

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

**Gustavo Penz**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS SINTETIZADAS**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**GUSTAVO PENZ**

**PROPRIEDADE MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS SINTETIZADAS**

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

**Orientadora: Suyen Matsumura Nakahara**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**GUSTAVO PENZ**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS SINTETIZADAS**

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

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2010

Profa. Suyen Matsumura Nakahara  
Dra. pela EPUSP  
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. José Eduardo Mallmann (CIENTEC)**  
Me. pela Universidade do Rio Grande do Sul

**Prof. Jorge Augusto Ceratti (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Profa. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)**  
Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pela oportunidade e o apoio que me ofereceram durante meus estudos na universidade.

Agradeço a minha orientadora, Profa. Suyen, pela dedicação na orientação desse trabalho e toda a ajuda que vem me oferecendo desde então.

Agradeço a profa. Carin pelo trabalho desenvolvido na orientação das defesas e pelo tempo disposto às dúvidas.

Não posso deixar de agradecer todo pessoal do LAPAV que sempre se dispuseram na ajuda das práticas laboratoriais.

Agradeço aos responsáveis, que de alguma forma, contribuíram no fornecimento dos materiais necessários para a elaboração dos ensaios.

E por fim, agradeço a todas as pessoas que acreditaram e que me deram forças para minha formação.

[...] o melhor só se adquire à custa de um grande  
sofrimento...

*Colleen McCullough*

## RESUMO

PENZ, G. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Mornas com Adição de Zeólitas Sintetizadas**. 2010. 57 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre a produção de misturas asfálticas mornas produzidas com a adição de zeólitas sintetizadas a partir de resíduos da queima de carvão. A necessidade de se estudar esse tipo de mistura asfáltica esta ligada com questões ambientais, econômicas e de segurança, pois proporcionam vantagens em relação às outras misturas asfálticas. A partir de um estudo aprofundado sobre esse tema, foram realizados ensaios no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LPAV) com corpos-de-prova produzidos com zeólitas sintetizadas pela CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia). A dosagem e moldagem dos corpos-de-prova foram executadas através do método Marshall e foram determinados os parâmetros de resistência mecânica pela estabilidade Marshall, módulo de resiliência e resistência a tração estática. As misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil são produzidas a quente e a frio. As vantagens de se utilizar as misturas a quente em relação a fria esta na sua maior resistência aos esforços oriundos do tráfego de veículos. No entanto, as elevadas temperaturas nos quais estas misturas têm sido produzidas são responsáveis pelo envelhecimento do ligante, tornando-as susceptíveis ao trincamento e deformações, além de comprometer a saúde e segurança dos trabalhadores da área de pavimentação, aumentar o consumo energético nas usinas de asfalto e aumentar a emissão de gases provenientes da queima de combustíveis fósseis. Estas são razões suficientes para reduzir as temperaturas de produção de uma mistura asfáltica e, dentre os métodos existentes, misturas mornas executadas com a adição de zeólitas tem se mostrado uma ferramenta viável para este fim. As zeólitas utilizadas nesta pesquisa, além de ser uma alternativa na produção de misturas a temperaturas intermediárias, vem como uma solução para o uso de um resíduo sólido industrial de maior geração no sul do Brasil.

Palavras-chave: misturas asfálticas mornas; zeólitas; cinzas de carvão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: camadas do revestimento asfáltico .....	12
Figura 2: representação esquemática do delineamento da pesquisa .....	18
Figura 3: representação de curvas granulométricas .....	21
Figura 4: classificação de misturas asfálticas em função da temperatura de produção ..	27
Figura 5: usina de misturas asfálticas mornas, Kolo Veidekke, Noruega .....	27
Figura 6: zeólita natural Heulandita de Dois Irmãos .....	30
Figura 7: (a) face hexagonal de uma zeólita, (b) estrutura cristalina de uma zeólita .....	31
Figura 8: frações de agregados já misturados .....	36
Figura 9: zeólita produzida por Ferret (2004) .....	38
Figura 10: equipamento Brookfield .....	39
Figura 11: prensa Marshall .....	40
Figura 12: exemplo de curva Estabilidade x Fluência gerado pela prensa Marshall .....	41
Figura 13: estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral .....	43
Figura 14: exemplo de equipamento para ensaio de resistência à tração estática .....	43
Figura 15: esquema de equipamento para ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral .....	44
Figura 16: curva granulométrica da mistura asfáltica morna .....	48
Figura 17: características de projeto da mistura de compactação .....	49
Figura 18: resultados de RT .....	52
Figura 19: resultados de MR .....	52
Figura 20: resultados de MR/RT .....	53
Figura 21: desmembramento de CP no ensaio de perda por umidade induzida .....	54



