

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

Vinícius Ely

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA
RESISTÊNCIA E NA RIGIDEZ DE MISTURA RECICLADA
COM CIMENTO E COM ELEVADO TEOR DE FRESADO**

Porto Alegre
novembro 2014

VINÍCIUS ELY

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA
RESISTÊNCIA E NA RIGIDEZ DE MISTURA RECICLADA
COM CIMENTO E COM ELEVADO TEOR DE FRESADO**

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

Orientador: Washington Peres Nuñez
Coorientador: William Fedrigo

Porto Alegre
novembro 2014

VINÍCIUS ELY

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NA
RESISTÊNCIA E NA RIGIDEZ DE MISTURA RECICLADA
COM CIMENTO E COM ELEVADO TEOR DE FRESADO**

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

Porto Alegre, novembro de 2014

Washington Peres Nuñez
Dr. em Engenharia Civil pela UFRGS
Orientador

William Fedrigo
Engenheiro Civil pela UPF
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Angela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela University of Sheffield, UK

Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
DSc pela COPPE/UFRGS

Washington Peres Nuñez
Dr. em Engenharia Civil pela UFRGS

William Fedrigo
Engenheiro Civil pela UPF

Dedico este trabalho a meus pais, família e amigos, que me apoiaram durante este período da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, em especial aos meus pais, Cléris Elisabete Flach e José Ely Ely, que estiveram presentes em toda a minha vida escolar e acadêmica, sempre ao meu lado e me apoiando.

Agradeço ao professor Washington Peres Núñez pela oportunidade de ser meu orientador neste trabalho de conclusão e ao engenheiro civil e mestrando William Fedrigo pelo apoio e troca de experiências na área de Engenharia.

Agradeço ao pessoal dos laboratórios da UFRGS, em especial ao LAPAV, Lageotec e LEME, aos professores responsáveis pelos mesmos e aos bolsistas de iniciação científica, que atuam nestes laboratórios, que estiveram sempre disponíveis para auxílio nos ensaios.

Agradeço ao corpo técnico de engenharia da empresa INCORP – Consultoria e Assessoria, que me aguentaram durante este período exaustivo de dedicação ao meu trabalho de conclusão.

Eu sou feliz. Serei plenamente feliz, talvez, se chegar com sabedoria aos 60 anos. De qualquer forma, ainda tenho muita vida pela frente.

Ayrton Senna

RESUMO

Este trabalho aborda a reciclagem de pavimentos asfálticos com adição de cimento Portland, através de ensaios de laboratório, dando ênfase à energia de compactação utilizada na mistura de material fresado e brita graduada, oriundos de pavimentos existentes, com cimento Portland. Foram utilizadas duas energias de compactação para a realização deste trabalho: energia intermediária e energia modificada. Os materiais obtidos do trecho, revestimento e base, primeiramente foram caracterizados. A partir deste processo, foi realizado o ensaio de compactação, para a determinação da umidade ótima e a densidade específica aparente seca máxima da mistura dos dois materiais. Então, foram moldados 36 corpos de prova, os quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e de módulo resiliência. Foram adotados três tempos de cura (3, 7 e 14 dias) para os corpos de prova. Os resultados obtidos foram satisfatórios, porém, quando comparados com misturas semelhantes, mas com teor de material fresado inferior, as resistências e módulo de resiliência foram menores, salientando a influência do material fresado em reciclagem de pavimentos asfálticos com adição de cimento.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimentos asfálticos com adição de cimento.
Influência da energia de compactação utilizada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de relação entre as etapas do trabalho	16
Figura 2 – Camadas que caracterizam o pavimento rígido	20
Figura 3 – Transmissão de cargas em um pavimento rígido	20
Figura 4 – Camadas que caracterizam um pavimento flexível	21
Figura 5 – Transmissão de cargas em um pavimento flexível	21
Figura 6 – Formação do tronco de cone para o quarteamento do material fresado	26
Figura 7 – Quarteamento manual com a utilização de uma pá do material fresado	26
Figura 8 – Secagem do material fresado	28
Figura 9 – Amostra de material fresado dentro de um filtro de cone apoiado em um suporte metálico	29
Figura 10 – Ensaio de teor de ligante por refluxo	29
Figura 11 – Procedimento de determinação da umidade das amostras	30
Figura 12 – Mistura pronta para o ensaio de compactação	32
Figura 13 – Ensaio de compressão simples em andamento	35
Figura 14 – Ensaio de compressão diametral em andamento	37
Figura 15 – Ensaio de módulo de resiliência em andamento	38
Figura 16 – Gráfico do ensaio de granulometria do material fresado	40
Figura 17 – Gráfico do ensaio de granulometria da brita graduada	41
Figura 18 – Gráfico comparando os valores obtidos na granulometria da mistura com os limites estabelecidos pela WIRTGEN	42
Figura 19 – Curva de compactação para a energia intermediária	44
Figura 20 – Curva de compactação para a energia modificada	45
Figura 21 – Comparação das energias utilizadas e dos resultados	46
Figura 22 – Gráfico da resistência dos corpos de prova	48
Figura 23 – Gráfico com os módulos das amostras	49
Figura 24 – Resistência à compressão simples das misturas com diferentes teores de material fresado	51
Figura 25 – Resistência à tração por compressão diametral das diferentes misturas	52
Figura 26 – Módulo de resiliência das diferentes misturas	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Esquematização das limitações	15
Quadro 2 – Limites do manual da WIRTGEN em relação ao peso do material passante em cada peneira	27
Quadro 3 – Energias de compactação	31
Quadro 4 – Separação dos corpos de prova por tempo de cura, ensaio e energia de compactação	34
Quadro 5 – Resultado da granulometria do material fresado	39
Quadro 6 – Resultado da granulometria para a brita graduada	40
Quadro 7 – Resultado da soma dos percentuais referentes à mistura comparado com os limites da WIRTGEN	42
Quadro 8 – Teor de ligante do material fresado	43
Quadro 9 – Umidade de cada material	43
Quadro 10 – Dados referentes ao ensaio de compactação com energia intermediária	44
Quadro 11 – Dados referentes ao ensaio de compactação com energia modificada	45
Quadro 12 – Resultados do ensaio de compressão simples	46
Quadro 13 – Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova	47
Quadro 14 – Resultados do módulo de resiliência	49
Quadro 15 – Comparação dos resultados de compressão simples	50
Quadro 16 – Comparação dos resultados de compressão diametral	52
Quadro 17 – Comparação dos resultados de módulo de resiliência	53

LISTA DE SIGLAS

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

Concepa – Concessionária da Rodovia Osório Porto Alegre S/A

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Lageotec – Laboratório de Geotecnologia

Lapav – Laboratório de Pavimentação

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

PBT – Peso Bruto Total

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

h – teor de umidade, em porcentagem

P_h – peso da amostra úmida

P_s – peso da amostra seca em estufa na temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, até constância de peso

γ_h – massa específica aparente úmida

P'_h – peso úmido compactado

V – volume compactado

γ_s – massa específica aparente seca

R_{CS} – resistência à compressão simples

C_{rup} – carga de ruptura do corpo de prova

r – raio da base do corpo de prova cilíndrico

σ_r - resistência à tração

F – carga de ruptura

d – diâmetro do corpo de prova

MR – módulo de resiliência

CV – carga vertical repetida aplicada diametralmente

Δ – deformação elástica ou resiliente registrada

μ – coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.2.2 Objetivo Secundário	14
2.3 PRESSUPOSTO	14
2.4 PREMISA	15
2.5 DELIMITAÇÕES	15
2.6 LIMITAÇÕES	15
2.7 DELINEAMENTO	15
3 PAVIMENTAÇÃO	18
3.1 PAVIMENTOS RÍGIDOS	19
3.2 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	20
3.3 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS E INVERTIDOS.....	22
3.4 RECICLAGEM PROFUNDA	22
4 METODOLOGIA UTILIZADA	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	25
4.1.1 Quarteamento	25
4.1.2 Granulometria	27
4.1.3 Teor de Ligante	28
4.1.4 Determinação da Umidade	30
4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	30
4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	33
4.4 ENSAIOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO	34
4.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	34
4.4.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	35
4.4.3 Ensaio de Módulo de Resiliência	37
5. RESULTADOS	39
5.1 GRANULOMETRIA	39
5.1.1 Material Fresado	39
5.1.2 Brita Graduada	40
5.1.3 Mistura	41

5.2 TEOR DE LIGANTE	43
5.3 UMIDADE DOS MATERIAIS	43
5.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	44
5.4.1 Energia Intermediária	44
5.4.2 Energia Modificada	44
5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	45
5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ..	47
5.7 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	48
5.8 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	50
5.8.1 Resistência à Compressão Simples	50
5.8.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	51
5.8.3 Módulo de Resiliência	53
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma grande extensão territorial, o que dificulta o transporte de cargas. Para este traslado são utilizados diferentes modos de transporte, que se dividem em: ferrovias, hidrovias, aerovias, dutovias e rodovias. O desenvolvimento econômico que o País vem experimentando nos últimos anos tem aumentado de forma significativa o transporte de cargas pelo meio rodoviário. Este modal é responsável por transportar mais de 50% das cargas movimentadas no País.

Não apenas o número de veículos comerciais tem aumentado, como também os pesos brutos totais (PBT) e as cargas por eixo (registrando-se em postos de pesagem frequentes excessos de carga). Devido à falta de investimentos do governo nos outros modais e pela facilidade de acesso às rodovias, os pavimentos vêm sofrendo uma constante degradação.

Em resposta ao aumento das solicitações, em número e magnitude, o dimensionamento de pavimentos flexíveis resulta em espessuras cada vez maiores de camadas asfálticas. Há 20 anos, considerava-se que 10 cm de concreto asfáltico, sobre 20 ou 30 centímetros de base e sub-base granulares constituíam um pavimento “robusto”. Hoje, para que os pavimentos novos não rompam prematuramente por fadiga, dimensionam-se revestimentos com espessuras totais de camadas asfálticas próximas aos 20 cm.

Em consequência do uso excessivo do modal rodoviário no País, ocorre uma degradação maior na estrutura do pavimento. Essa degradação nas rodovias gera um consumo, quase que contínuo, de matéria prima de fontes não renováveis, como agregados e derivados do petróleo, além da disponibilidade de locais específicos para se depositar o material retirado da pista (bota-fora), os quais exigem licenciamentos ambientais.

Esse consumo excessivo de matéria-prima de fonte não renovável pode ser reduzido com a reciclagem de pavimentos asfálticos, em que são reaproveitados, em parte ou totalmente, os materiais utilizados na construção do pavimento e aos quais são adicionados outros constituintes, como por exemplo, o cimento Portland, para que esta nova camada seja estabilizada quimicamente.

