material fresado para caracterização granulométrica e determinação da curva de compactação da mistura 70MFB/30PDP, na energia intermediária. Esta energia foi escolhida pelo baixo volume de tráfego da rua lateral e porque os equipamentos disponíveis para a execução da

camada não eram de grande porte, sendo assim a exigência para alcançar energias maiores poderia tornar-se inviável.

2.5.2.2 Execução e controle tecnológico

Um relatório fotográfico da execução da pista é apresentado no item 3.2 e paralelamente a este relatório são descritas as etapas da execução da pista.

O controle de compactação *in situ* foi efetuado pelo método do frasco de areia (DNER-ME 092/94) tanto para o subleito como para a base.

De acordo com Trichês (2004) uma das formas encontradas para se estimar o bom desempenho de um pavimento novo é determinar a deformação resiliente da estrutura através da medida sistemática das deflexões recuperáveis durante o processo executivo. Portanto, para avaliar a contribuição estrutural da camada de base, levantamentos de deflexões foram executadas com viga Benkelman (VB) conforme a norma do DNER 024/94, durante a execução do pavimento dos dois lados do trecho, de 10 em 10 m, tanto no subleito como na camada de base.

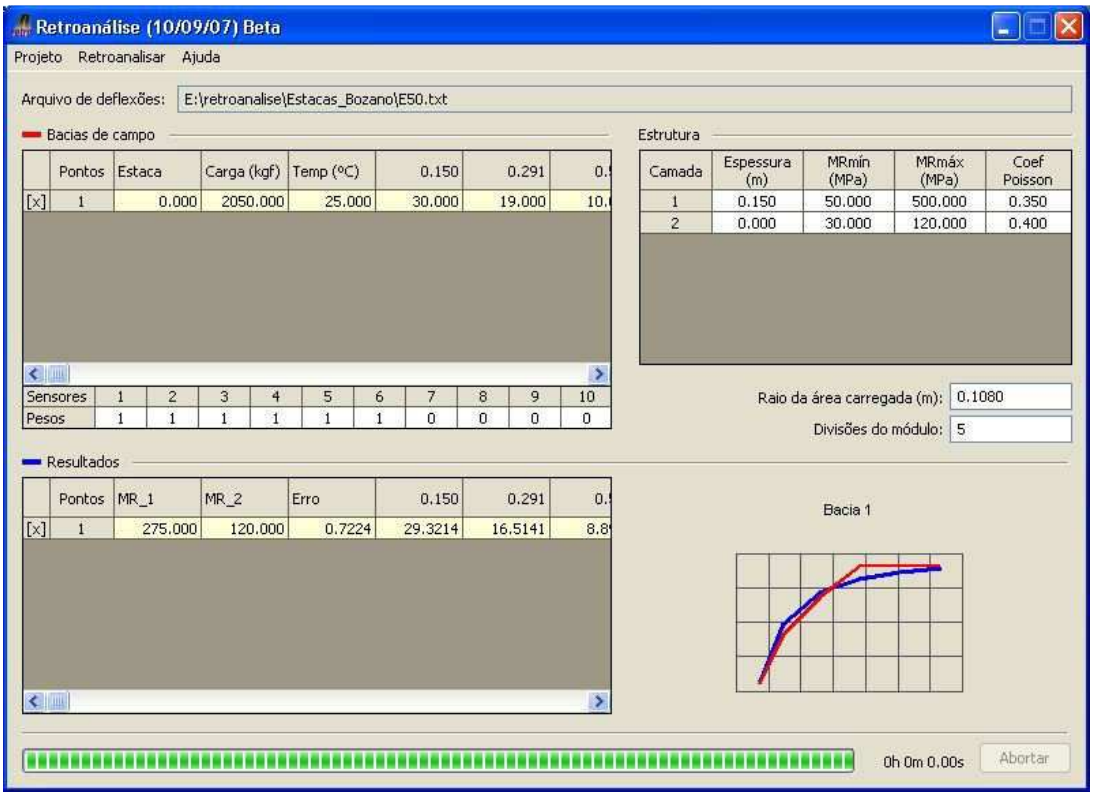
2.5.3 Retroanálise das bacias de deflexão

Durante o controle defletométrico da camada da base realizou-se também o levantamento da bacia de deformação (DNER-ME 061/94) por viga Benkelman de 10 em 10 m, para posterior retroanálise dos módulos resilientes das camadas.

Para esta retroanálise foi utilizado o aplicativo RETROANÁLISE do *software* Sispav, desenvolvido por Franco (2007). Este aplicativo utiliza como dados de entrada levantamento realizados com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD), portanto, converteram-se as deflexões levantadas em campo para FWD através do método proposto por Theisen et al. (2009), que parte do princípio da sobreposição de efeitos considerando apenas a atuação de uma das rodas do eixo padrão, uma explicação completa é encontrada na referência citada.

No processo de retroanálise além de entrar com as coordenadas e as deflexões das bacias convertidas para FWD, é preciso que o utilizador adote alguns valores iniciais para as propriedades das camadas que constituem o pavimento. A espessura da base foi mantida constante (15 cm) para todas as estacas, os valores de coeficiente de poisson foram 0,35 para a base e 0,40 para o subleito. Os valores adotados para os intervalos dos módulos (Figura 23), assim como os coeficientes de poisson, são os relatados na literatura nacional (BALBO, 2007; MEDINA E MOTTA, 2005).

Figura 23: Tela do aplicativo RETROANÁLISE



Fonte: Próprio autor (2012)

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados com o material fresado, o pó-de-pedra e as misturas citadas no capítulo anterior.

No item 3.2 é apresentado um relatório fotográfico da execução da pista experimental, os resultados da caracterização do subleito, os dados do material utilizado na camada de base, e os módulos retroanalisados.

3.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.1.1 Granulometria dos materiais e misturas

Como citado no capítulo anterior, para a análise granulométrica dos materiais adotou-se a relação de peneiras da DNER-ME 303/97. Na Tabela 3 são apresentadas as percentagens médias passantes em cada peneira, para cada material e para as misturas juntamente com a faixa C da DNER-ME 303/97. As distribuições granulométricas das misturas foram computadas pela percentagem de cada material.

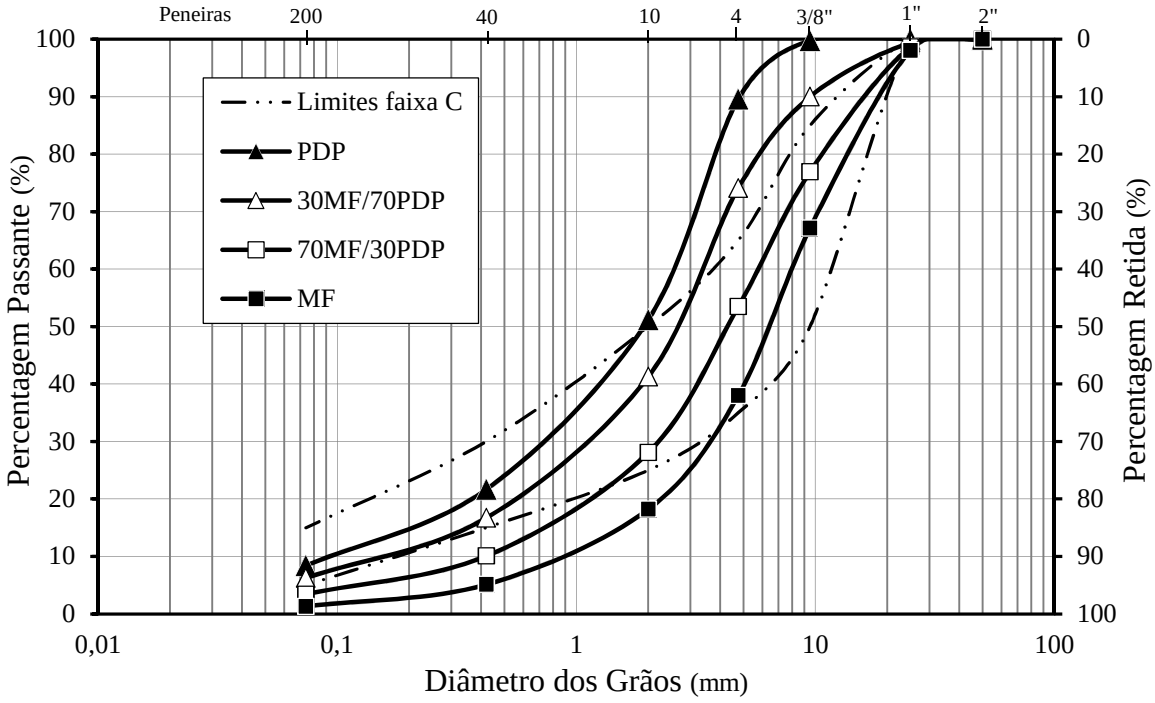
Tabela 3: Percentagens passantes médias de cada material

Peneira	mm	MF	PDP	70MF/30PDP	30MF/70PDP	Faixa C
2”	50	100,00	100,00	100,00	100,00	-
1”	25,4	98,05	100,00	98,64	99,42	100
3/8”	9,5	67,14	99,77	76,93	89,98	50-85
4	4,8	37,99	89,58	53,47	74,10	35-65
10	2,00	18,20	51,17	28,09	41,28	25-50
40	0,40	5,10	21,66	10,07	16,69	15-30
200	0,075	1,30	8,39	3,43	6,26	5-15

Fonte: Próprio autor (2012)

A fração graúda do material fresado (> 4,8 mm) enquadra-se nos limites da faixa C, enquanto a fração miúda é mais grossa que os limites. O inverso se verifica para o Pó-de-pedra. (Figura 24). Quanto maior o teor de PDP na mistura, mais fina ela é, tendendo a sair dos limites da faixa C. A mistura 70MF/30PDP é a que melhor se enquadra na faixa C, sendo ligeiramente mais grossa que a faixa em questão, a partir da peneira 40 (< 0,40 mm).