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico .....	24
Quadro 2: distribuição granulométrica dos agregados .....	35
Quadro 3: características dos agregados .....	35
Quadro 4: características do ligante CAP 50/70 .....	36
Quadro 5: viscosidades e temperaturas de mistura e compactação .....	39
Quadro 6: composição granulométrica da mistura asfáltica morna .....	47
Quadro 7: características das misturas asfálticas convencionais e misturas mornas com adição de zeólitas .....	50
Quadro 8: limites para uso da mistura .....	50
Quadro 9: valores recomendados para estabilidade e fluência .....	51
Quadro 10: valores de RT e MR de misturas asfálticas com características diferentes ...	52

## **LISTA DE SIGLAS**

CA: Concreto Asfáltico

CAP: Concreto Asfáltico de Petróleo

CIENTEC: Fundação de Ciência e tecnologia

CP: Corpo-de-prova

DNER: Departamento Nacional de estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

MR: Módulo de Resiliência

RBV: Relação Betume/Vazios

RT: Resistência à Tração

UFRGS: Universidade do Rio Grande do Sul

$V_v$ : Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	16
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	16
<b>2.2.2 Objetivo Secundário</b> .....	16
2.3 HIPÓTESE .....	17
2.4 PRESUPOSTO .....	17
2.5 PREMISA .....	17
2.6 DELIMITAÇÕES .....	17
2.7 LIMITAÇÕES.....	17
2.8 DELINEAMENTO .....	18
<b>2.8.1 Pesquisa Bibliográfica</b> .....	18
<b>2.8.2 Programa Experimental</b> .....	19
<b>2.8.3 Modelagem dos corpos-de-prova segundo a Dosagem Marshall</b> .....	19
<b>2.8.4 Execução dos Ensaios</b> .....	19
<b>2.8.5 Análise dos Resultados</b> .....	19
<b>2.8.6 Conclusões</b> .....	19
<b>3 MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	20
3.1 PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	20
<b>3.1.1 Misturas Asfálticas a Quente</b> .....	20
<b>3.1.2 Misturas Asfálticas Mornas</b> .....	25
3.2 ZEÓLITAS .....	28
<b>3.2.1 Zeólitas Naturais</b> .....	29
<b>3.2.2 Zeólitas Sintéticas</b> .....	31
3.2.2.1 Processo Hidrogel .....	32
3.2.2.2 Processo de Conversão do Caulim .....	32
3.3 SÍNTESE HIDROTÉRMICA DE ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO .....	33
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS LABORATORIAIS</b> .....	34
4.1 MATERIAIS .....	34
<b>4.1.1 Agregados</b> .....	34
<b>4.1.2 Ligante asfáltico</b> .....	36
<b>4.1.3 Zeólita</b> .....	37

4.2 TEMPERATURA DE MISTURA E COMPACTAÇÃO .....	38
4.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	39
4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	42
<b>4.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4.2 Módulo de Resiliência .....</b>	<b>44</b>
<b>4.4.3 Perda por Umidade Induzida .....</b>	<b>45</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
5.1 TEOR DE PROJETO E DOSAGEM DAS MISTURAS .....	47
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	49
<b>5.2.1 Estabilidade Marshall .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.2 Resistência à tração e Módulo de resiliência .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2.3 Perda por umidade induzida .....</b>	<b>53</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>55</b>
REFERÊNCIAS .....	56



## 1 INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura formada por várias camadas de espessuras finitas assentes sobre uma fundação, o subleito, destinada a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e ao clima da região. O pavimento rodoviário pode ser classificado segundo seu tipo de revestimento: rígido, quando revestido em concreto de cimento Portland, e flexível, quando revestido com concreto asfáltico.