Conforme afirma Souza (F. S. V. de, 2009, p. 12):

A reciclagem dos materiais de construção de pavimentos atinge todos os objetivos técnicos, sociais e econômicos ao prover rodovias seguras e eficientes, ao mesmo tempo em que reduz o impacto ambiental, apresentando menor consumo de energia quando comparada com a restauração convencional de pavimentos.

Atualmente o mundo esta se tornando mais ambientalmente sustentável, através de medidas simples, porém ao mesmo tempo complexas por serem alvos de diversos estudos. Essa sustentabilidade atinge diversos setores, entre eles, o da construção civil, seja na construção ou na manutenção de obras. A falta de consenso entre as normas existentes para a reciclagem de pavimentos flexíveis impede que o Brasil consiga aplicar uma manutenção de maneira sustentável.

Desta forma, este trabalho de conclusão visa contribuir com o esclarecimento de dúvidas que ainda existem com relação à reciclagem de pavimentos com cimento, principalmente no que diz respeito ao teor de material fresado incorporado à mistura e no efeito da energia de compactação sobre tais misturas.

O capítulo seguinte aborda as diretrizes deste trabalho de conclusão de curso, definido alguns parâmetros que foram adotados ao longo do projeto. O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre tipos de pavimentos, além de introduzir o processo de reciclagem de pavimentos.

No capítulo 4 são descritas as metodologias que foram utilizadas para a etapa de caracterização dos materiais utilizados e nos ensaios de laboratório. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos tanto na etapa de caracterização dos materiais, quanto os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as considerações finais do trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura com elevado teor de material fresado, brita graduada e cimento Portland?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação dos efeitos da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura com elevado teor de material fresado, brita graduada e cimento Portland.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é comparar os resultados obtidos em determinados ensaios com resultados de misturas com os mesmos materiais, porém com menores teores de material fresado.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que a reciclagem dos pavimentos flexíveis com a adição de cimento Portland é viável e sustentável e, portanto, exige estudos para a definição da melhor maneira de empregar tal técnica.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa de que a reciclagem de pavimentos flexíveis com a adição de cimento não possui norma específica sobre a dosagem mais adequada para sua utilização e, portanto, exige estudos para definição de diretrizes para empregar tal mistura de maneira correta.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo do material fresado fornecido pela concessionária Concepa e da brita graduada oriunda da rodovia RSC-453, obtida junto à empresa Traçado.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se à utilização de percentuais fixos de material fresado e brita graduada (70% de material fresado e 30% de brita graduada), duas energias de compactação e a realização de ensaios específicos, para determinação das características das misturas, como pode se observar no quadro 1.

Quadro 1 – Esquematização das limitações

	Ensaio de Compactação	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	Ensaio de Módulo de Resiliência
Adição de 4% de cimento Portland <i>compactado com energia modificada</i>	Sim	Sim	Sim	Sim
Adição de 4% de cimento Portland <i>compactado com energia intermediária</i>	Sim	Sim	Sim	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

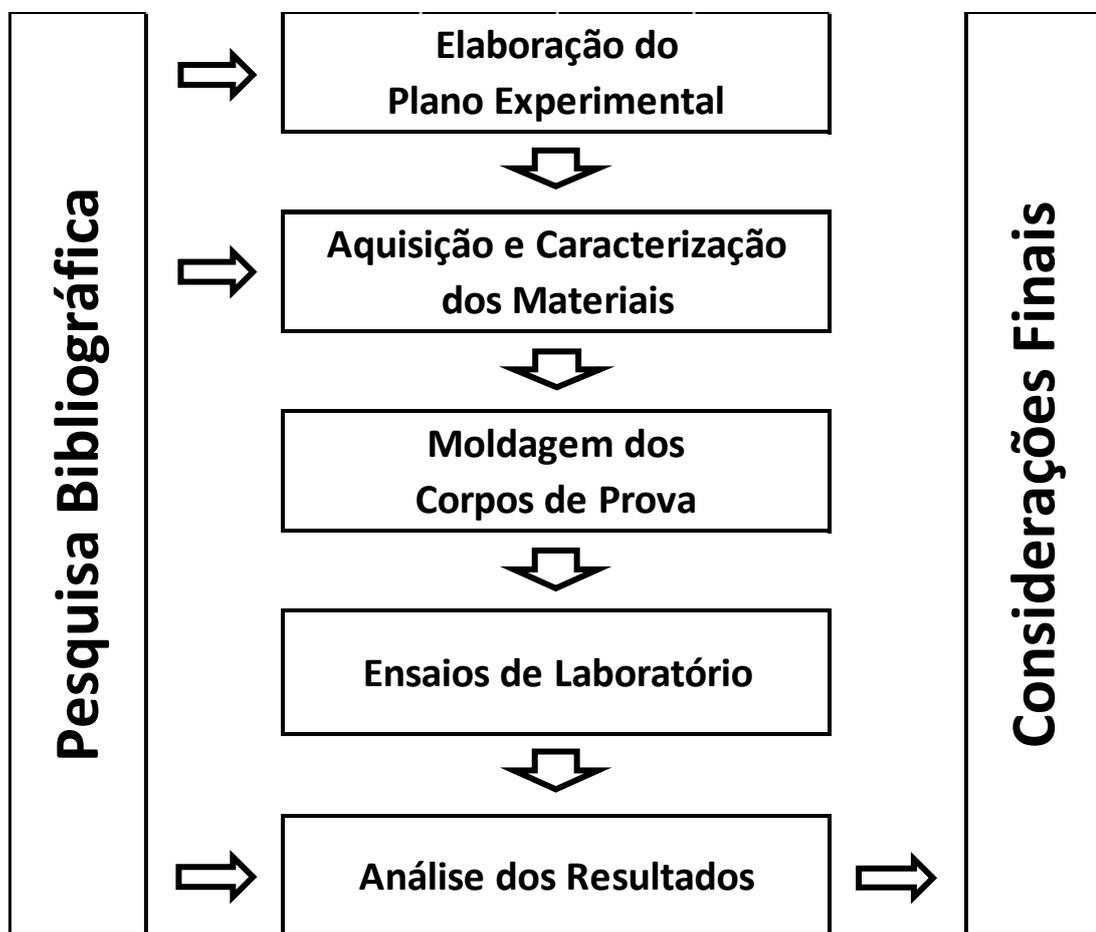
O teor de cimento é em relação ao peso seco da mistura dos materiais: material fresado e brita graduada.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental
- c) aquisição e caracterização dos materiais;
- d) moldagem dos corpos de prova;
- e) ensaios de laboratório;
- f) análise dos resultados;
- g) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama de relação entre as etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica tendo como objetivo obter um maior embasamento teórico sobre o assunto estudado, necessário para o desenvolvimento da pesquisa. Conforme apresentado na figura 1, a pesquisa bibliográfica esteve presente ao longo da elaboração do plano experimental e da análise dos resultados e foi baseada em informações sobre reciclagem de pavimentos flexíveis e suas propriedades.

A etapa de aquisição dos materiais consistiu em fazer contato com as empresas gaúchas de rodovias para a aquisição de material fresado e brita graduada. O cimento foi adquirido junto a uma empresa localizada na região metropolitana de Porto Alegre-RS, situada no município de Canoas. A caracterização foi realizada através de procedimentos de laboratório.

A moldagem dos corpos de prova foi uma etapa crucial para o projeto de pesquisa, pois nesta etapa foram moldados 36 corpos de prova para a realização de ensaios de laboratório com diferentes tempos de cura.

Os ensaios de laboratório foram realizados nos laboratórios da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), o Lageotec (Laboratório de Geotecnologia) que localiza-se no campus central, além do Lapav (Laboratório de Pavimentação) e do LEME (Laboratórios de Ensaios e Modelos Estruturais), que se localizam no campus do vale.

A partir dos ensaios de laboratório, foram analisados os resultados obtidos. Por fim, foram feitas as considerações finais sobre a influência da energia de compactação sobre a mistura e os resultados foram comparados com misturas semelhantes.

3 PAVIMENTAÇÃO

Souza (F. S. V. de, 2009, p. 5) comenta que:

O homem constrói caminhos e os mantém em condições de operação desde os tempos em que as comunidades humanas reconhecem os benefícios do comércio, ou seja, desde o momento em que os homens abandonaram seu modo de vida tribal e exclusivamente de subsistência para gozar de privilégios decorrentes da especialização da produção de bens e sua comercialização. A partir de então, as vias de transporte terrestre se fizeram progressivamente, absolutamente necessárias.

E Balbo (2007, p. 35) define pavimento (via de transporte) como:

[...] uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

Com o desenvolvimento econômico acelerado do Brasil, na última década, o transporte pelo meio rodoviário cresceu vertiginosamente no país, não só a quantidade de veículos, de passeio e de carga, como o PBT por eixo.

Durante os anos de expansão da malha rodoviária nacional se pensava apenas em custos iniciais, deixando de lado os custos a médio e longo prazo, no caso, manutenção e conservação das rodovias. Devido ao crescimento considerável no número de veículos e o peso transportado pelos mesmos, o pavimento acabou sofrendo uma degradação precoce (Oliveira, 2003, p. 1).

Com isso, o governo decidiu por terceirizar o setor rodoviário através de concessões para que a manutenção das rodovias fosse feita com qualidade. Balbo (2007, p. 30) ressalta que:

Na década 1990, o governo federal e os governos estaduais no Brasil engajaram-se em processo de concessão da operação e manutenção de rodovias à iniciativa privada. [...] a administração pública decidiu pela privatização da operação, como alternativa mais eficiente de garantia de investimentos privados no setor rodoviário.

Oliveira (2003, p. 6) comenta que “Os principais agentes externos responsáveis pela degradação do pavimento são as condições climáticas e as cargas dos veículos, principalmente se ocorrer em excesso.”

O pavimento tem como função principal transmitir os esforços causados pelo tráfego, em sua superfície, por suas camadas até atingir o subleito, sem causar deformações excessivas durante o percurso.

Como afirma Oliveira (2003, p. 5):

Geralmente a capacidade de suporte do subleito é pequena quando se levam em consideração as solicitações de tráfego rodoviário e, portanto é necessário reduzir as tensões verticais de compressão até os níveis que o terreno de fundação possa suportar sem que haja deformações excessivas na estrutura do pavimento.

Balbo (2007, p. 35) complementa que “Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.”. Além de transmitir os esforços do tráfego ao subleito, o pavimento ainda deve propiciar aos condutores conforto, boas condições de trafegabilidade e segurança.