Figura 24: Curva granulométrica dos materiais



Fonte: Próprio autor (2012)

3.1.2 Teor de betume e granulometria sem ligante

Como descrito no item 2.4.2 foram feitas extrações em três amostras diferentes, e adotou-se o teor de betume médio das amostras, sendo este igual a 6,01% (Tabela 4). Este valor é superior aos teores usados atualmente nas rodovias federais da região, que giram entre 4,8 a 5,4% (informação verbal)[1]. Também é superior ao teor de 5,2% relatado por Porto (2011) para um material fresado da região de Passo Fundo.

Tabela 4: Resultados da extração de betume

Amostra	**Massa antes da extração** (g)	**Massa após a extração** (g)	**Teor de betume** (%)	**Teor de betume médio** (%)
A1	1010	944	6,53	6,01
A2	1010	955	5,45	
A3	1010	949	6,04	

Fonte: Próprio autor (2012)

Após a extração do ligante cada amostra passou por um processo de peneiramento a seco, determinando-se a percentagem passante em massa na série de peneiras definidas pela

[1] Informação fornecida pelo prof. Echeverria

DNIT 031/06-ES, que é a especificação de concreto asfáltico. Comparou-se a distribuição granulométrica média com a faixa C, porque esta foi a faixa de projeto da mistura (Tabela 5).

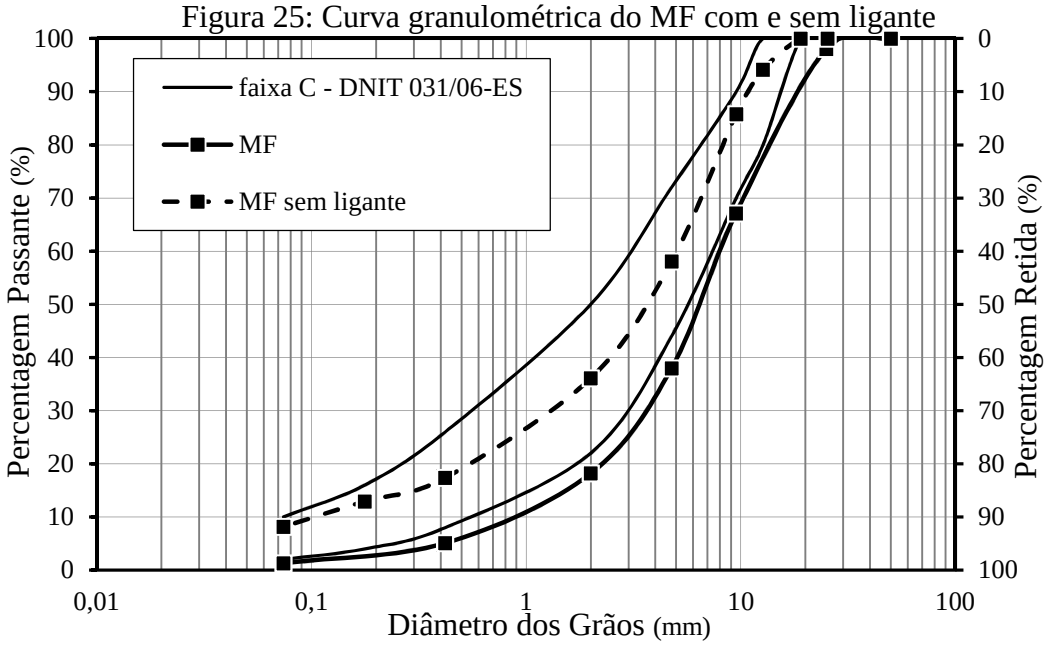
Tabela 5: Granulometria das amostras do MF sem ligante

Peneira	**mm**	**%passante**				
		A1	A2	A3	Média	Limites Faixa C
1”	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	-
3/4”	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100
1/2”	12,7	93,21	94,01	95,15	94,12	80-100
3/8”	9,5	86,96	84,75	85,65	85,79	70-90
4	4,8	60,98	59,83	53,38	58,06	44-72
10	2,0	39,45	36,49	32,38	36,11	22-50
40	0,42	18,77	17,35	16,03	17,38	8-26
80	0,18	13,57	13,04	12,24	12,95	4-16
200	0,075	8,48	8,73	7,28	8,16	2-10

Fonte: Próprio autor (2012)

A percentagem média passante do material sem ligante enquadra-se na faixa C, o que indica que não houve quebra dos agregados do concreto asfáltico durante a operação de fresagem. Como relatado na bibliografia, após a extração da película de ligante aumenta consideravelmente a percentagem de finos do material (Figura 25), o que se constata comparando a percentagem passante na peneira de 4,8 mm, que antes da extração era 37,99% e após a extração aumentou para 58,06%.

Figura 25: Curva granulométrica do MF com e sem ligante



Fonte: Próprio autor (2012)

3.1.3 Massa específica dos grãos e absorção de água

Conforme descrito no item 2.4.3 as massas específicas dos grãos do fresado e do pó-de-pedra (Tabela 6) foram determinadas pela ponderação média das massas específicas dos grãos maiores e menores do que 4,8 mm. Fato que deve ser realçado é que o valor da massa específica real média (G_m) do fresado é aproximadamente idêntico ao valor determinado por Araújo (2004), por um método diferente. Esta autora obteve um valor igual a 2,64 g/cm³, ponderando a massa específica do ligante asfáltico com a massa específica dos agregados sem ligante.

Tabela 6: Massas específicas e absorção dos materiais

Material	**Fração> 4,8 mm**		**Fração < 4,8 mm**		**Gm** (g/cm³)	**Absorção de água** (%)
	%	Gsa (g/cm³)	%	Gr (g/cm³)		
MF	62,01	2,61	37,99	2,65	2,63	2,30
PDP	10,42	2,86	89,58	3,00	2,98	2,05

Fonte: Próprio autor (2012)

Com os valores de G_m, do PDP e do MF, foi possível calcular as massas específicas dos grãos das misturas pela Equação 2, para a mistura 70MF/30PDP a massa específica é igual a 2,73 g/cm³ e para a mistura 30PDP/70MF é igual a 2,87 g/cm³.

Embora o valor de absorção de água para o material fresado com ligante, pareça elevado,é praticamente igual aos 2,29% apresentados por Porto (2011).

3.1.4 Índice de Degradação Proctor

Realizou-se o ensaio de degradação Proctor para investigar e quantificar a degradação em função da energia de compactação. Os comentários aqui tecidos são sobre a percentagem passante média em massa, após a compactação, para cada uma das energias. Relacionando-se essas percentagens com a granulometria padrão adotada e não a granulometria preconizada pela DNER-ME 398/99, pois, como explicado anteriormente (2.4.5) esta não é representativa do fresado (Figura 27).

Na energia intermediária a diferença percentual entre a média e a granulometria padrão adotada, em todas as peneiras, é positiva e maior do que 1, indicando uma diminuição do tamanho dos grãos do MF (Tabela 7). A maior diferença ocorre na peneira de 4,8 mm,

elevando a percentagem passante de 40,00% para 57,09%. O IDP_i calculado através da Equação 8 foi 9,41.

Tabela 7: Resultados do ensaio de IDP para a energia intermediária

Peneira	**mm**	**% passante em massa**					**Diferença percentual**	**IDP_i**
		Padrão adotada	Ai1	Ai2	Ai3	Média		
¾”	19	95,00	98,95	98,12	99,59	98,89	3,89	9,41
3/8”	9,5	70,00	85,38	87,84	85,75	86,32	16,32	
4	4,8	40,00	57,09	60,29	59,17	57,85	17,85	
10	2,00	20,00	31,72	34,58	30,81	32,37	12,37	
40	0,40	5,00	9,55	10,18	9,34	9,69	4,69	
200	0,075	1,00	2,32	2,36	2,34	2,34	1,34	

Fonte: Próprio autor (2012)

Para a energia modificada a diferença percentual também é positiva em todas as peneiras, portanto há degradação do material (Tabela 8). Para esta energia também a maior diferença encontra-se na peneira de 4,8 mm, aumentando a percentagem passante em 18,24 unidades percentuais, o IDP_m calculado pela Equação 8 foi 9,95.