Os pavimentos asfálticos são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Os três últimos apresentam função estrutural. A camada de revestimento, que recebe os maiores carregamentos, tem a principal função de resistir aos esforços de tração, compressão, fadiga, possuir durabilidade e flexibilidade, ser impermeável e melhorar as condições de rolamento. O revestimento asfáltico é constituído pela associação de agregados e materiais asfálticos. Essa associação pode ser de duas maneiras principais: por penetração ou por mistura. No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido pelo ligante asfáltico na usina e transportado até o local da aplicação. Quando o revestimento é executado por penetração, o agregado e o ligante asfáltico são espalhados sucessivamente um sobre o outro e, posteriormente, compactados sem prévio mistura. Por razões econômicas, o revestimento asfáltico pode ser constituído por duas camadas distintas, conforme mostra a figura 1: capa ou camada de rolamento, mais rígida e fechada, e camada de ligação ou *binder*, que faz a ligação entre a base e a capa.

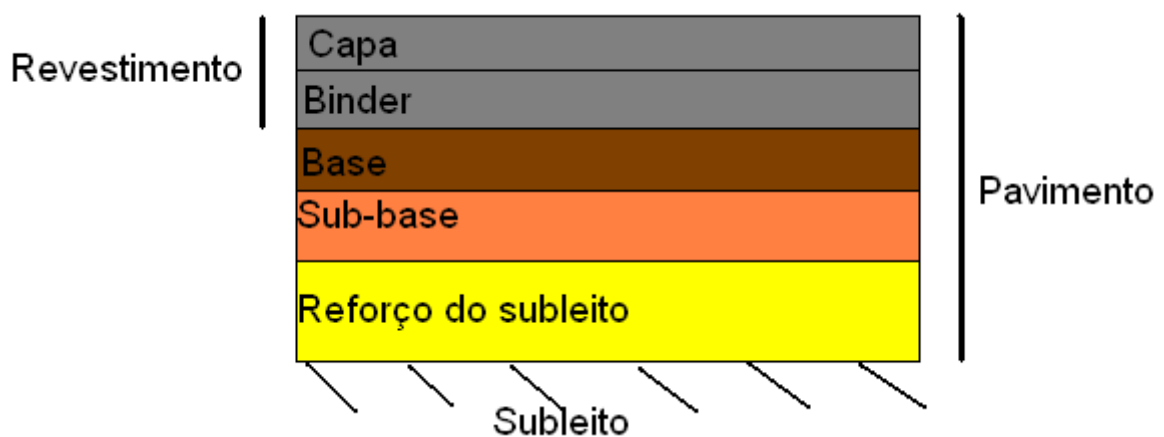


Figura 1: camadas do revestimento asfáltico

Até alguns anos, as misturas asfálticas eram produzidas de duas maneiras: misturadas a quente, com temperaturas em torno de 150 a 180°C, e a frio, misturadas em temperaturas ambientes. Em termos de qualidade de revestimentos asfálticos, as misturas a quente são superiores às misturas frias. As misturas asfálticas a quente são utilizadas como revestimento de rodovias em que se espera um elevado tráfego de veículos. Possuem uma resistência maior graças ao arranjo de partículas com granulometria bem-graduada e a quantidade ideal de ligante asfáltico. Já a utilização de misturas asfálticas a frio, em pavimentação, esta mais restrita às rodovias com um menor volume de veículos. Além disso, sua principal aplicação esta voltada para o recapeamento e operações de conservação e manutenção.