Em relação ao pavimento, Oliveira (2003, p. 5) ressalta que “[...] [deve] oferecer aos usuários condições seguras e confortáveis de trafegabilidade.”, Balbo (2007, p. 15) ainda complementa que:

Ao se dar condição para uma via de melhor qualidade de rolamento, automaticamente proporciona-se aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, haja vista que os custos de operação e de manutenção dos veículos estão associados às condições de superfície dos pavimentos.

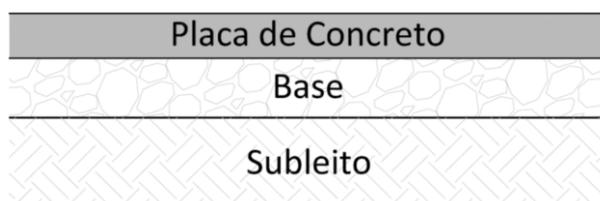
Pode-se dividir os pavimentos rodoviários em dois grupos: os rígidos e os flexíveis. Oliveira (2003, p. 6) define que:

A classificação do pavimento em flexível e rígido é baseada originalmente na intenção de separar os pavimentos constituídos por uma placa de concreto de cimento Portland daqueles construídos com bases granulares e capas com misturas betuminosas, representando assim uma excessiva simplificação.

3.1 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Souza (M. L. de, 1980, p. 9) comenta que “[os pavimentos rígidos] são os formados, predominantemente, por camadas que trabalham sensivelmente à tração. Exemplo típico são os pavimentos de concreto.”. A figura 2 mostra a seção transversal típica de um pavimento rígido.

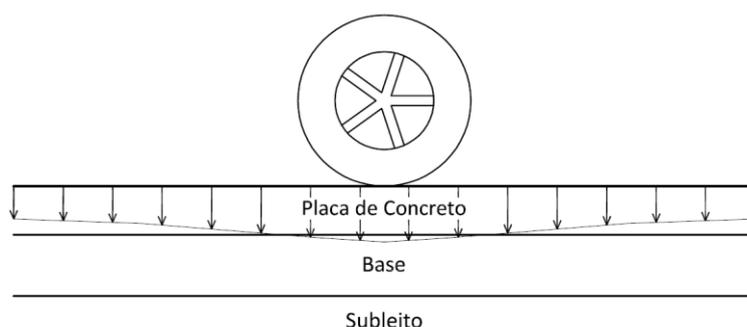
Figura 2 – Camadas que caracterizam o pavimento rígido



(fonte: adaptado de BALBO, 2007, p. 39)

Balbo (2007, p. 47) ainda conclui que “[...] em um pavimento rígido, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão da placa, o que proporciona menores magnitudes de esforços verticais (pressões) sobre o subleito.”. A figura 3 demonstra essa distribuição de esforços.

Figura 3 – Transmissão de cargas em um pavimento rígido



(fonte: adaptado de BALBO, 2007, p. 47)

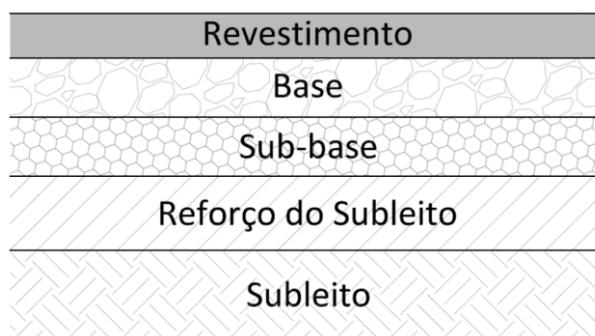
3.2 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Souza (M. L. de, 1980, p. 11) fala que:

Um pavimento flexível, dependendo das características de suporte do subleito, pode ser constituído dos seguintes modos diferentes:

- a) revestimento, base, sub-base e reforço do subleito [figura 4];
- b) revestimento, base e sub-base;
- c) revestimento e base;
- d) revestimento.

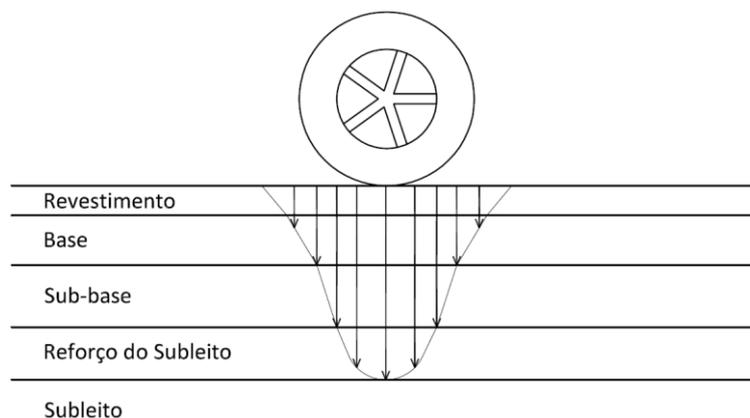
Figura 4 – Camadas que caracterizam um pavimento flexível



(fonte: adaptado de BALBO, 2007, p. 36)

Balbo (2007, p. 47) comenta que “[...] uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga.”. A figura 5 exemplifica essa transmissão de carga em um pavimento flexível.

Figura 5 – Transmissão de cargas em um pavimento flexível



(fonte: adaptado de BALBO, 2007, p. 47)

A manutenção do revestimento, em pavimentos flexíveis, muitas vezes é realizada através da simples adição de uma camada de revestimento sobre a(s) camada(s) de revestimento já existente(s), porém este processo às vezes se torna inadequado devido ao peso adicionado sobre as camadas de suporte já existentes ou ao greide do pavimento que deve ser mantido. Nestes casos, a fresagem (procedimento de trituração e remoção do pavimento asfáltico) do revestimento existente se torna fundamental para o perfeito funcionamento da estrutura do pavimento.

Conforme afirma Bonfim (2007, p. 65):

Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado

Em algumas situações, a fresagem se apresenta como a melhor opção para pavimentos que receberam sucessivos recapeamentos sem a retirada do revestimento anterior, com efetiva atuação no alívio do peso sobre pontes e viadutos ou no restabelecimento da altura original dentro de túneis, sob pontes e viadutos, para a colocação de nova camada de revestimento.

Existem diferentes técnicas para se executar o procedimento de fresagem no revestimento, conforme cita Bonfim (2007, p. 21): “Vários autores divergem quanto à classificação dos tipos de fresagem e suas aplicações; mas, de maneira resumida, pode-se classificar a fresagem de pavimentos quanto à espessura de corte e à rugosidade resultante na pista.”.

Entretanto, o essencial é que se tenha uma finalidade adequada para o material fresado. Este material pode ser depositado em locais devidamente apropriados e licenciados, neste caso, o bota-fora, ou ainda, pode ser utilizado para outros fins, um exemplo é a sua reutilização para a execução de uma restauração em algum pavimento.

3.3 PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS E INVERTIDOS

Além dos pavimentos tradicionais, rígidos e flexíveis, existem outros tipos de pavimentos como comportamento intermediário, estes são denominados pavimento semi-rígido e pavimento invertido.

Pavimentos semi-rígidos são compostos por uma camada de revestimento asfáltico executada sobre uma base cimentada pela adição de um composto aglomerante com características cimentícias (DNIT, 2006, p. 95). Já pavimentos invertidos são constituídos por uma base granular sobre uma sub-base estabilizada quimicamente, ambas recobertas por revestimento asfáltico.

3.4 RECICLAGEM PROFUNDA

A reutilização do material fresado e de materiais de camadas inferiores (base e, por vezes, sub-base) na reconstrução de um pavimento pode ser definida como reciclagem profunda do pavimento, como citam Bernucci et al. (2008, p. 188):

Quando um pavimento asfáltico em uso torna-se deteriorado estruturalmente, há necessidade de restaurar sua capacidade de carga através de colocação de espessuras adicionais de camadas ou através do corte de todo ou parte do revestimento deteriorado por equipamento especial – fresadora – e execução de nova camada de

revestimento asfáltico. O material gerado no corte pode ser reaproveitado por reciclagem.

Oliveira (2003, p. 23) ainda ressalta que:

Em alguns países já estão vigorando leis de caráter ambiental que obrigam o tratamento de resíduos em geral. Algumas legislações estabelecem que certas porcentagens deste material devem ser destinadas à construção e reabilitação de rodovias na forma de reciclagem ou se devem preferencialmente utilizar materiais reciclados, ao invés de explorar novas jazidas.

Essa reciclagem de um pavimento é viável do ponto de vista econômico e ambiental, visto que não é necessária a exploração de uma nova fonte de materiais para a aquisição de agregados nem a procura de um local adequado para a deposição do material fresado retirado da pista. Além disso, os custos diminuem drasticamente com o transporte de materiais.

Oliveira (2003, p. 24) afirma que:

A sociedade, cada vez mais consciente da questão ecológica, encontra na reciclagem profunda um processo de construção ambientalmente responsável e que proporciona economia de energia e de recursos naturais não renováveis, como o óleo combustível e a exploração de novas jazidas.

Apesar do processo de reciclagem ser sustentável, as propriedades mecânicas dos materiais que compõem a mistura, material fresado e material de camadas inferiores, não são mais as mesmas de quando da sua utilização para a construção do pavimento, por isso, a adição de aditivos à mistura (como o cimento Portland), torna-se fundamental para que a camada reciclada atue de forma correta.

Oliveira (2003, p. 53) afirma que “A estabilização química é um processo em que são adicionados agentes aglomerantes, tais como cimento Portland, [...] para aumentar a resistência do material reciclado através da coesão das partículas.”.

Nas obras de reciclagem profunda de pavimentos flexíveis, o cimento Portland é o agente estabilizante mais utilizado, isso devido a sua facilidade de obtenção em todas as regiões do Brasil (Oliveira, 2003, p. 29).

A realização da estabilização química deve ser feita com o controle da dosagem do agente estabilizante, pois não é a quantidade que torna a mistura resistente ou não, como salienta Oliveira (2003, p. 53):

Nessa modalidade de estabilização, a adição de maior quantidade de agente estabilizante para obter resistências mais elevadas pode ser prejudicial ao desempenho da camada. O material tratado à base de cimento tende a ser quebradiço, com uma conseqüente redução nas propriedades de fadiga da camada estabilizada. Isso leva à proliferação de trincas (por contração e pela ação do tráfego), e trincas nas camadas de pavimento são sempre indesejáveis.

A adição de cimento em quantidade errada pode prejudicar o desempenho da base reciclada, a adição de pouco agente estabilizante pode fazer com que esta base não atinja a resistência adequada, por outro lado, o excesso de cimento adicionado torna a base muito quebradiça (WIRTGEN, 2012, p. 114).

Quanto aos equipamentos utilizados na reciclagem do pavimento, Oliveira (2003, p. 76) cita que: “Os equipamentos utilizados no processo de reciclagem profunda são praticamente os mesmos usados na construção de rodovias. A patrulha mínima necessária compõe-se de recicladora auto propelida, motoniveladora e um ou mais rolos compactadores.”.