Tabela 8: Resultados do ensaio de IDP para a energia modificada

Peneira	**mm**	**% passante em massa**					**Diferença percentual**	**IDP_m**
		Padrão adotada	Am1	Am2	Am3	Média		
¾”	19	95,00	99,46	100,00	98,32	99,26	4,26	9,95
3/8”	9,5	70,00	86,37	85,28	84,97	85,54	15,54	
4	4,8	40,00	60,14	56,44	58,13	58,24	18,24	
10	2,00	20,00	35,03	32,79	33,36	33,73	13,73	
40	0,40	5,00	11,69	11,10	11,06	11,28	6,28	
200	0,075	1,00	2,63	2,73	2,53	2,63	1,63	

Fonte: Próprio autor (2012)

Há uma certa degradação do MF durante o ensaio de compactação proctor, porém o valor desta degradação é praticamente igual para as duas energias, haja visto que o valor do IDP para as duas energias investigadas encontra-se na mesma ordem de grandeza. As distribuições granulométricas após as compactações comprovam isso (Figura 27), uma vez

que para a energia intermediária o passante na peneira 4,8 mm é 57,09% e para a energia modificada é de 58,24%, entende-se que esta diferença não é significativa.

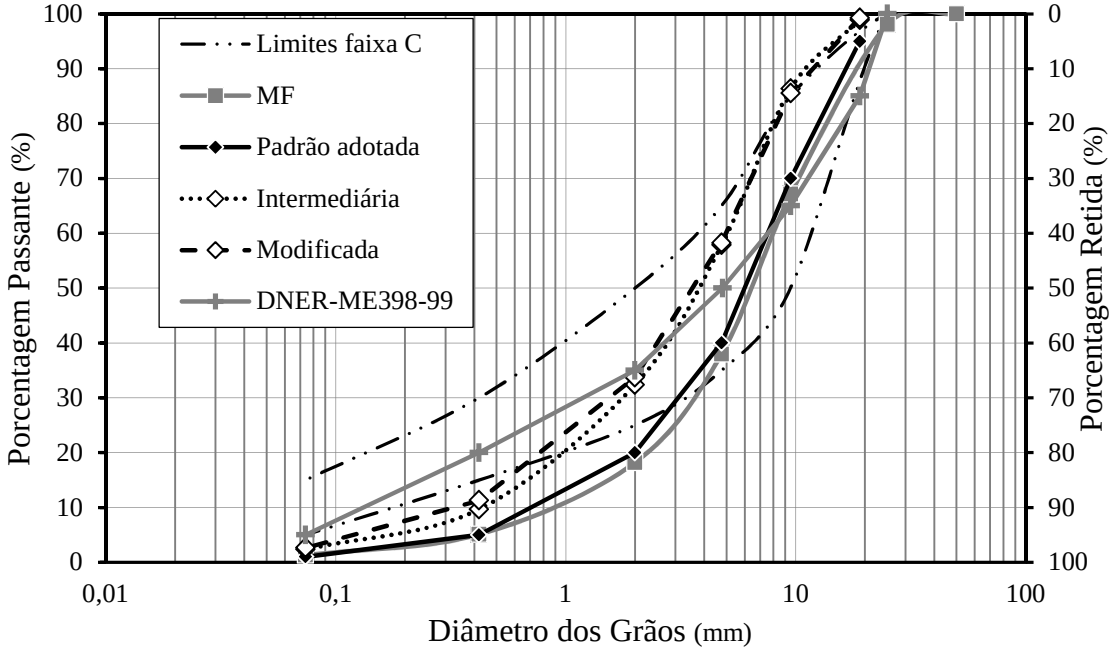
Figura 26: MF antes (a) e após (b) da compactação na energia intermediária

(a) (b)

Fonte: Próprio autor (2012)

Contudo, deve-se observar que a compactação nas energias intermediária e modificada tendem a pulverizar a fração graúda do MF (Figura 26), quebrando a película de ligante de tal forma que o MF se aproxima do limite superior da faixa C, ou seja o MF não conserva a sua característica granulométrica após a compactação.

Figura 27: Curvas granulométricas após o ensaio de IDP



Fonte: Próprio autor (2012)

3.1.5 Ensaio de compactação Proctor

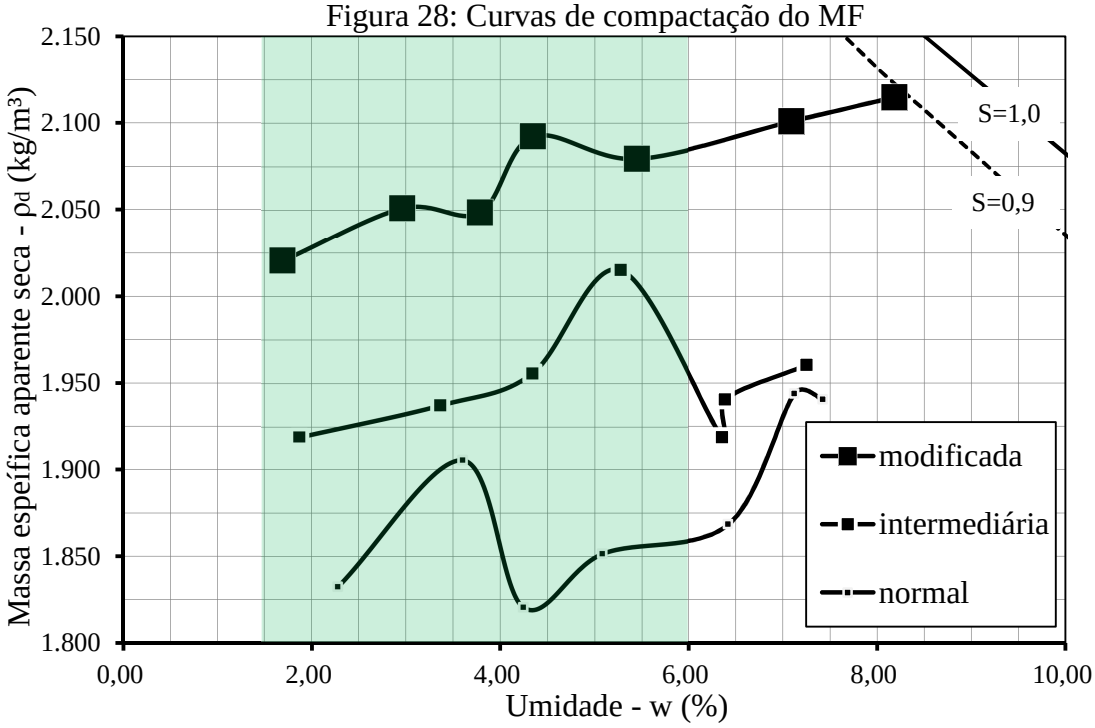
Para o MF realizaram-se ensaios de compactação em três energias (Tabela 9), observa-se que quanto maior a energia maiores os valores de massa específica aparente seca (ρ_d) alcançados (Figura 28).

Tabela 9: Resultados do ensaio de compactação Proctor para o MF

Energia		**Pontos**						
		1	2	3	4	5	6	7
Normal	W (%)	2,28	3,60	4,25	5,08	6,42	7,12	7,43
	ρ_d (kg/m³)	1.832	1.905	1.821	1.851	1.868	1.940	1.944
Intermediária	W (%)	1,87	3,36	4,34	5,27	6,35	6,38	7,25
	ρ_d (kg/m³)	1.919	1.937	1.956	2.015	1.919	1.940	1.960
Modificada	W (%)	1,70	2,97	3,79	4,35	5,45	7,09	8,18
	ρ_d (kg/m³)	2.021	2051	2.049	2.092	2.080	2.101	2.115

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 28: Curvas de compactação do MF



Fonte: Próprio autor (2012)

De acordo com Lee e Suedkamp (1972), solos com limites de liquidez menores do que 30%, normalmente produzem curvas de compactação irregulares, com dois picos ou 1 ½ pico. Estas curvas foram obtidas para o MF (Figura 28), o que é plausível com a classificação de não plástico do MF. O problema deste tipo de curva é a determinação do ponto de umidade ótima (w_{ot}) e massa específica máxima ($\rho_{dmáx}$). Prochaska et al. (2005) relatam um comportamento semelhante para uma escória granular, com granulometria e massa específica dos grãos parecida com os do MF.

Uma possível explicação para esse comportamento é a granulometria do material, pois a partir de teores elevados de água o esforço de compactação faz com que a água em excesso seja expelida pelos vazios, compactando mais ainda o material, porém o teor de água efetivo (determinado após secagem em estufa, de uma amostra do interior do corpo-de-prova) será menor que o adicionado para a compactação, resultando em uma ρ_d elevada. Prochaska et. al. (2005) observaram este comportamento para a escória anteriormente descrita e denominaram este fenômeno de *bleeding* (Figura 29), estes autores recomendam ainda que o ensaio de compactação mais adequado para materiais granulares é o *one-point vibrating hammer compaction test*.