No entanto, a elevada temperatura utilizada para promover a união do ligante com o agregado, em misturas a quentes, é prejudicial em vários aspectos:

- a) emissão de poluentes, devido à queima de combustíveis fósseis para aquecer os agregados graúdos e o ligante, e para eliminar a umidade dos agregados finos;
- b) necessidade de um controle maior da temperatura desde a mistura na usina até sua aplicação em campo;
- c) pequeno espaço de tempo para a aplicação da mistura exigindo logísticas adequadas de transporte, etc.

Nesse contexto, a busca de um método capaz de atenuar as altas temperaturas na execução de misturas asfálticas a quente, conseguindo manter as mesmas propriedades mecânicas, vem despertando os pesquisadores para a descoberta de novas tecnologias. Nos últimos anos surgiram técnicas inovadoras capazes de reduzir em até 55°C a temperatura de produção e compactação de misturas asfálticas a quente. Estes novos métodos empregam diferentes meios mecânicos e químicos para reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura e melhorar o desempenho do pavimento. Segundo Soto et al. (2009 apud NAKAHARA et al., 2010a), em função da temperatura utilizada, as misturas asfálticas podem ser agrupadas em quatro tipos: quentes (entre 150 e 175°C), mornas (entre 100 e 140°C), semi-mornas (entre 60 e 100°C) e a frio (temperatura ambiente). Newcomb (2007 apud CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA OSÓRIO-PORTO ALEGRE S/A; UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2007, p. 6) afirma que as misturas asfálticas mornas foram desenvolvidas na década de 1990 com o objetivo de adequar os procedimentos empregados pela indústria da pavimentação às premissas do Protocolo de Kyoto.

A adição de zeólitas na mistura é umas das diversas tecnologias desenvolvidas para a produção de misturas mornas e que será o foco de estudo neste trabalho. Zeólitas são minerais naturais e que podem ser produzidas artificialmente. Sua estrutura é composta por canais e cavidades interconectadas de dimensões moleculares que permitem a passagem de água em seu interior. A quantidade de zeólitas existentes na natureza é bastante grande, porém, possuem um elevado teor de impurezas e nem sempre possuem as propriedades necessárias ao seu uso, devido a isso, elas começaram a ser sintetizadas. As vantagens de se inserir zeólitas, esta na redução da temperatura para a produção da mistura e compactação, através de um processo no qual cria um efeito de espuma no ligante reduzindo assim a sua viscosidade.

Neste trabalho serão estudadas as propriedades de misturas asfálticas mornas através de ensaios convencionais como estabilidade Marshall, determinação do módulo de resiliência (MR), determinação da resistência à tração (RT) e avaliação da perda de umidade induzida em corpos de prova executados com a adição de zeólitas sintetizadas pela CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia) a partir de resíduos da queima de carvão mineral.

No próximo capítulo é apresentado o método de pesquisa na qual apresenta as diretrizes do trabalho, essenciais para entender o que se espera como resultado da pesquisa, mostrando também, os objetivos principais e as limitações.

No capítulo três foi apresentada a revisão bibliográfica para mostrar o embasamento teórico sobre misturas asfálticas. Foi descrito brevemente sobre a produção de asfalto em temperaturas elevadas e ambientes, foram apresentadas as tecnologias mais conhecidas para a diminuição dessa temperatura na elaboração de misturas asfálticas mornas e discutido sobre o mineral zeólita, uma das tecnologias inovadoras e que será o método utilizado nos experimentos em laboratório.

No capítulo quatro são apresentadas as características encontradas nos materiais utilizados nos ensaios laboratoriais considerando sua origem, composição e métodos utilizados para sua denominação. Após, são descritos, sucintamente, cada um dos equipamentos que foram utilizados nos ensaios e também os métodos empregados para avaliação das características e propriedades mecânicas de misturas asfálticas produzidas com inserção de zeólitas.



No quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios utilizando temperaturas propostas nesse trabalho, diferenciando das convencionais, e adicionado zeólitas a partir de resíduos de carvão mineral, e uma análise desses resultados.