A modernização dos equipamentos deixa várias alternativas quanto ao tipo de recicladora que pode ser utilizada, Oliveira (2003, p. 77) comenta que: “Os fabricantes disponibilizam vários modelos de equipamentos de reciclagem par atender às exigências de mercado. As modernas recicladoras variam de médio a grande porte e com maior ou menor tecnologia embarcada.”.

Quanto às recicladoras utilizadas no país, Oliveira (2003, p. 79) destaca que: “As principais recicladoras que estão em operação no Brasil são as Caterpillar RR 250 e RM 350, Hamm RACO 250 e a Wirtgen WR 2500”.

As normas nacionais que regulamentam a reciclagem de pavimentos com adição de cimento são citadas abaixo (lembrando que tais normas divergem em diversos aspectos, deixando abertas lacunas que tendem a limitar o emprego da técnica):

- a) Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (2005): DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento;
- b) Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2006): DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita;
- c) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013a): Projeto de Norma DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos in situ com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.

4 METODOLOGIA UTILIZADA

Neste capítulo é apresentada a caracterização dos materiais utilizados e a metodologia empregada nos ensaios realizados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A etapa de caracterização dos materiais, que foram utilizados na moldagem dos corpos de prova, se dividiu em quatro fases:

- a) quarteamento;
- b) granulometria;
- c) teor de ligante;
- d) determinação da umidade higroscópica.

4.1.1 Quarteamento

Primeiramente, foi realizada a redução da amostra dos materiais para realização dos ensaios de laboratório. Esta redução foi realizada através de quarteamento, de modo a garantir que o material não perdesse sua representatividade.

O quarteamento foi realizado de forma manual, com a utilização do método B, de acordo com a norma DNER-PRO 199/96 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1996, p. 6), que descreve este método:

Colocar a amostra de campo sobre uma superfície [...]. Homogeneizar o material, revolvendo-o, no mínimo, três vezes. Na última virada, juntar a amostra com auxílio da pá, formando um cone. Achatar cuidadosamente, pressionando para baixo o ápice ou o topo, com a parte posterior da pá, de maneira a formar um tronco de cone [...] [figura 6]. Dividir a massa achatada em quatro partes iguais com a pá ou a colher de pedreiro [figura 7]. Remover duas partes diametralmente opostas, incluindo o material fino.

Figura 6 – Formação do tronco de cone para o quarteamo do material fresado



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 – Quarteamo manual com a utilização de uma pá do material fresado



(fonte: elaborado pelo autor)

A norma DNER-PRO 199/96 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1996, p. 6) ainda cita que pode-se: “[...] quartear sucessivamente o material remanescente, até que a amostra seja reduzida à quantidade desejada.”.

Essa etapa de quarteamo foi realizada tanto para o material fresado, quanto para a brita graduada. Com a quantidade reduzida, se deu continuidade ao processo de caracterização do material.

4.1.2 Granulometria

A granulometria é o procedimento adotado para ter conhecimento sobre o tamanho das partículas do material, bem como a massa de cada fração. Esta etapa foi realizada apenas por peneiramento, seguindo o prescrito no método de ensaio DNER-ME 083/98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1998), visto que os materiais são de natureza essencialmente graúda. A partir da granulometria de cada material, pode-se traçar a curva granulométrica da mistura, que deve se enquadrar aos limites da WIRTGEN (2012), mostrados no quadro 2.

Quadro 2 – Limites do manual da WIRTGEN em relação ao peso de material passante em cada peneira

Peneira	Limites Wirtgen %	
	Grossa	Fina
50	100	100
38	85	100
25	72	100
19	60	100
12,5	50	100
9,5	42	90
6,3	35	80
4,8	30	72
2,4	21	56
1,2	14	44
0,6	9	35
0,4	7	31
0,3	5	27
0,15	3	21
0,075	2	18

(fonte: WIRTGEN, 2012, p. 130)

Para a realização desta etapa foi necessário retirar a umidade existente nas amostras, para isso foram utilizados métodos diferentes para o material fresado e para a brita graduada.

Antes do início do procedimento de secagem, os materiais foram pesados em uma balança adequada. Esta pesagem foi realizada para que se pudesse determinar o teor de umidade da amostra, dado importante para a etapa de moldagem dos corpos de prova.

A brita graduada foi colocada em bandejas e armazenada em uma estufa, com temperatura constante de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Após a secagem do material, se deu continuidade ao ensaio de granulometria.

Com o material fresado não foi adotado o mesmo procedimento, pois esse material contém Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) que quando aquecido evapora, causando distorções na amostra do material, prejudicando o ensaio de granulometria e os ensaios posteriores. Por este motivo, o material fresado foi colocado em bandejas e deixado secar ao ar para reduzir a umidade da amostra, conforme mostra a figura 8.

Figura 8 – Secagem do material fresado



(fonte: elaborado pelo autor)

Com as amostras devidamente preparadas, foi obtida a granulometria da mistura, respeitando as proporções adotadas (70% de material fresado e 30% de brita graduada) e os limites do manual da WIRTGEN.

4.1.3 Teor de Ligante

O teor de ligante asfáltico do material fresado do revestimento foi determinado através da utilização do extrator por refluxo, de acordo com o método de ensaio DAER/RS-EL 213/01 (DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2001). Neste ensaio, faz-se uso de um solvente para retirar o ligante asfáltico aderido aos agregados, o solvente

utilizado foi o tricloroetileno. A figura 9 apresenta a amostra de material fresado preparada para o ensaio e a figura 10 mostra a execução do ensaio.

Figura 9 – Amostra de material fresado dentro de um filtro de cone apoiado em um suporte metálico



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 – Ensaio de teor de ligante por refluxo



(fonte: elaborado pelo autor)

4.1.4 Determinação da Umidade Higroscópica

O procedimento de determinação da umidade higroscópica dos materiais foi realizado com a utilização de vasilhas para a secagem das amostras em estufa, a uma temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, por um período de 24 horas. A figura 11 mostra as vasilhas com os materiais antes de serem colocados na estufa.

Figura 11 – Procedimento de determinação da umidade das amostras



(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A finalidade deste ensaio é determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima da mistura (material fresado, brita graduada e cimento), para que os corpos de prova possam ser moldados sem que haja a variação de volume e a amostra atinja sua densidade máxima, para isso foram adicionados percentuais fixos de água para a realização do ensaio (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2013b, p.1).

As energias de compactação utilizadas foram a intermediária e a modificada. O quadro 3 mostra o número de golpes utilizados em cada energia, para cada camada compactada, num total de 5 camadas por corpo de prova do ensaio de compactação. Para realização do ensaio era utilizado tanto o cilindro quanto o soquete grande do ensaio de Proctor. Após a moldagem

de cada corpo de prova do ensaio, era retirada uma amostra do interior do mesmo para determinação da umidade.

Quadro 3 – Energias de compactação

	Energia de Compactação		
	<i>Normal</i>	<i>Intermediária</i>	<i>Modificada</i>
Número de Golpes por Camada	12	26	55

(fonte: elaborado pelo autor)

Para a determinação dos parâmetros de cada corpo de prova, foram realizados cálculos seguindo as fórmulas descritas na norma DNIT 164/2013-ME. A partir destes dados, gerou-se a curva de compactação, da qual se extraiu os parâmetros de compactação das misturas.

A fórmula 1 apresenta o cálculo da umidade:

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

h = teor de umidade, em porcentagem;

P_h = peso da amostra úmida;

P_s = peso da amostra seca em estufa na temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, até constância de peso.

A fórmula 2 apresenta o cálculo para a massa específica aparente úmida:

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

γ_h = massa específica aparente úmida, em g/cm^3 ;

P'_h = peso úmido compactado, em g;

V = volume compactado, em cm^3 .

A fórmula 3 apresenta o cálculo para a massa específica aparente seca:

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca, em g/cm^3 ;

γ_h = massa específica aparente úmida, em g/cm^3 ;

h = teor de umidade, em porcentagem.

A figura 12 mostra a mistura, com determinada porcentagem de água adicionada, para o ensaio de compactação.

Figura 12 – Mistura pronta para o ensaio de compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Com a determinação e caracterização de todos os parâmetros necessários, se deu início a moldagem dos corpos de prova.

Nessa etapa foram moldados 36 corpos de prova cilíndricos, sendo que para os ensaios de compressão simples foram utilizados moldes com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm e, para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência foram utilizados moldes com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura.

Os corpos de prova pequenos (10 x 6 cm) foram moldados em camada única, onde a quantidade total de mistura foi colocada no molde e compactada. Já os CPs grandes (10 x 20 cm) foram moldados em cinco camadas, sendo a quantidade total de mistura do molde dividida em cinco partes iguais e compactada.

Para ambas as moldagens, a compactação era dinâmica e o número de golpes do soquete era variável até que se atingisse a massa específica aparente seca máxima obtida a partir do ensaio de compactação, para isto, se controlava a altura de cada camada compactada.

No caso dos CPs com dimensões de 10 x 20 cm, após a realização da última camada, os CPs eram rematados com pasta de cimento para realizar a regularização da superfície. O processo de cura para todos os CPs moldados era realizado em câmara úmida. Foram adotados 3 tempos de cura para os ensaios: 3, 7 e 14 dias.

O quadro 4 mostra a quantidade de corpos de prova por tempo de cura e por ensaio, salientando ainda as energias utilizadas no projeto: intermediária e modificada. Lembra-se que para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência foram utilizados os mesmos 3 corpos de prova por tempo de cura.

Isto se deve ao fato do ensaio de módulo de resiliência não ser destrutivo, pois a carga aplicada é pequena comparada à carga de ruptura, assim, primeiramente se determinava a resistência à tração de um dos CPs (dado necessário para o ensaio de módulo de resiliência), então, os outros dois tinham seu módulo de resiliência determinado e também eram ensaiados à tração.

Quadro 4 – Separação dos corpos de prova por tempo de cura, ensaio e energia de compactação

Ensaio	Tempo de Cura					
	Energia Intermediária			Energia Modificada		
	3 dias	7 dias	14 dias	3 dias	7 dias	14 dias
Resistência à Compressão Simples	3	3	3	3	3	3
Resistência à Tração por Compressão Diametral (Módulo de Resiliência)	3(2)	3(2)	3(2)	3(2)	3(2)	3(2)

(fonte: elaborado pelo autor)

4.4 ENSAIOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO

Foram realizados os seguintes ensaios para caracterização mecânica das misturas:

- a) ensaio de resistência à compressão simples;
- b) ensaio de resistência à tração por compressão diametral;
- c) ensaio de módulo de resiliência.