Figura 29: *Bleeding* na compactação do MF

Fonte: Próprio autor (2012)

Neste trabalho o critério para determinação da $\rho_{dmáx}$ do MF, foi o de analisar somente o trecho da curva em que não apresentava *bleeding* (hachurra da Figura 28) adotando-se então o ponto máximo deste trecho, para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia.

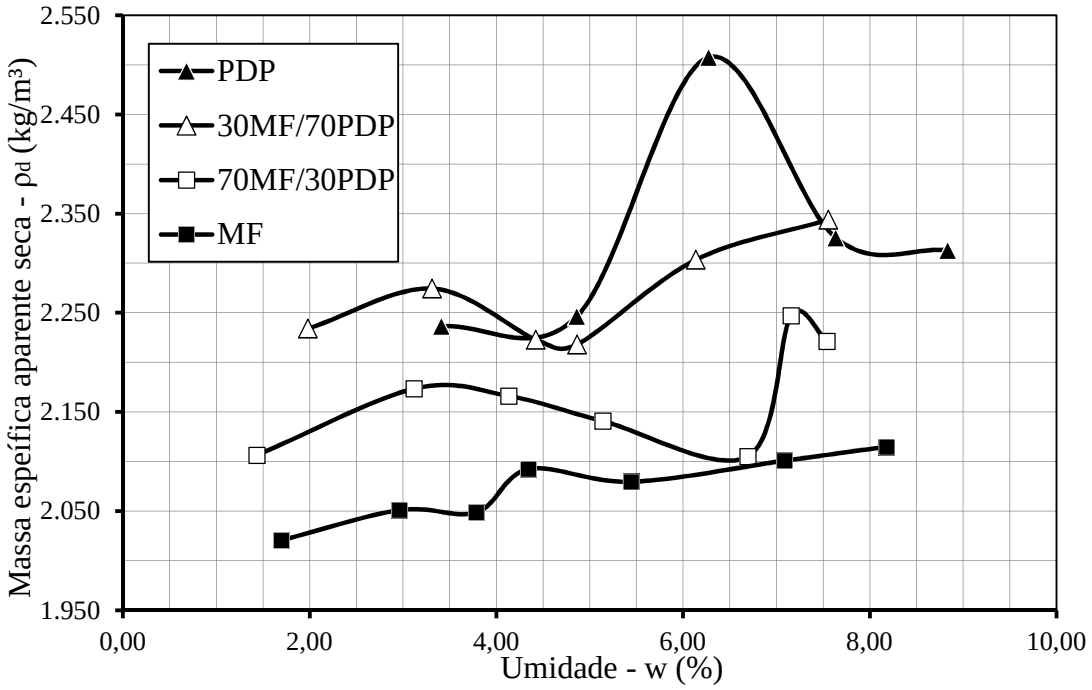
Como a energia modificada possibilitou alcançar maiores valores de ρ_d, e a quebra dos grãos foi praticamente a mesma que a energia intermediária, adotou-se a energia modificada para os ensaios das misturas e do PDP (Tabela 10).

Tabela 10: Resultados do ensaio de compactação (energia modificada)

Material		**Pontos**						
		1	2	3	4	5	6	7
PDP	W (%)	3,41	4,86	6,27	7,64	8,84	-	-
	ρ_d (kg/m³)	2.236	2.246	2.508	2.325	2.313	-	-
30MF/70PDP	W (%)	1,98	3,31	4,42	4,86	6,14	7,56	-
	ρ_d (kg/m³)	2.234	2.274	2.223	2.218	2.303	2.344	-
70MF/30PDP	W (%)	1,44	3,12	4,13	5,14	6,70	7,16	7,54
	ρ_d (kg/m³)	2.106	2.173	2.166	2.141	2.105	2.247	2.221
MF	W (%)	1,70	2,97	3,79	4,35	5,45	7,09	8,18
	ρ_d (kg/m³)	2.021	2051	2.049	2.092	2.080	2.101	2.115

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 30: Curvas de compactação (energia modificada) do PDP e das misturas



Fonte: Próprio autor (2012)

Para as misturas as curvas de compactação foram de 2 picos enquanto o PDP apresentou uma curva típica (Figura 30). Quanto maior o teor de PDP maiores as massas específicas resultantes (Tabela 10) devido a maior massa específica dos grãos deste material. O valor de $\rho_{dmáx}$ para o PDP esta claramente definido, mas para as misturas assim, como o MF a existência de 2 picos dificulta essa tarefa.

Nas misturas os pontos acima de 6% de umidade, não só apresentaram o fenômeno de *bleeding* no fundo do molde como também espirravam o material fino (Figura 31) para fora do molde, alterando a granulometria do material durante o ensaio não só pela quebra dos grãos do fresado como também pela perda do PDP, no entanto este espirro provavelmente não ocorre em campo uma vez que a compactação em campo não é por impacto.

Figura 31: Espirro do material fino

Fonte: Próprio autor (2012)

3.1.6 Índice de Suporte Califórnia

Yoder e Witczak (1975) recomendam que para solos granulares as amostras devem ser compactadas na umidade ótima nas três energias de compactação, e que se faça a determinação do ISC para cada energia, obtendo assim uma curva ISC *versus* ρ_d de cada energia. Sendo que para cada ponto de umidade ótima devem ser preparadas duas amostras e adotar os valores médios de ρ_d e ISC.

Para o estudo do ISC do MF adotou-se a recomendação desses autores, moldando-se as amostras para as umidades correspondentes aos máximos da região hachurrada da Figura 29. Não foi possível alcançar os mesmos valores de massas específicas dos pontos de pico,

mas com o aumento da energia de compactação conseguiu-se alcançar valores próximos, como indicam os graus de compactação (G.C.) maiores do que 95%.

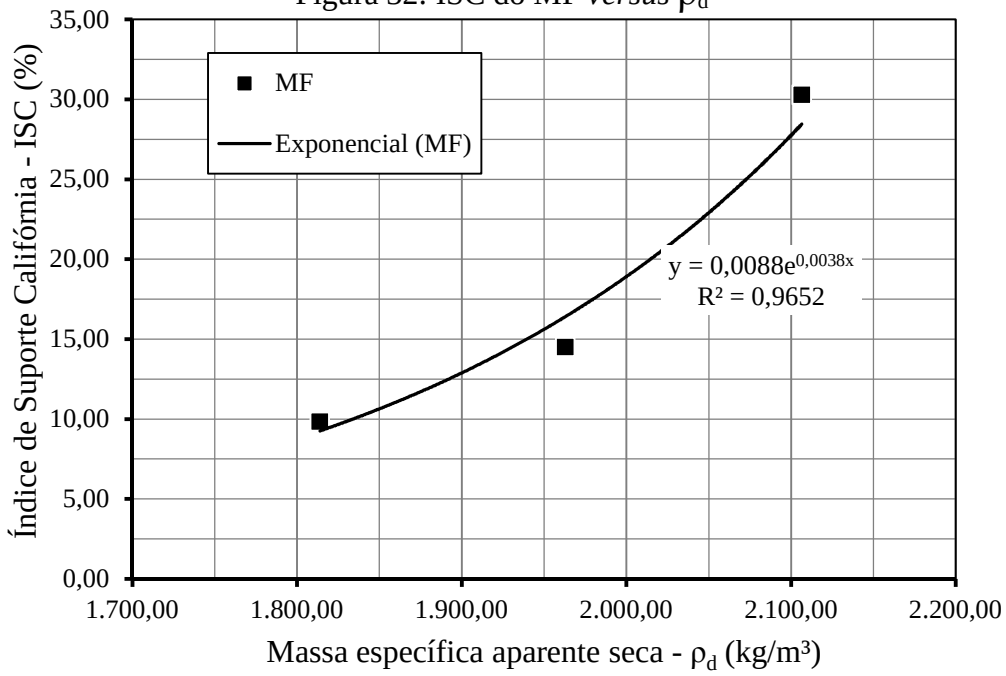
Quanto maior a energia empregada maior o ISC do MF (Tabela 11), este fato está relacionado com as maiores massas específicas alcançadas (maior concentração de material por volume) gerando maior atrito entre os grãos e consequentemente um aumento da resistência ao puncionamento exercido pelo pistão. O crescimento exponencial do ISC com o aumento da ρ_d (Figura 32) indica que a quebra dos grãos verificada para as energias intermediária e modificadas não prejudica a resistência do material. O MF contraiu-se durante os 4 dias de imersão, mas os valores de contração são insignificantes.