Posteriormente, são apresentadas as conclusões através da comparação das propriedades mecânicas encontradas na produção de misturas asfálticas a quente convencionais com as produzidas com temperaturas mais baixas e com zeólitas na sua composição.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes que determinaram o seu desenvolvimento.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

Com o presente trabalho é respondida a seguinte questão: adicionando zeólitas sintetizadas a partir de resíduos de carvão mineral na elaboração de misturas mornas, é possível obter as mesmas propriedades mecânicas encontradas nas misturas asfálticas a quente convencionais?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a comparação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas, com adição de zeólitas, com as de misturas asfálticas a quente convencionais a partir de ensaios de laboratório.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a determinação dos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração estática, módulo de resiliência, fluência, estabilidade Marshall e perda por umidade induzida de misturas asfálticas mornas realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que adicionando zeólitas sintetizadas a partir de resíduos de carvão mineral na elaboração de misturas mornas, é possível obter as mesmas propriedades encontradas nas misturas asfálticas a quente convencionais.

## 2.4 PRESSUPOSTO

Os ensaios de laboratório executados em misturas asfálticas a quente convencionais são válidos para caracterizar as misturas asfálticas mornas.

## 2.5 PREMISSA

Este trabalho faz parte de uma pesquisa em andamento de um convênio entre a CIENTEC e o LAPAV/UFRGS para validar o uso de resíduos de carvão mineral em camadas de pavimento, principalmente na preparação de misturas asfálticas.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de misturas mornas com adição de zeólitas sintetizadas a partir de resíduos de carvão mineral fornecidos pela CIENTEC.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a utilização das temperaturas de 120 e 95°C para a mistura e a compactação de corpos de prova, respectivamente, na elaboração de misturas asfálticas mornas;
- b) a adição de 0,3% de zeólitas na composição das misturas asfálticas mornas;
- c) a composição da mistura asfáltica com respeito a granulometria dos agregados segue a faixa C, segundo a norma DNIT 031/2006;
- d) o teor de ligante asfáltico usado na dosagem é de 5%.

## 2.8 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrangeu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do programa experimental;
- c) moldagem dos corpos-de-prova segundo a dosagem Marshall;
- d) execução dos ensaios;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões.

A figura 2 mostra a representação esquemática do delineamento.

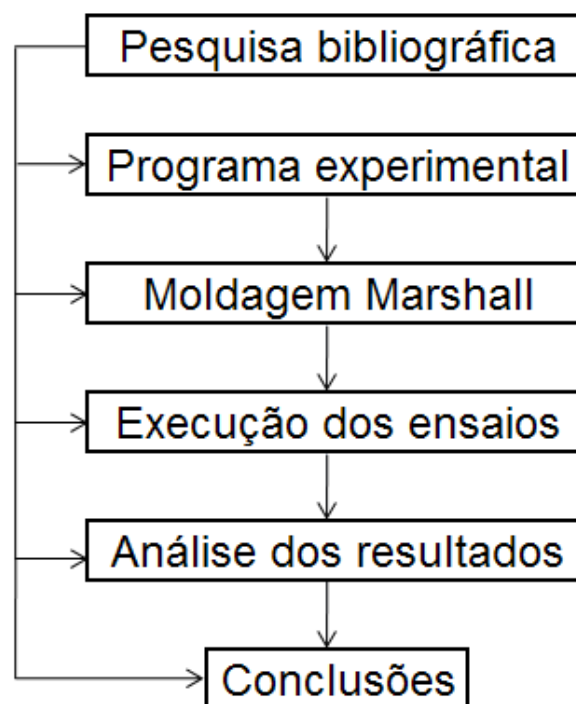


Figura 2: representação esquemática do delineamento da pesquisa

### 2.8.1 Pesquisa bibliográfica

Apresentou uma revisão sobre misturas asfálticas a quente convencionais e mornas com adição de zeólitas sintetizadas. Foi feita também uma revisão dos aspectos ligados ao comportamento mecânico das misturas asfálticas, tendo como foco a determinação do módulo de resiliência, resistência à tração e perda por umidade induzida.