4.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi baseado na norma rodoviária DNER-ME 201/94 e suas normas complementares. A norma DNER-ME 201/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1994, P. 2) tem como objetivo: “[...][fixar] o modo pelo qual deve ser executado o ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos[...].”.

A norma DNER-ME 201/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1994, P. 4) ressalta que para se obter os resultados: “ Calcula-se a resistência à compressão axial do corpo de prova dividindo a carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova[fórmula 4].”.

Utilizou-se uma prensa hidráulica digital para realização dos ensaios, esta realizava a aplicação de carga a uma velocidade de 0,25 MPa/s. Também eram utilizados discos de neoprene para promover a regularização das superfícies dos corpos de prova.

A fórmula 4 mostra o cálculo para resistência dos corpos de prova no ensaio de compressão simples.

$$R_{CS} = \frac{C_{rup}}{\pi \times r^2} \times 10 \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

R_{CS} = resistência do corpo de prova, em MPa;

C_{rup} = carga de ruptura do corpo de prova, em kN;

r = raio da base do corpo de prova cilíndrico, em cm.

A figura 13 mostra o ensaio de resistência à compressão simples em andamento.

Figura 13 – Ensaio de compressão simples em andamento



(fonte: elaborado pelo autor)

4.4.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com o que descreve a norma DNIT 136/2010 – ME.

Esta norma, DNIT 136/2010 – ME (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010b, p. 1), tem como objetivo: [...]prescrever] o modo pelo qual se determina a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, através do ensaio de compressão diametral.”.

No ensaio, coloca-se o corpo de prova com sua face cilíndrica entre dois frisos metálicos. Então, aplica-se uma carga a uma velocidade de deformação constante de 0,8 mm/s até a separação do CP em duas metades.

A norma DNIT 136/2010 – ME (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010b, p. 2) comenta que: “Com o valor obtido [a partir do ensaio] é calculada a resistência à tração do corpo de prova rompido por compressão diametral [fórmula 5].”.

A fórmula 5 mostra o cálculo para resistência dos corpos de prova no ensaio de compressão diametral.

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times h} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

σ_r = resistência à tração, em kgf/cm²;

F = carga de ruptura, em kgf;

d = diâmetro do corpo de prova, em cm;

h = altura do corpo de prova, em cm.

A figura 14 mostra o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em andamento.

Figura 14 – Ensaio de compressão diametral em andamento



(fonte: elaborado pelo autor)

4.4.3 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência é baseado na norma do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), a norma DNIT 135/2010 ME.

A norma DNIT 135/2010 – ME (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010a, p. 1) tem como objetivo: “[...] [prescrever] o modo pelo qual se determina o módulo de resiliência de misturas asfálticas, [...] utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida.”.

A relação entre a tensão de tração e a deformação específica recuperável representa o módulo de resiliência, segundo a norma DNIT 135/2010 – ME (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010a, p. 1-2).

O ensaio é realizado através da aplicação de cargas cíclicas em um corpo de prova previamente instrumentado com um transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear variable differential transducer*). A frequência de aplicação de carga é de 1 Hz (um ciclo de

carga por segundo) e a magnitude da carga aplicada é igual a 30% da resistência à tração por compressão diametral.

A fórmula 6 mostra o cálculo do módulo de resiliência feito a partir dos dados obtidos do ensaio.

$$MR = \frac{CV}{\Delta h} \times (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em kgf/cm²;

CV = carga vertical repetida aplicada diametralmente, em kgf;

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada, em cm;

h = altura do corpo de prova, em cm;

μ = coeficiente de Poisson.

A figura 15 mostra o ensaio de módulo de resiliência em andamento.

Figura 15 – Ensaio de módulo de resiliência em andamento



(fonte: elaborado pelo autor)

5 RESULTADOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos para a caracterização dos materiais bem como os resultados obtidos quanto aos ensaios realizados após a moldagem dos corpos de prova.

5.1 GRANULOMETRIA

O ensaio de análise granulométrica foi realizado para o material fresado e para a brita graduada, após foram analisados com os percentuais relativos da mistura, ou seja, 70% de material fresado e 30% de brita graduada (esses percentuais são em relação ao peso da mistura).

5.1.1 Material Fresado

O resultado obtido no ensaio de granulometria para o material fresado é mostrado no quadro 5.

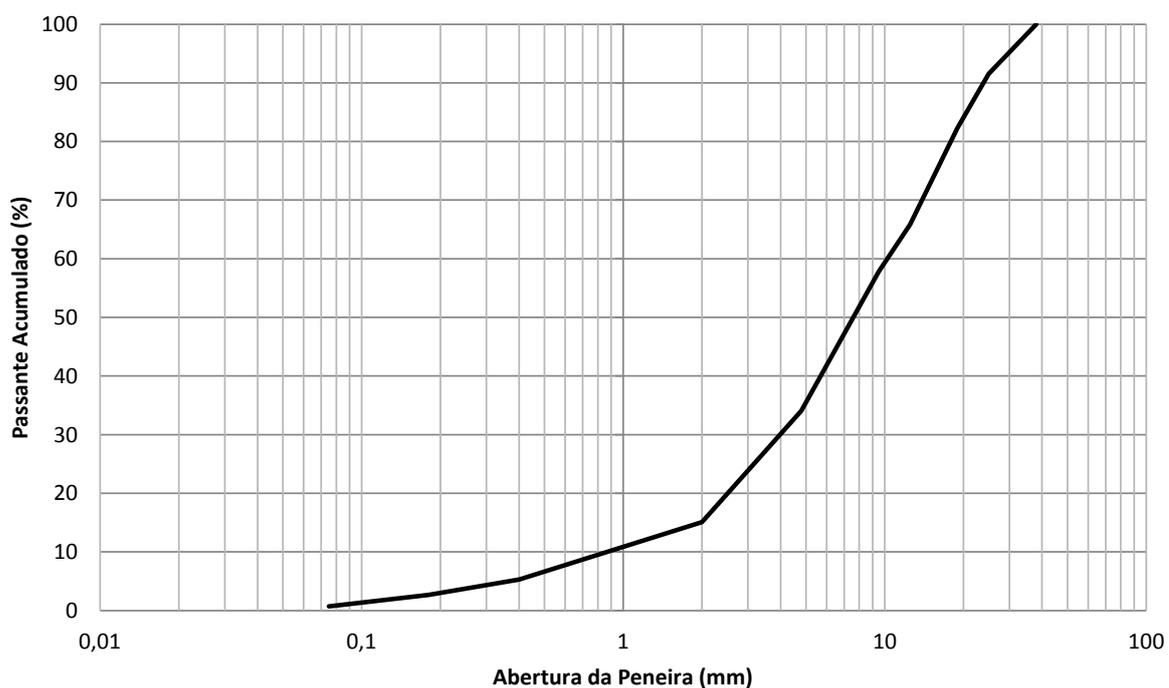
Quadro 5 – Resultado da granulometria do material fresado

Peneira	Passante	Passante Acumulado
	kg	
38	38,84	100
25	35,56	91,6
19	31,96	82,3
12,5	25,58	65,9
9,5	22,44	57,8
4,8	13,24	34,1
2	5,86	15,1
0,4	2,06	5,3
0,18	1,04	2,7
0,075	0,28	0,7
Passante	0,00	0

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados da tabela acima foi plotado um gráfico, a figura 16 mostra esse gráfico.

Figura 16 – Gráfico do ensaio de granulometria do material fresado



(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.2 Brita Graduada

O resultado obtido no ensaio de granulometria para o material fresado é mostrado no quadro 6.

Quadro 6 – Resultado da granulometria para a brita graduada

Peneira	Passante	Passante Acumulado
	<i>g</i>	%
38	227,67	100,0
25	938,03	91,6
19	638,60	82,3
12,5	926,23	65,9
9,5	903,60	57,8
4,8	1900,10	34,1
2	1870,43	15,1
0,4	1864,84	5,3
0,18	434,00	2,7
0,075	289,10	0,7
Passante	529,23	0

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados do quadro acima, foi plotado um gráfico, a figura 17 mostra esse gráfico.

Figura 17 – Gráfico do ensaio de granulometria da brita graduada



(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.3 Mistura

Com os resultados obtidos nos ensaios de granulometria de cada material, foi montada uma tabela com a soma dos percentuais relativos de cada material na mistura. O resultado pode ser visto no quadro 7, que ainda faz a comparação com os limites pré-estabelecidos pela WIRTGEN (2012).

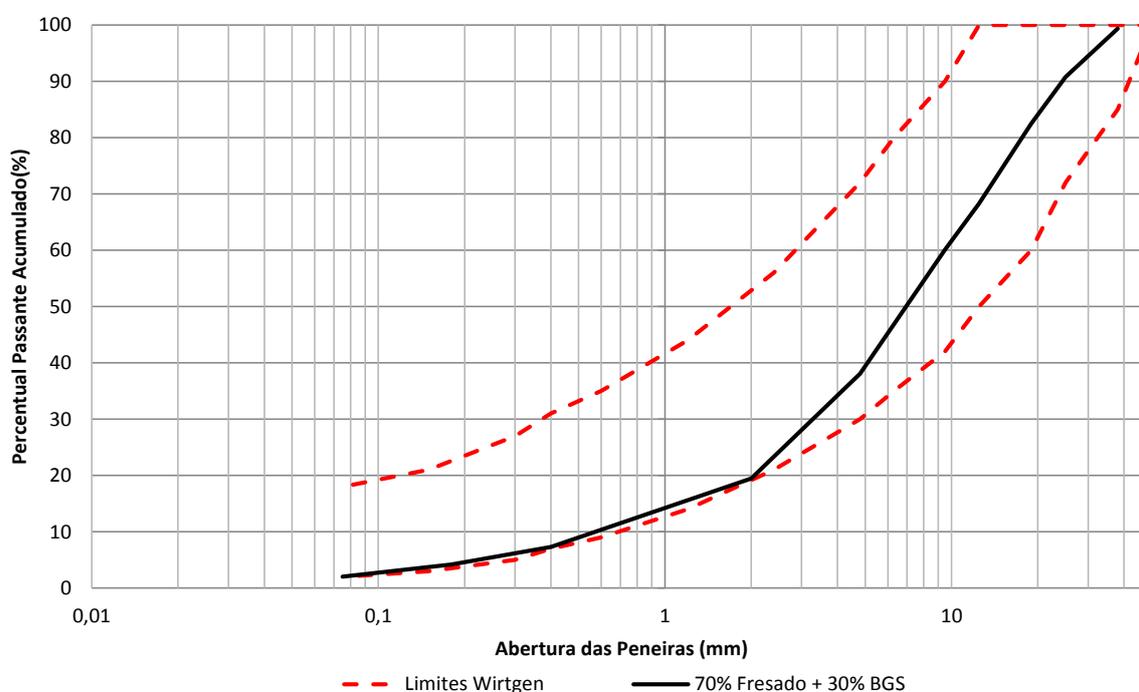
Quadro 7 – Resultado da soma dos percentuais referentes à mistura comparado com os limites da Wirtgen

Peneira	Limites Wirtgen %		Mistura
	Grossa	Fina	Passante
50	100	100	100,00
38	85	100	99,35
25	72	100	90,76
19	60	100	82,46
12,5	50	100	68,32
9,5	42	90	60,08
4,8	30	72	38,08
0,4	7	31	7,28
0,075	2	18	2,01

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se a figura 18, percebe-se que a granulometria da mistura (70% fresado + 50% BGS) enquadra-se nos limites granulométricos propostos pela WIRTGEN (2012).