Tabela 11: Resultados médios do ensaio de ISC para o MF

Energia	**Resultados do ensaio de ISC**				
	w (%)	ρ_d (kg/m³)	G.C. (%)	ISC (%)	Expansão (%)
Normal	3,42	1.814	94,97	9,83	-0,13
Intermediária	5,26	1.963	97,17	14,50	-0,19
Modificada	3,98	2.106	100,79	30,29	-0,06

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 32: ISC do MF *versus* ρ_d



Fonte: Próprio autor (2012)

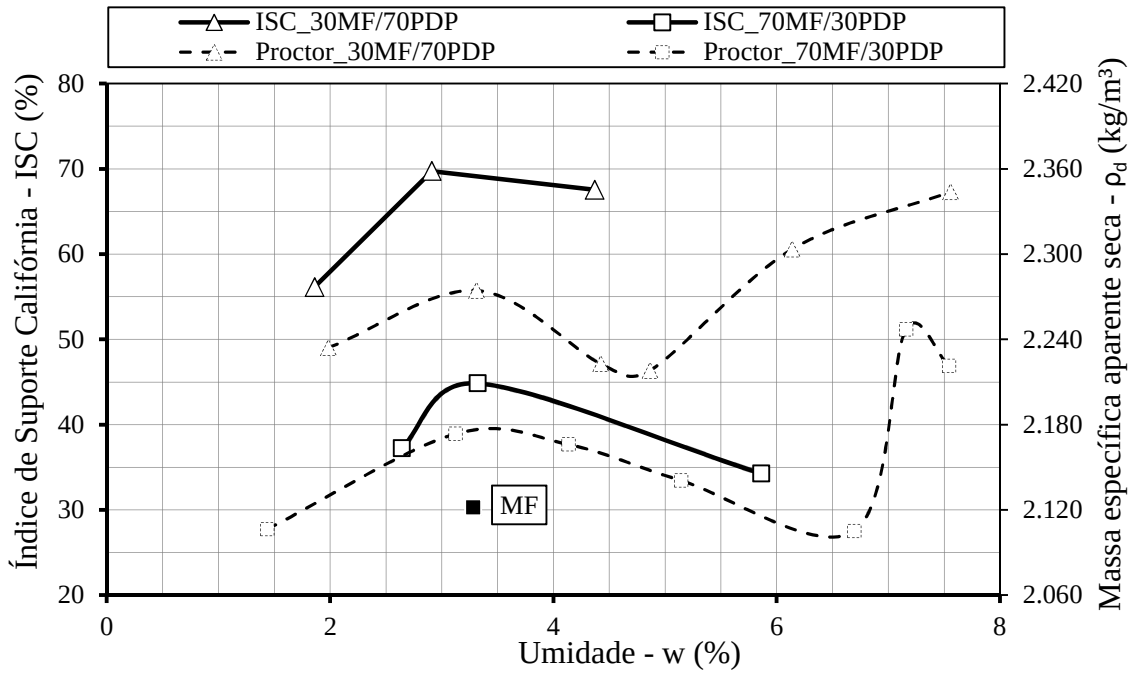
O procedimento recomendado por Yoder e Witczak (1975) não foi adotado para o estudo do ISC das misturas, para estas optou-se por investigar 3 pontos ao longo das curvas de compactação: o ponto de menor umidade, o primeiro pico e o ponto de inflexão. Para as misturas também não houve reprodução do mesmo valor de massa específica dos pontos investigados, mas mesmo assim obtiveram-se G.C. elevados e os valores de umidade ficaram próximo dos pretendidos (Tabela 12).

Tabela 12: Resultados médios do ensaio de ISC para as misturas

Mistura	**Resultados do ensaio de ISC**				
	w (%)	ρ_d (kg/m³)	G.C. (%)	ISC (%)	Expansão (%)
70MF/30PDP	2,64	2.095	99,75	37,25	-0,04
	3,32	2.116	97,49	44,84	-0,01
	6,70	2.150	101,90	34,27	-0,01
30MF/70PDP	1,86	2.229	99,95	56,12	0,00
	2,91	2.253	99,27	69,73	0,00
	4,37	2.266	103,01	67,54	0,00

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 33: I.S.C. das misturas *versus* w



Fonte: Próprio autor (2012)

Para os 3 pontos estudados ambas as misturas apresentam comportamento semelhante, o ponto de maior ISC é o correspondente ao valor de umidade próximo ao do primeiro pico da curva de compactação (Figura 33). O maior valor de ISC da mistura 30MF/70PDP é 56% maior do que o maior valor da 70MF/PDP este por sua vez é 48% maior do que o ISC do MF na energia modificada, portanto quanto maior o teor de PDP maior o valor do ISC.

3.2 PISTA EXPERIMENTAL

3.2.1 Caracterização dos materiais

3.2.1.1 Solo de subleito

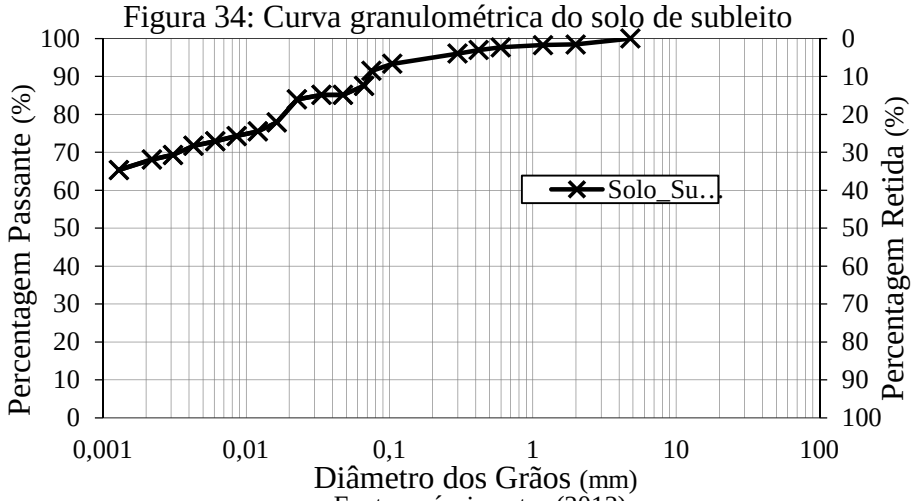
Pelos ensaios de caracterização (Tabela 13 & Figura 34) o subleito é classificado como um A-7-5 na classificação rodoviária e como um silte de alta compressibilidade (MH) na classificação unificada. Echeverria (2011) sugere a utilização do sistema de classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT) para solos desta região, porque embora 70% das partículas são do tamanho argila, a classificação unificada resulta como um silte.

Tabela 13: Propriedades físicas do solo de subleito

Propriedade	Valor
Limite de liquidez (LL)	64%
Limite de Plasticidade (LP)	48%
Índice de Plasticidade (IP)	16 %
Peso específico dos grãos (γ_s)	28,27 kN/m³

Fonte: Próprio autor (2012)

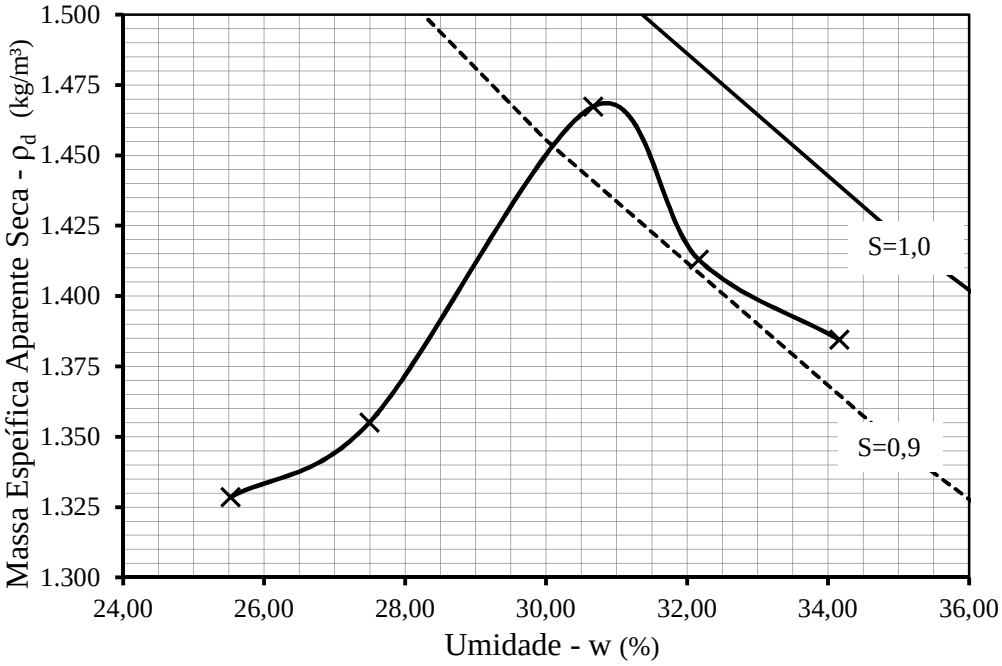
Figura 34: Curva granulométrica do solo de subleito



Fonte: próprio autor (2012)

Da curva de compactação do solo na energia normal (Figura 35) obteve-se o valor de $\rho_{dmáx}$ igual a 1.467 kg/m³ na w_{ot} de 32,17%. O valor de $\rho_{dmáx}$ foi usado para o controle de compactação *in situ*. O valor de ISC, na condição de $\rho_{dmáx}$, foi 9,52%.

Figura 35: Curva de compactação (energia normal) do solo



Fonte: Próprio autor (2012)

3.2.1.2 Material fresado e mistura

O fresado coletado no pátio de máquinas da Prefeitura Municipal de Bozano, será aqui codificado como MFB e a mistura como 70MFB/30PDP, para que se possam fazer comparações com o MF e a 70MF/30PDP do item 3.1, já que os procedimentos laboratoriais foram os mesmos. Como o pó-de-pedra é proveniente da mesma pedreira pressupõe-se que as propriedades deste material são os mesmos.

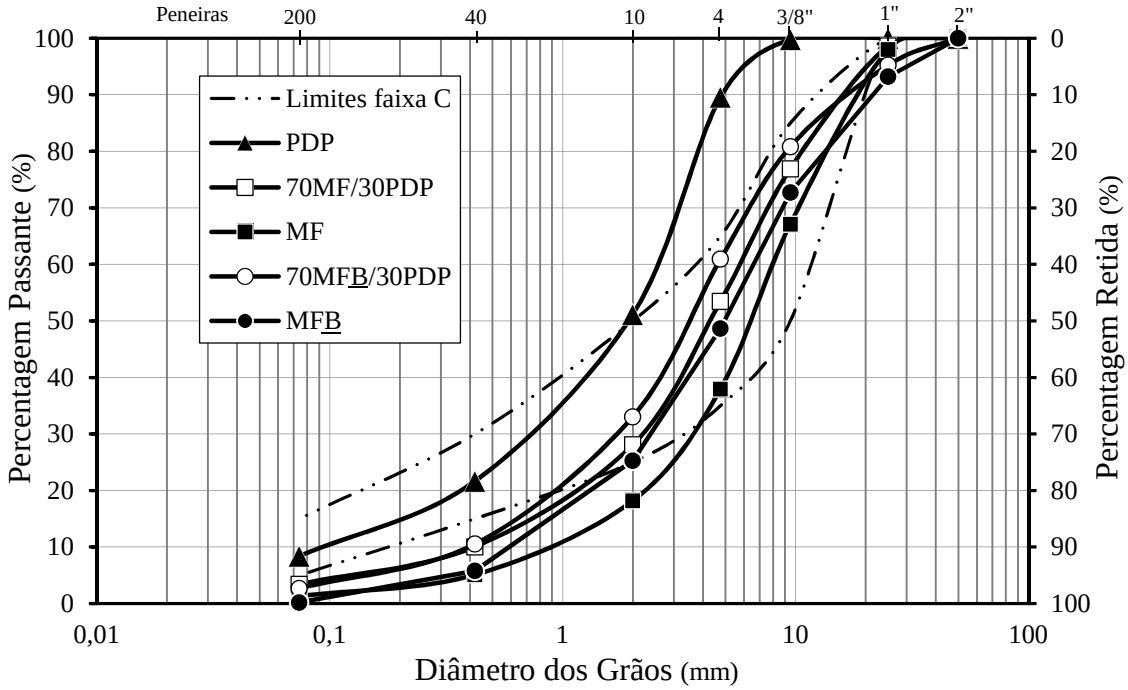
O MFB é ligeiramente mais fino do que o MF, sendo a percentagem passante na peneira 4 (< 4,8 mm) 11% maior (Tabela 14), consequentemente a 70MFB/30PDP é ligeiramente mais fina do que a 70MF/30PDP. Porém essa maior percentagem passante na peneira 4, não se enquadra inteiramente na faixa C, verifica-se que ambos os fresados têm deficiência de material menor que 0,40 mm ficando essa fração fora da faixa C (Figura 36).

Tabela 14: Percentagens passantes médias

Peneira	mm	MFB	MF	70MFB/30PDP	70MF/30PDP	Faixa C
2”	50	100,00	100,00	100,00	100,00	-
1”	25,4	93,20	98,05	95,24	98,64	100
3/8”	9,5	72,70	67,14	80,82	76,93	50-85
4	4,8	48,68	37,99	60,95	53,47	35-65
10	2,00	25,30	18,20	33,06	28,09	25-50
40	0,40	5,80	5,10	10,55	10,07	15-30
200	0,075	0,23	1,30	2,68	3,43	5-15

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 36: Curvas granulométricas



Fonte: Próprio autor (2012)

Pelos motivos explicados, no item 2.5.2, a energia de compactação para o controle da execução de base foi a intermediária. As curvas de compactação apresentaram o mesmo formato irregular (Figura 37) das curvas apresentadas em 3.1.5, sendo que a 70MFB/30PDP apresenta um formato semelhante à 70MF/30PDP, mas com valores de ρ_d menores (Tabela 15) que podem ser explicados pela menor energia de compactação e pela granulometria mais fina. Escolheu-se o segundo pico da mistura 70MFB/30PDP para o controle da camada de base a campo, com uma w_{ot} igual a 8,34%.

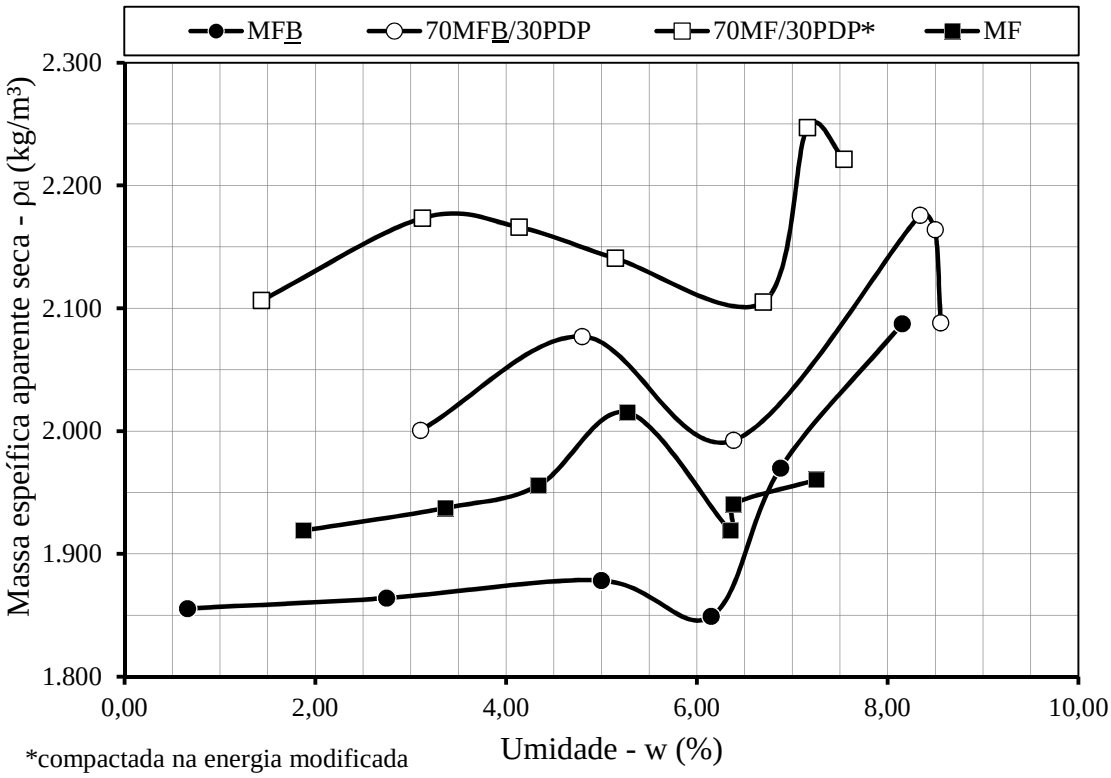
Tabela 15: Resultados do ensaio de compactação (energia intermediária)

Material		Pontos						
		1	2	3	4	5	6	7
MFB	W (%)	0,66	2,75	5,00	6,15	6,88	8,15	-
	ρ_d (kg/m³)	1.855	1.864	1.878	1.849	1.970	2.087	-
MF	W (%)	1,87	3,36	4,34	5,27	6,35	6,38	7,25
	ρ_d (kg/m³)	1.919	1.937	1.956	2.015	1.919	1.940	1.960
70MFB/30PDP	W (%)	3,10	4,79	6,38	8,34	8,50	8,56	-
	ρ_d (kg/m³)	2.001	2.077	1.992	2.176	2.164	2.088	-
70MF/30PDP*	W (%)	1,44	3,12	4,13	5,14	6,70	7,16	7,54
	ρ_d (kg/m³)	2.106	2.173	2.166	2.141	2.105	2.247	2.221

*compactada na energia modificada

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 37: Curva de compactação dos fresados e das misturas (energia intermediária)



*compactada na energia modificada

Fonte: Próprio autor (2012)

3.2.2 Execução e controle tecnológico

A camada de base da pista experimental foi executada diretamente sobre o subleito, durante as primeiras duas semanas do mês de Maio, sendo a pista concluída no dia primeiro de Junho com a execução do tratamento superficial duplo (TSD). Um relatório fotográfico da execução é apresentado na Figura 38.