Figura 18 – Gráfico comparando os valores obtidos na granulometria da mistura com os limite estabelecidos pela WIRTEGN



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 TEOR DE LIGANTE

O teor de ligante do material fresado é mostrado no quadro 8.

Quadro 8 – Teor de ligante do material fresado

Cone	Peso do Cone <i>g</i>	Peso massa inicial <i>g</i>	Cone + massa inicial <i>g</i>	Cone + massa final <i>g</i>	Teor de Ligante %	Média Teor de Ligante %
1	7,1	316,40	323,50	311,60	3,76	3,92
2	7,1	251,90	259,00	248,70	4,08	

(fonte: elaborado pelo autor)

O valor médio do teor de ligante foi de 3,92%, o teor de CAP tem influência à medida que se aumenta o teor de material fresado na mistura. Essa diferença poderá ser observada no subcapítulo 5.8.

5.3 UMIDADE HIGROSCÓPICA DOS MATERIAIS

A umidade higroscópica dos materiais é mostrada no quadro 9.

Quadro 9 – Umidade de cada material

Material	Amostra	Peso Cápsula <i>g</i>	Cápsula + Solo úmido <i>g</i>	Cápsula + Solo seco <i>g</i>	Umidade %	Umidade Média %
Material Fresado	1	120,8	254,7	253,4	0,98	1,00
	2	112,9	272,7	271,1	1,01	
Brita Graduada	3	100,7	292,1	285,7	3,46	3,50
	4	124,5	317,3	310,7	3,54	

(fonte: elaborado pelo autor)

Esta umidade foi de extrema importância para a moldagem dos corpos de prova, visto que esta umidade está presente nos materiais, devendo ser acrescentada apenas parte da umidade ótima obtida no ensaio de compactação.

5.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

5.4.1 Energia Intermediária

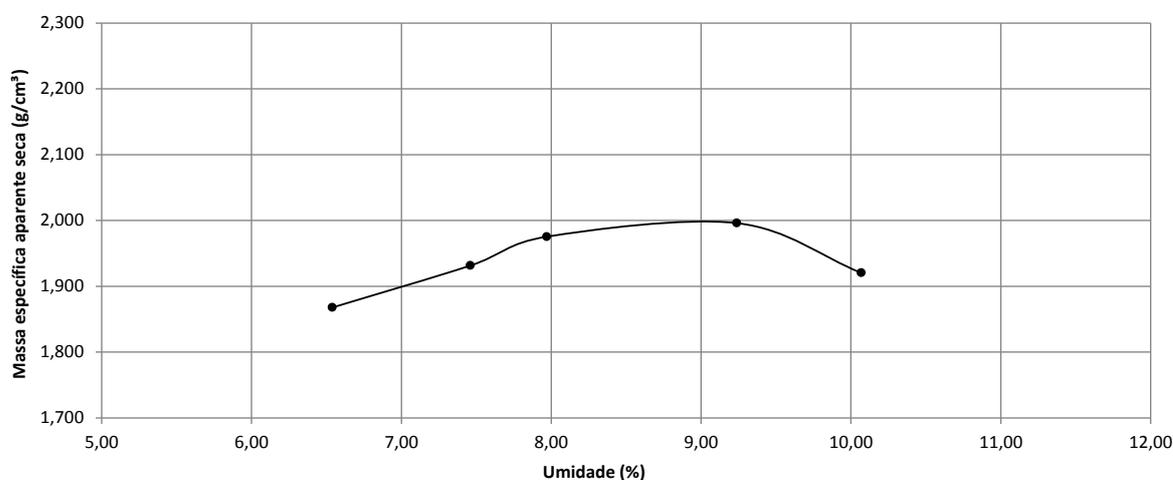
O ensaio de compactação com energia intermediária gerou uma umidade ótima no valor de 9% e uma massa específica aparente seca máxima no valor de 2 g/cm³, os dados do ensaio encontram-se no quadro 10 e a figura 19 demonstra o comportamento da curva.

Quadro 10 – Dados referentes ao ensaio de compactação com energia intermediária

Ponto	Peso total g	Peso (Ph) g	Umidade (hi) %	Peso cápsula g	Amostra úmida g	Amostra seca g	Umidade (hf) %	Massa específica (yh) g/cm ³	Massa específica (ys) g/cm ³
1	20060	4180	4	376,5	886,4	855,1	6,54	1,990	1,868
2	20240	4360	5	369,5	883,7	848	7,46	2,076	1,932
3	20360	4480	6	369,2	973,4	928,8	7,97	2,133	1,975
4	20460	4580	7	375	956,8	907,6	9,24	2,180	1,996
5	20320	4440	8	369,2	909,2	859,8	10,07	2,114	1,920

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Curva de compactação para a energia intermediária



(fonte: elaborado pelo autor)

5.4.2 Energia Modificada

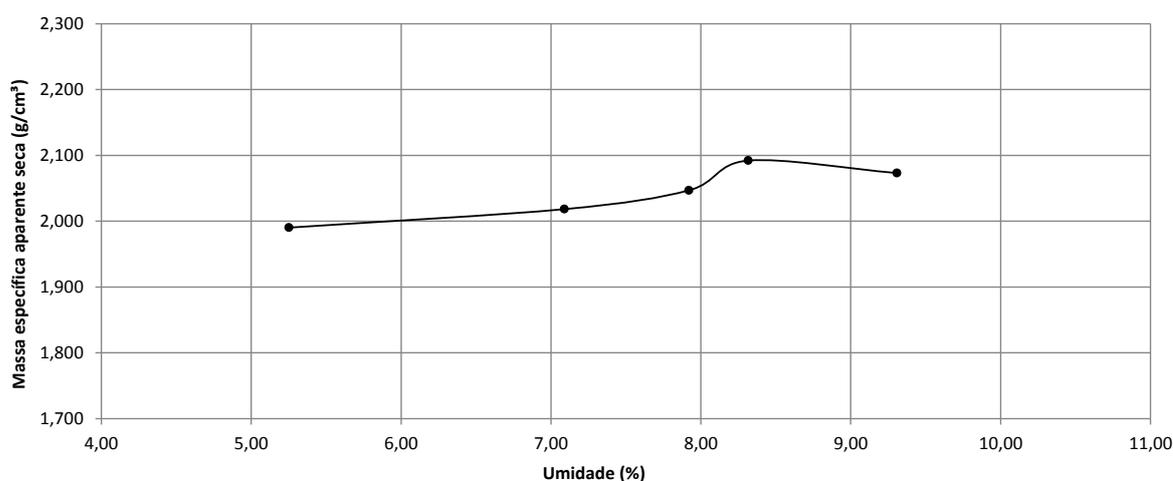
O ensaio de compactação com energia modificada gerou uma umidade ótima no valor de 8,4% e uma massa específica aparente seca no valor de 2,095 g/cm³, os dados do ensaio encontram-se no quadro 11 e a figura 20 demonstra o comportamento da curva. Percebe-se que a umidade ótima diminuiu e a massa específica aumentou com o aumento da energia de compactação, fato que era esperado.

Quadro 11 – Dados referentes ao ensaio de compactação com energia modificada

Ponto	Peso total g	Peso (Ph) g	Umidade (hi) %	Peso cápsula g	Amostra úmida g	Amostra seca g	Umidade (hf) %	Massa específica (yh) g/cm ³	Massa específica (ys) g/cm ³
1	20280	4400	4	375	898,1	872	5,25	2,095	1,990
2	20420	4540	5	369,8	889,4	855	7,09	2,161	2,018
3	20520	4640	6	369,6	920,1	879,7	7,92	2,209	2,047
4	20640	4760	7	376,6	889,7	850,3	8,32	2,266	2,092
5	20640	4760	8	369,5	876,8	833,6	9,31	2,266	2,073

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Curva de compactação para a energia modificada



(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A média dos resultados obtidos (três corpos de prova) no ensaio de resistência à compressão simples são mostrados no quadro 12, que identifica a energia utilizada na moldagem e o tempo de cura. Neste quadro também é apresentado o desvio padrão calculado, sendo este inferior a 10% do valor da média na maior parte dos casos, e o coeficiente de variação, que alcançou um valor máximo de 12% (abaixo de 25%, valor considerado como limite de representatividade de dados).

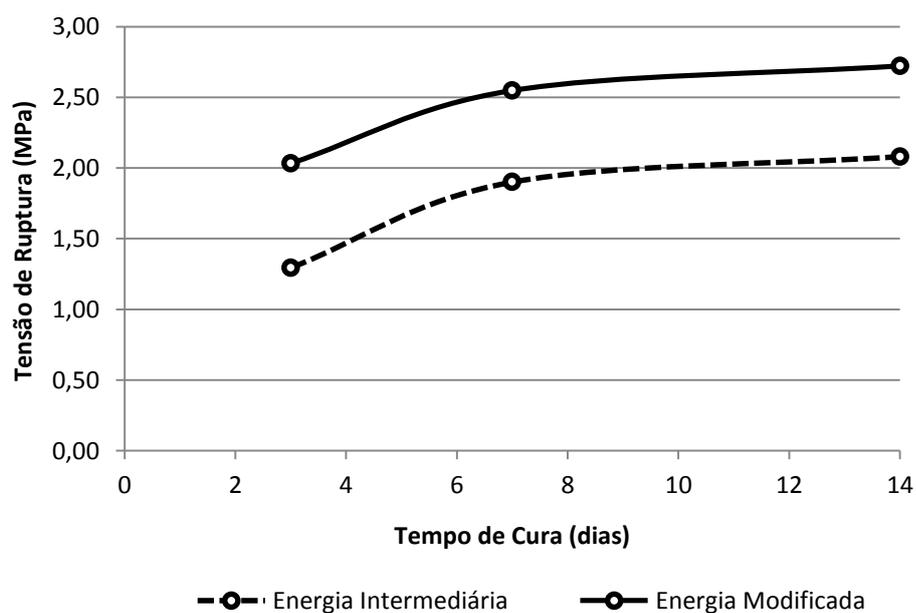
Quadro 12 – Resultados de resistência à compressão simples

Energia de compactação	Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Intermediária	3	1,29	0,16	12
	7	1,90	0,20	11
	14	2,08	0,06	3
Modificada	3	2,03	0,23	11
	7	2,55	0,07	3
	14	2,72	0,15	6

(fonte: elaborado pelo autor)

Notou-se, no comportamento das amostras, a influência da adição de cimento, que ao longo do tempo aumenta sua resistência. Também nota-se o efeito da energia de compactação, que ocasiona uma maior resistência quando do seu aumento. A figura 21 mostra o comportamento da mistura.