Após o controle de compactação (Tabela 16) e levantamento defletométrico do subleito, o PDP e o MFB foram misturados no pátio da oficina da prefeitura de Bozano, com uma carregadeira na proporção de 7 “conchas” de MFB para 3 “conchas” de PDP. A mistura foi transportada até a pista, descarregada e espalhada por uma motoniveladora em uma camada de 19 cm e umedecida. Quando iniciou-se a compactação, com rolo vibratório, o teor de umidade era igual a 8,5%, portanto ficando próximo do segundo pico da curva de compactação (Figura 37), os dados do ensaio de frasco de areia confirmaram que a massa específica aparente seca atingida em campo ficou próxima deste segundo pico (Tabela 16). A camada de base foi imprimada com asfalto diluído, CM-30 e revestida com um TSD.

Tabela 16: Resultados do ensaio de frasco de areia

Dados	Subleito	Base
Massa específica aparente úmida, campo – ρ_n	1.980 kg/m³	2.310 kg/m³
Umidade – w	22,89 %	3,84%
Massa específica aparente seca, campo – ρ_d	1.611 kg/m³	2.224 kg/m³
Massa específica aparende seca máxima - $\rho_{dmáx}$	1.467 kg/m³	2.174 kg/m³
Grau de compactação (%)	109,8 %	102,3%

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 38 – 1 a 24: Relatório fotográfico da execução e controle tecnológico

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

(8)

(9)

(10)

(11)

(12)

(13)

(14)

(15)

(16)

(17)

(18)

(19)

(20)

(21)

(22)

(23)

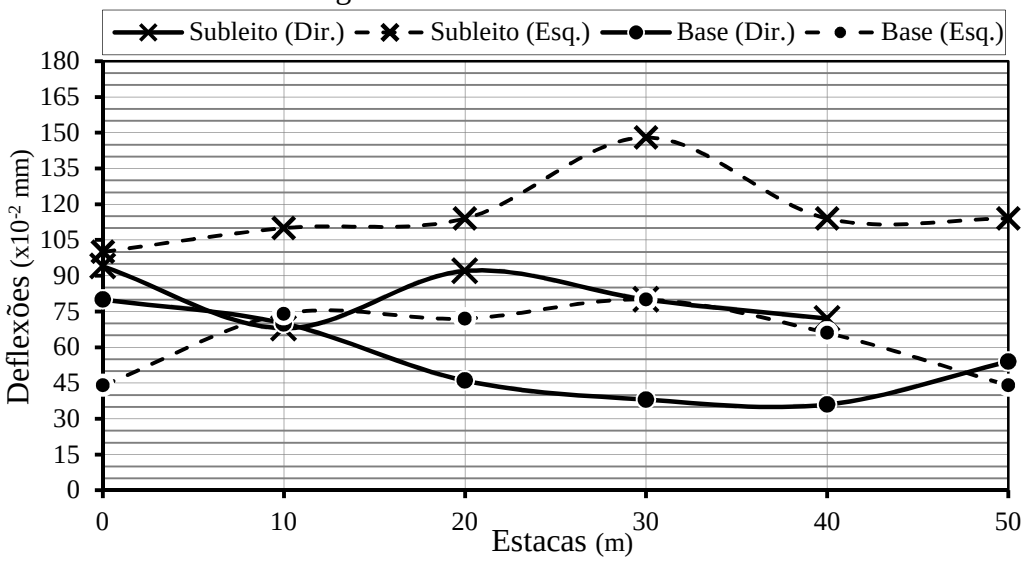
(24)

(25)

Fonte: Próprio autor (2012)

No subleito a média das deflexões no lado direito foi de 81 ($x10^{-2}$ mm) enquanto o lado esquerdo foi de 117 ($x10^{-2}$ mm). A execução da base acarretou numa redução das deflexões em ambos os lados do trecho (Figura 39). Os levantamentos defletométricos na base resultaram em deflexões médias de 54 ($x10^{-2}$ mm) no lado direito e 66 ($x10^{-2}$ mm) no lado esquerdo. De acordo com Bernucci et al (2008), para um pavimento com revestimento de tratamento superficial e base granular em boa condição estrutural, pode-se indicar um valor típico de deflexões na ordem de 80 (x 10-2 mm), portanto as deflexões levantadas após a execução da base asseguram um ganho de rigidez da estrutura e que esta tende a ter bom desempenho estrutural.

Figura 39: Levantamentos Defletométricos



Fonte: Próprio autor (2012)

3.2.3 Retroanálise

Os módulos da base e do subleito foram retroanalisadas a partir das bacias de deflexão levantadas a campo. Também foi calculado o Raio de curvatura das bacias pela Equação 10, encontrada na DNER-ME 024/94.

Equação 10: $R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$

onde:

R: raio de curvatura, em metros;

D_0 : deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro;

D_{25} : deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimos de milímetro

Tabela 17: Bacias de deflexão levantadas com a viga benkelman

Lado	**Estaca**	**Deflexões (x10^{-2} mm)**						**R**
		D_0	**D_{25}**	**D_{50}**	**D_{75}**	**D_{100}**	**D_{125}**	**(m)**
Direito	0	88	48	38	8	4	0	78,13
	10	70	30	14	14	14	14	78,13
	20	54	34	20	0	0	0	156,25
	30	40	20	2	0	0	0	156,25
	40	36	20	14	14	6	0	195,31
	50	68	48	32	16	8	0	156,25
	Média	**59,3**	**33,3**	**20,0**	**8,7**	**5,3**	**2,3**	**136,72**
Esquerdo	0	50	10	6	0	0	0	78,13
	10	54	40	14	0	0	0	223,21
	20	80	44	30	8	8	8	86,81
	30	90	50	30	20	0	0	78,13
	40	74	44	14	6	0	0	104,17
	50	60	38	38	20	6	6	142,05
	Média	**68,0**	**37,7**	**19,0**	**6,7**	**2,3**	**2,3**	**118,75**

Fonte: Próprio autor (2012)

O Raio de curvatura indica a capacidade de distribuição de tensões pelo pavimento, quanto menor o raio menor a área sobre a qual as forças estão sendo distribuídas. A DNER-

PRO 011/79, considera que valores de R maiores do que 100 m indicam uma boa capacidade estrutural. No lado direito a média dos raios foi 136,72 m e no lado esquerdo 118,75 m (Tabela 17), este resultado confirma o melhor comportamento defletométrico do lado direito apresentado na Figura 39. Embora 5 das 12 estacas apresentam raios entre 50 a 100 m, isto não indica um mau comportamento estrutural, pois os 100 m estão relacionados com pavimentos flexíveis que tenham mais de uma camada e revestimento de concreto asfáltico. Indica sim, que nestas estacas os esforços são distribuídos em áreas menores.

No geral os módulos retroanalisados para o lado direito, tanto do subleito como da base, são maiores do que os do lado esquerdo (Tabela 18 e Figura 40). A média dos módulos da base são 387,5 MPA para o lado direito e 293,8 MPA para o lado esquerdo. Para o subleito a diferença entre as médias foi menor sendo a média igual a 108,8 e 105MPA, para o lado direito e esquerdo, respectivamente. O fato dos módulos do lado direito serem superiores aos do lado esquerdo corrobora com o comportamento defletométrico anteriormente apresentado.

Para verificação destes resultados utilizou-se a Equação 11 proposta por Heukelom e Klomp (apud PAPAGIANAKIS e MASAD, 2008, p. 62), que relaciona o ISC com o módulo resiliente.

Equação 11: $M_r = 1500 \cdot ISC$

onde:

M_r: módulo de resiliência do material, lbf/in^2;

ISC : Índice de Suporte Califórnia, em %

Esta verificação foi efetuada somente para o subleito que tem na w_{ot} um ISC de 9,52%, efetuadas as devidas conversões, obtêm-se um módulo de 98,46 MPa que é muito próximo a média dos módulos retroanalisados, 106 MPa. Para a base, realizando o cálculo inverso, utilizando o módulo médio da pista, obtêm-se um ISC. de 32,93%.