Figura 21 – Evolução da resistência à compressão simples das misturas com o tempo de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

5.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A média dos resultados obtidos para os três corpos de prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral está mostrada no quadro 13, que identifica a energia utilizada na moldagem e o tempo de cura. Assim como no quadro anterior, também são demonstrados o desvio padrão e o coeficiente de variação. Desta vez, existiu uma maior dispersão dos dados, obtendo-se maiores valores de desvio padrão e, por vezes, elevados coeficientes de variação.

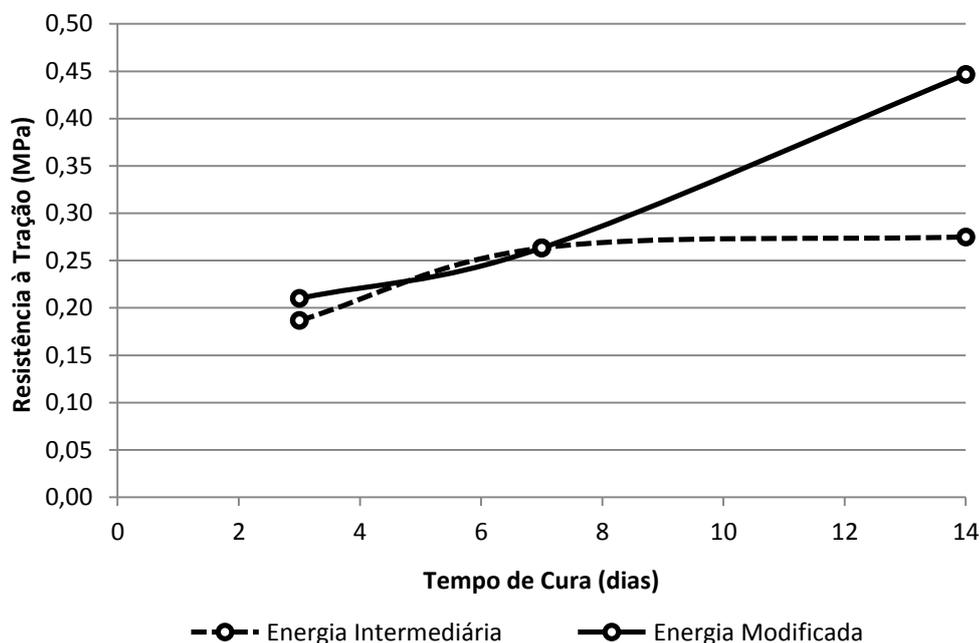
Quadro 13 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas

Energia de compactação	Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
Intermediária	3	0,19	0,04	21
	7	0,26	0,03	12
	14	0,28	0,02	7
Modificada	3	0,21	0,03	14
	7	0,26	0,02	8
	14	0,45	0,08	18

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados obtidos, a figura 22 mostra o gráfico resultante, onde é possível, novamente, visualizar o efeito do tempo de cura e da energia de compactação na resistência à tração das misturas. Fato interessante é o modesto ganho de resistência da mistura compactada com energia modificada, entre o período de 3 a 7 dias de cura, o que pode ser explicado por um eventual erro pontual na moldagem de tais corpos de prova.

Figura 22 – Evolução da resistência à tração por compressão das misturas com o tempo de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

5.7 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A média dos resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência (duplicata) é mostrada no quadro 14, que identifica a energia utilizada na moldagem e o tempo de cura. O quadro também apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação. Em duas ocasiões o valor do desvio padrão ultrapassou 10% do valor da média, ocasionando, assim, os valores mais elevados de coeficiente de variação.

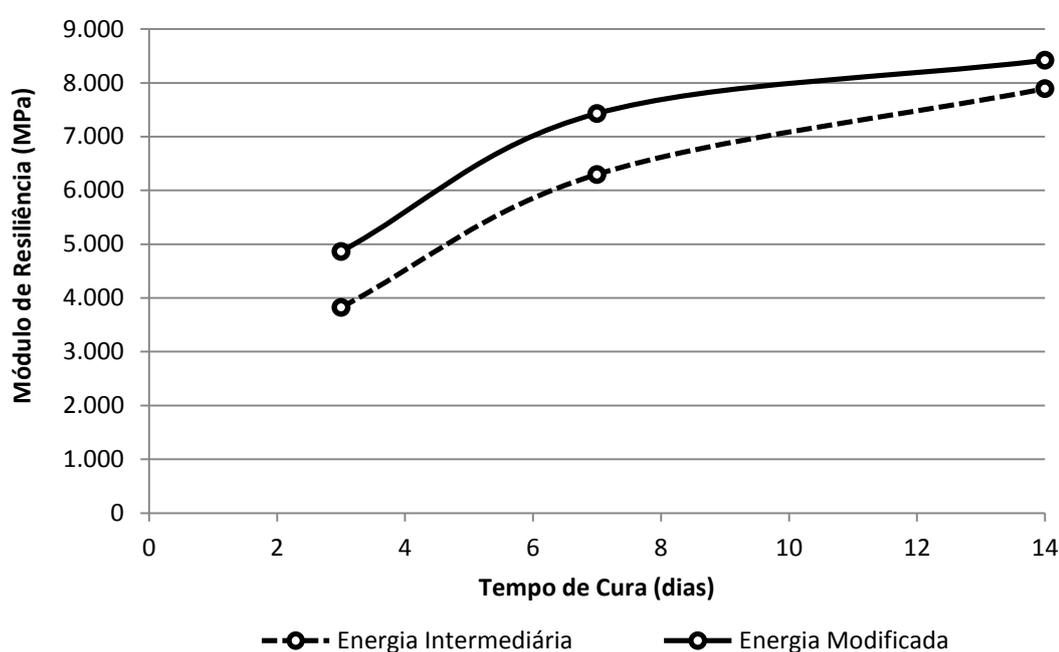
A figura 23 mostra o gráfico plotado a partir dos dados obtidos pelo ensaio. Neste gráfico, é possível observar a mesma tendência já observada para a resistência à compressão simples, na qual a rigidez (módulo de resiliência) da mistura aumenta com o tempo de cura e com a utilização de uma energia de compactação maior.

Quadro 14 – Resultados de módulo de resiliência

Energia de compactação	Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Intermediária	3	3825	230	6
	7	6298	870	14
	14	7892	166	2
Modificada	3	4865	223	5
	7	7432	1142	15
	14	8420	173	2

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 – Evolução do módulo de resiliência das misturas com o tempo de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

5.8 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Com objetivo de determinar a influência do elevado teor de material fresado na mistura, os resultados obtidos neste trabalho de conclusão foram comparados com resultados obtidos em uma dissertação de mestrado sobre o mesmo assunto (FEDRIGO, 2014), na qual se trabalha com o mesmo teor de cimento (4%) e com percentuais menores de material fresado na mistura. Esta dissertação está em desenvolvimento, portando apenas alguns resultados foram obtidos.

Destaca-se que o material fresado utilizado por Fedrigo (2014) é oriundo da rodovia RSC-453 (assim como a brita graduada), assim, não é o mesmo utilizado nesta pesquisa. Isto aconteceu pelo fato do material fresado da rodovia RSC-453 ter se esgotado anteriormente ao início da presente pesquisa.

5.8.1 Resistência à Compressão Simples

O quadro 15 mostra a resistência à compressão simples obtida para misturas com 20% e 50% de material fresado, além dos resultados obtidos neste trabalho de conclusão.

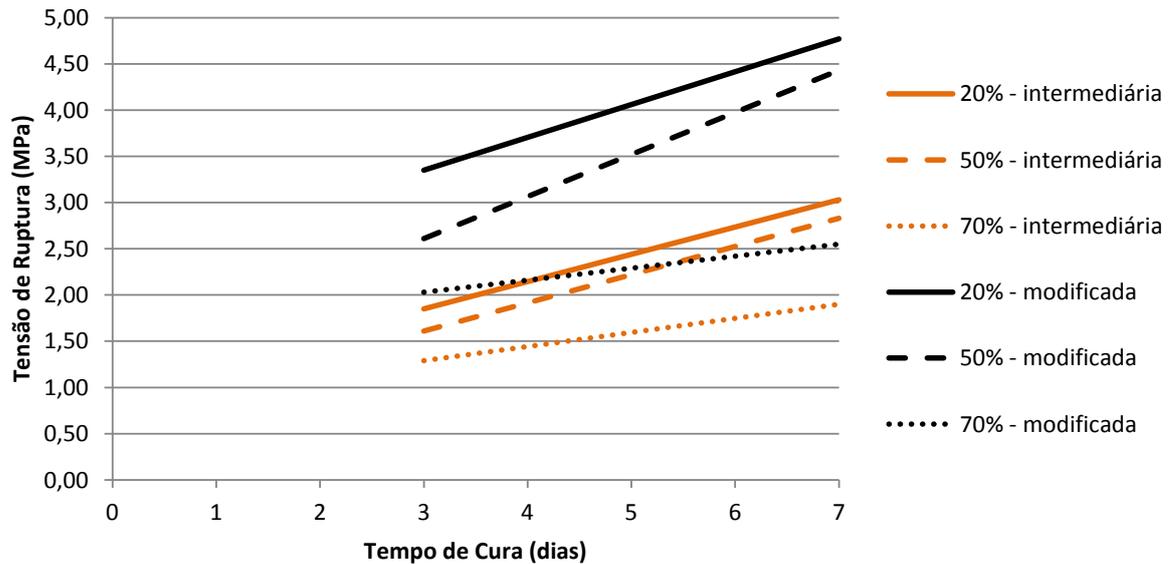
Quadro 15 – Comparação dos resultados de compressão simples

Energia	Tempo de Cura <i>dias</i>	Resistência (Mpa)		
		20% FRESADO	50% FRESADO	70% FRESADO
Intermediária	3	1,85	1,61	1,29
	7	3,03	2,83	1,90
Modificada	3	3,35	2,61	2,03
	7	4,77	4,43	2,55

(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

Para melhor comparação dos resultados, a figura 24 mostra o gráfico obtido a partir dos resultados do quadro 15.

Figura 24 – Resistência à compressão simples das misturas com diferentes teores de material fresado



(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

Com relação à resistência à compressão simples, analisando-se os diferentes percentuais de material fresado na mistura, notou-se que existe um crescimento natural da resistência a medida que se diminui a quantidade de material fresado na mistura. A energia de compactação utilizada também fez com que houvesse um ganho na resistência das misturas, quando utilizada uma energia mais elevada.

Tendência semelhante é reportada por Sufian *et al.* (2009) em trabalho onde os autores realizaram diversos ensaios com diferentes porcentagens de material fresado na mistura reciclada com cimento.

5.8.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O quadro 16 mostra a resistência à tração por compressão diametral obtida para misturas com 20% e 50% de material fresado, comparando com os resultados obtidos neste trabalho de conclusão.

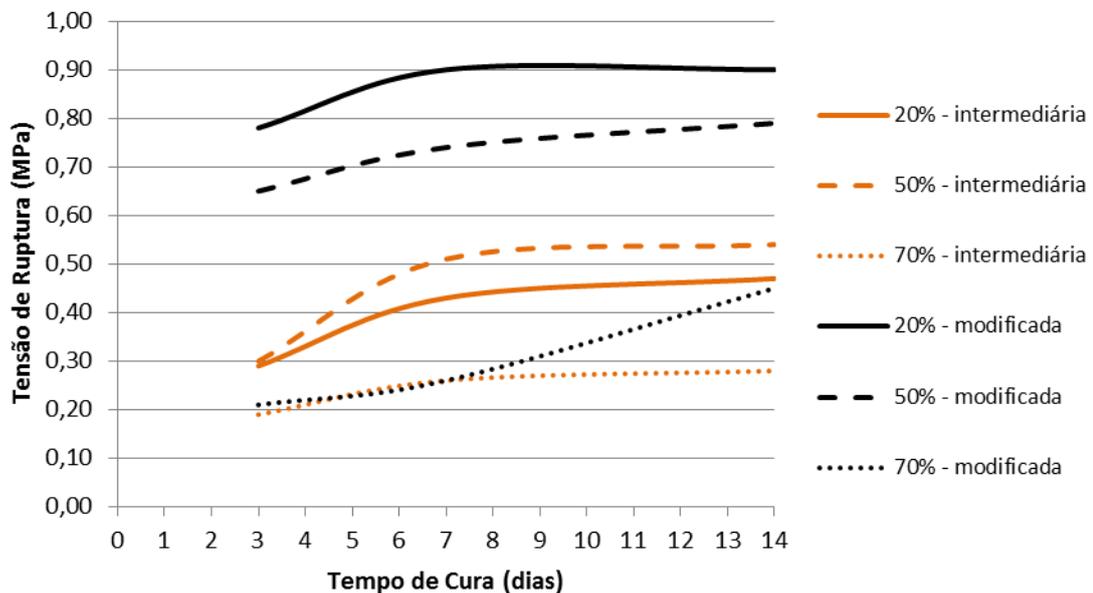
Quadro 16 – Comparação dos resultados de tração por compressão diametral

Energia	Tempo de Cura dias	Resistência (MPa)		
		20% FRESADO	50% FRESADO	70% FRESADO
Intermediária	3	0,29	0,30	0,19
	7	0,43	0,51	0,26
	14	0,47	0,54	0,28
Modificada	3	0,78	0,65	0,21
	7	0,90	0,74	0,26
	14	0,90	0,79	0,45

(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

Uma melhor comparação dos resultados pode ser realizada através da figura 25, que mostra os resultados obtidos para os diferentes tempos de cura e os diferentes percentuais de material fresado.

Figura 25 – Resistências à tração por compressão diametral das diferentes misturas



(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

Através da figura 25, percebe-se que existe um ganho de resistência à tração com a diminuição de material fresado na mistura, fato que também é relatado por Sufian *et al.* (2009). Pode-se notar também que, desta vez, a resistência da mistura com 50% de material fresado foi maior do que a da mistura com 20% de material fresado, quando compactados

com energia intermediária, salientando a importância da execução dos ensaios para a definição do melhor método de empregar essa mistura na reciclagem de pavimentos flexíveis.

5.8.3 Módulo de Resiliência

O quadro 17 mostra os valores de módulo de resiliência obtidos para misturas com 50% de material fresado, comparando estes resultados com os obtidos neste trabalho de conclusão.

Quadro 17 – Comparação dos resultados de módulo de resiliência

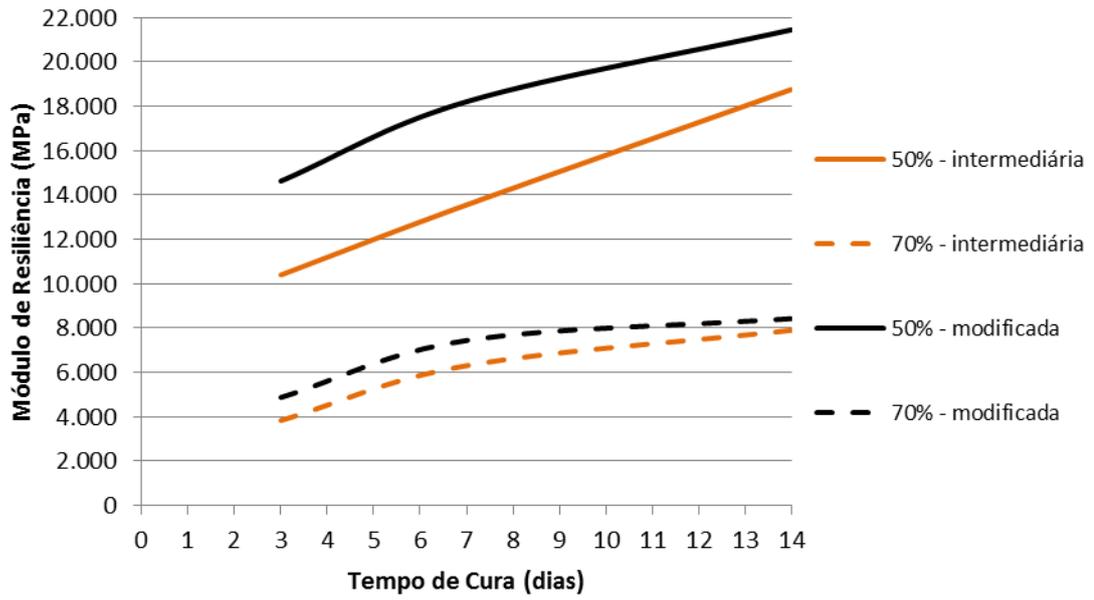
Energia	Tempo de Cura <i>dias</i>	Módulo de Resiliência (MPa)	
		50% FRESADO	70% FRESADO
Intermediária	3	10.390	3.825
	7	13.548	6.298
	14	18.755	7.892
Modificada	3	14.623	4.866
	7	18.205	7.432
	14	21.447	8.420

(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência podem ser comparados na figura 26, que mostra o gráfico plotado dos valores do quadro 17. Pode-se observar que o valor do módulo de resiliência aumenta expressivamente, quando o percentual de material fresado na mistura diminui de 70% para 50%. Essa tendência de redução do módulo de resiliência com o aumento de material fresado também foi apresentada por Sufian *et al.* (2009).

A energia utilizada na compactação da mistura também teve influência nos resultados, ocasionando o aumento do módulo de resiliência quando da utilização de energia modificada.

Figura 26 – Módulo de resiliência das diferentes misturas



(fonte: ELY, 2014; FEDRIGO, 2014)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos ensaios realizados neste trabalho de conclusão, se observou que a energia de compactação teve influência sobre os resultados de resistência e rigidez da mistura reciclada. Os corpos de prova compactados com energia modificada tiveram maior resistência e rigidez quando comparados com corpos de prova compactados com energia intermediária.

Do mesmo modo, a comparação realizada com misturas com teores menores de material fresado, mostrou a influência deste material nas propriedades das misturas, pois ao passo em que o teor de material fresado na mistura aumentava, a resistência e a rigidez diminuía. Também é possível afirmar que existe coerência nos resultados obtidos, já que outros pesquisadores, como Sufian *et al.* (2009), relataram resultados semelhantes, seguindo a mesma tendência. Pode-se observar também que a maior diferença de resistência e módulo de resiliência foi observada na comparação com a mistura com 70% de material fresado.

Assim, percebe-se que a reciclagem de pavimentos com adição cimento pode ser realizada mesmo que a porcentagem de material fresado na mistura exceda o limite de 50% (DNIT, 2013a). Entretanto, deve-se ter em mente que, quanto maior a porcentagem de material fresado, maior a influência sobre o comportamento mecânico da mistura, diminuindo, assim, a resistência e a rigidez da camada reciclada.

Como sugestão para pesquisas futuras recomenda-se a realização de ensaios de fadiga para determinar o comportamento à fadiga das misturas estudadas, fator determinante para o dimensionamento de camadas que trabalham principalmente à tração, como é o caso de camadas cimentadas.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008 (reimpr. 2010).
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção, 2007.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/035**: Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita. São Paulo, 22 p. 2006.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 33/05**: Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento. Curitiba, 13 p. 2005.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER/RS EL 213/01**: Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosas utilizando o extrator por refluxo. Rio Grande do Sul, 7 p. 2001.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 201/94**: Solo-cimento – compressão axial de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 4 p. 1994.
- _____. **DNER-PRO 199/96**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 7 p. 1996.
- _____. **DNER-ME 083/98**: Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 5 p. 1998.
- _____. **DNIT 135/2010 ME**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a.
- _____. **DNIT 136/2010 ME**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.
- _____. **DNIT 164/2013 ME**: solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013b.
- _____. **DNIT 167/2013 ES**: pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 11 p. 2013a.
- FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Proposição de um método de dosagem**. 2014. 88 p. Relatório de seminário (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- FEDRIGO, W.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland - Proposição de um método de dosagem. In: XXVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – **Anais...** Curitiba, 2014, 4 p.

OLIVEIRA, P. C. A. de. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Comissão de Pós Graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

SOUZA, F. S. V. de. **Avaliação do desempenho de pavimentos restaurados por meio de técnicas de reciclagem de materiais de pavimentação**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2009.

SOUZA, M. L. de. **Pavimentação rodoviária**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. v. 1.

SUFIAN, Z. et al. Full depth reclaimed pavements using cement and hydrated lime as stabilizing agents. In: 13th CONFERENCE OF ROAD ENGINEERING ASSOCIATION OF ASIA AND AUSTRALASIA – **Anais...** Incheon, 2009. 10 p.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio: Tecnologia de Reciclagem a frio Wirtgen**. Windhagen, Alemanha, 2012.