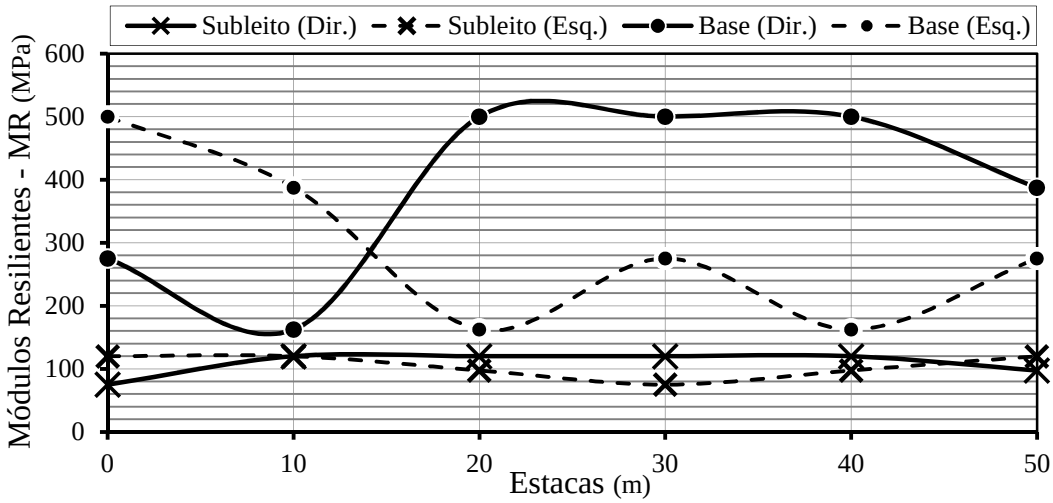
O valor do ISC calculado é inferior aos ISC obtidos para a mistura 70MF/PDP em laboratório, vale ressaltar que esta última foi compactada numa energia maior e que o módulo retroanalisado depende de uma resposta estrutural de toda a estrutura e não somente do material e, portanto, este I.S.C de 32,93% é uma estimativa do ISC da mistura empregada.

Tabela 18: Módulos retroanalisados

Lado	Estaca (m)	MR Base (MPa)	MR Subleito (MPa)
Lado Direito	0	275,0	75,0
	10	162,5	120,0
	20	500,0	120,0
	30	500,0	120,0
	40	500,0	120,0
	50	387,5	97,5
	Média	387,5	108,8
Lado Esquerdo	0	500,0	120,0
	10	387,5	120,0
	20	162,5	97,5
	30	275,0	75,0
	40	162,5	97,5
	50	275,0	120,0
	Média	293,8	105,0
Média da pista		**340,6**	**106,9**

Fonte: Próprio autor (2012)

Figura 40: Módulos retroanalisados *versus* estacas



Fonte: Próprio autor (2012)

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar, através de ensaios laboratoriais e de uma aplicação experimental, a reutilização do material fresado em camadas granulares de pavimentos flexíveis, a seguir são traçadas conclusões sob os 3 objetivos específicos do estudo.

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas do material fresado levaram as seguintes conclusões:

- O material gerado na fresagem das rodovias da região não se enquadrou em nenhuma faixa de estabilização granulométrica para materiais de base e sub-base;
- A granulometria do material após a extração do ligante tende a enquadrar-se dentro da faixa de projeto da mistura asfáltica;
- A granulometria do fresado e o fato deste não ser plástico, levam este material a apresentar curvas de compactação de forma irregulares no ensaio de Proctor;
- O material fresado com ligante sofre uma certa degradação quando compactado nas energias: intermediária e modificada, porém essa degradação é praticamente a mesma, sendo independente da energia utilizada;
- A degradação sofrida pelo fresado não afeta a sua resistência à penetração, pois o ISC aumenta com o aumento da energia de compactação.

Avaliou-se o comportamento mecânico de misturas do material fresado com pó-de-pedra em duas proporções, chegando as seguintes conclusões:

- As curvas de compactação destas misturas também apresentaram um formato irregular;
- Com o aumento do teor de pó-de-pedra na mistura (de 30% para 70%) obtêm-se massas específicas maiores e consequentemente um ISC maior.

Dentre estas misturas executou-se a campo a mistura que possibilitava a reutilização de um maior teor de fresado (70% de fresado para 30% de pó-de-pedra), observando-se que:

- Em campo foi possível compactar-se esta mistura com teores de umidade acima dos 6%;

- A energia intermediária foi apropriada para o controle de compactação desta mistura quando utilizam-se equipamentos de pequeno porte;
- Os módulos retroanalisados para esta mistura são maiores dos que relatado na literatura para materiais granulares, em campo.

Considerando-se todos os resultados, acredita-se que a mistura do material fresado com pó-de-pedra na proporção de 70% para 30%, respectivamente, seja uma solução ambientalmente correta, pois permite a reutilização de grande volume do material fresado, e técnica e economicamente viável, pois é de fácil execução a campo com equipamentos de pequeno porte para rodovias de baixo volume de tráfego.

O assunto estudado neste trabalho é bastante vasto, portanto, é necessário que se pesquise mais. A seguir são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

-Estudar outras formas de compactação como o *one-point vibrating hammer compaction test*.

-Realizar ensaios de módulo de resiliência para o material fresado e para a mistura aplicada na pista;

-Avaliar outras proporções de misturas do fresado com pó-de-pedra e/ou outro agredado (pedrisco por exemplo).

-Estudar misturas do material fresado com pó-de-pedra e um ligante hidráulico;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Luciana Michèlle Dellabianca. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 108 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 11 de Maio de 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. [S.I.], 1986. 9 p.

___.**NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. [S.l.], 1984. 6 p.

___.**NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. [S.I.], 1984. 84 p.

___.**NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. [S.l.], 1984. 3 p.

___.**NBR 7181**: solo: análise granulométrica. [S.l.], 1984. 13 p.

___.**NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. [S.l.], 1986. 10 p.

___. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982. 22 p.

___.**NBR 9895**: solo: índice de suporte califórnia. [S.l.], 1987. 14 p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BERNUCCI, Leidi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008. 501 p., il. color.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT).**Pesquisa CNT de rodovias 2012**. Disponível em <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Documents/Arquivos%202012/resumo_pd_2410.pdf> Acesso em: 01 de nov. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 024/94**: pavimento: determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994, 6 p.

___.**DNER-ME 049/94**: solos: determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 14 p.

___.**DNER-ME 053/94**: misturas betuminosas: porcentagem de betume. [S.l.], 1994, 3 p.

___.**DNER-ME 061/94**: pavimento: delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. [S.l.], 1994, 8 p.

___.**DNER-ME 083/98**: agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

___.**DNER-ME 084/95**: agregado miúdo: determinação da densidade real. [S.l.], 1995, 3 p.

___.**DNER-ME 092/94**: solo: determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia. [S.l.], 1994, 5 p.

___.**DNER-ME 129/94**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. [S.l.], 1994, 7 p.

___.**DNER-ME 195/97**: agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997, 6 p.

___.**DNER-ES 301/97**: pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

___.**DNER-ES 303/97**: pavimentação: base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

___.**DNER-ES 398/99**: agregados: índice de degradação após compactação proctor (IDp). Rio de Janeiro, 1999, 6 p.

___.**DNER-PRO 011/79**: procedimento: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. [S.l.], 1979, 16 p.

___.**DNER-PRO 120/97**: procedimento: coleta de amostra de agregado. [S.l.], 1997, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** DNIT. Rio de Janeiro, 2006, 310 p.

___.**DNIT 031/06-ES**: pavimentos flexíveis – concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006, 14 p.

ECHEVERRIA, José Antonio Santana. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de tráfego médio**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 09 de Junho de 2011.

FRANCO, Augusto Cinque de Proença Franco. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 2007. 315 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Setembro de 2007.

GOOGLE MAPS. Disponível em <https://maps.google.com/maps/ms?ie=UTF8&oe=UTF8&msa=0&msid=100838228403429679113.0004693e5f50ab44dfa5a >. Acesso em: 30 de nov. 2012.

LEE, Peter Y.; SUEDKAMP, Richard J. **Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils**. Highway Research Record, Washington, D.C., n 381, p. 1-9, 1972

MCGARRAH, Eric J. **Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate as Base Course Material**. 2007. 33 f. Relatório - Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Dezembro de 2007

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. 574 p., il.

MOREIRA, J. P. V; GOMES, A. C; PEREIRA, P. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. Lisboa, 2006.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials**. New Jersey: J. Wiley, 2008. 542 p., il.

PROCHASKA, A. B. et al. **A vibrating hammer compaction test for granular soils and dense graded aggregates**. In: TRB 84th Annual Meeting, Washington, D.C., 16 p., 2005

PORTO, Eliara Riasyk; RICHETTI, Lucas; ROSA, Francisco Dalla Rosa. **Caracterização de fresados para utilização como material alternativo em camadas de reforço do subleito em vias com baixo volume de tráfego**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17, 2011, Porto Alegre.

QUEIROZ, Flávio de Almeida. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –, Universidade Federal de Campina Grande.

THEISEN, Klaus Machado et al. **Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de *softwares* adaptados para FWD**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, XXIII, 2009, Vitória.

TRICHÊS, Glicério. ; SIMM JUNIOR, Guido Paulo. **O controle defletométrico durante o processo construtivo da rodovia como certificador da qualidade do pavimento executado**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, XVIII, 2004, Florianópolis.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de pavimentação**: volume 1. São Paulo: Pini, 1997. 746 p.

SILVA, João Paulo Souza. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011. 145 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) -Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 04 de Abril de 2011.

WIRTGEN. Disponível em < http://www.wirtgen.de/>.Acesso em: 10 de jun. 2012.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2 ed. New Jersey: J. Wiley, 1975. 711 p., il.