## **2.8.2 Programa experimental**

Nesta etapa foram apresentados os materiais utilizados na confecção das misturas: agregados, o cimento asfáltico de petróleo e a zeólita. São detalhados os métodos aplicados nos ensaios bem como a quantidade necessária de corpos-de-prova estabelecida pela norma técnica para cada tipo de ensaio.

## **2.8.3 Modelagem dos corpos-de-prova segundo a dosagem Marshall**

Nessa etapa foi realizada a dosagem e moldagem de corpos-de-prova de mistura asfálticas mornas executados com zeólita sintetizada pela CIENTEC. Durante os procedimentos foram determinados os valores de densidade aparente, volume de vazios, relação betume e vazios, estabilidade e fluência das misturas asfálticas no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV/UFRGS).

## **2.8.4 Execução dos ensaios**

Os ensaios para caracterização mecânica das misturas asfálticas mornas foram realizadas no LAPAV/UFRGS. Os ensaios consistiram na determinação do módulo de resiliência, segundo a norma DNER 133/94, da resistência à tração estática, segundo a norma DNER ME 138/94 e a perda por umidade induzida, segundo a NBR 15617/98.

## **2.8.5 Análise dos resultados**

De posse dos resultados dos ensaios, será feita uma análise das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas encontrados nos ensaios e comparados com os resultados provenientes das misturas asfálticas a quente convencionais.

## **2.8.6 Conclusões**

Etapa que compreendeu a conclusão dos resultados obtidos e as considerações finais a respeito do assunto.

### **3 MISTURAS ASFÁLTICAS**

A crescente preocupação em se produzir misturas com maior economia e com menos impactos ambientais fez com que pesquisadores elaborassem novos métodos de fabricação de misturas asfálticas mantendo as mesmas propriedades mecânicas das misturas utilizadas atualmente. Neste capítulo são apresentados alguns desses métodos e a importância da temperatura e dos materiais na produção de misturas asfálticas.

#### **3.1 PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Nos capítulos seguintes são apresentadas as misturas asfálticas produzidas com diferentes temperaturas. São apresentadas suas características, vantagens e desvantagens e quais as maneiras diferentes de serem produzidas.

##### **3.1.1 Misturas asfálticas a quente**

Com o crescente volume de tráfego nas rodovias e o conseqüente aumento nos esforços transmitidos aos pavimentos, a camada de revestimento deve receber maior atenção já que é ela a que recebe diretamente todo o esforço aplicado. Portanto, as principais características para o bom desempenho de um revestimento, citadas por Bernucci et al. (2008, p. 157), são “[...] impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local.”.

As misturas asfálticas executadas para revestir pavimentos são constituídas pela associação de agregados e materiais asfálticos. O Instituto de Asfalto (1989, p. 81) definiu o agregado como sendo “[...] todo o material mineral inerte, resistente, usado nas misturas sob a forma de partículas ou fragmentos graduados. Inclui areia, pedregulhos, rocha britada, escória e pó-de-pedra.”.

O agregado mineral representa cerca de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume em misturas asfálticas. Esse material tem grande influência no desempenho dos pavimentos, e principalmente, quanto à capacidade de suporte de cargas. Para a escolha adequada de um

agregado é importante que se conheçam as propriedades geológicas da rocha de origem. Bernucci et al. (2008, p. 116), por exemplo, salientam a composição mineralógica, composição química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

O asfalto de cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um dos mais antigos materiais usados pela humanidade. Por ser um material impermeável e aglutinante, foi usado por diversos povos como material cimentante, impermeabilizante e de revestimento. Segundo Bernucci et al. (2008, p. 26), “O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo.”.

As misturas asfálticas a quente convencionais podem ser classificadas pela graduação dos agregados em densa (ou bem graduada), aberta, descontínua (ou com degrau), e uniforme. A figura 3 apresenta exemplos de curvas granulométricas de agregados usados na composição de misturas asfálticas a quente.

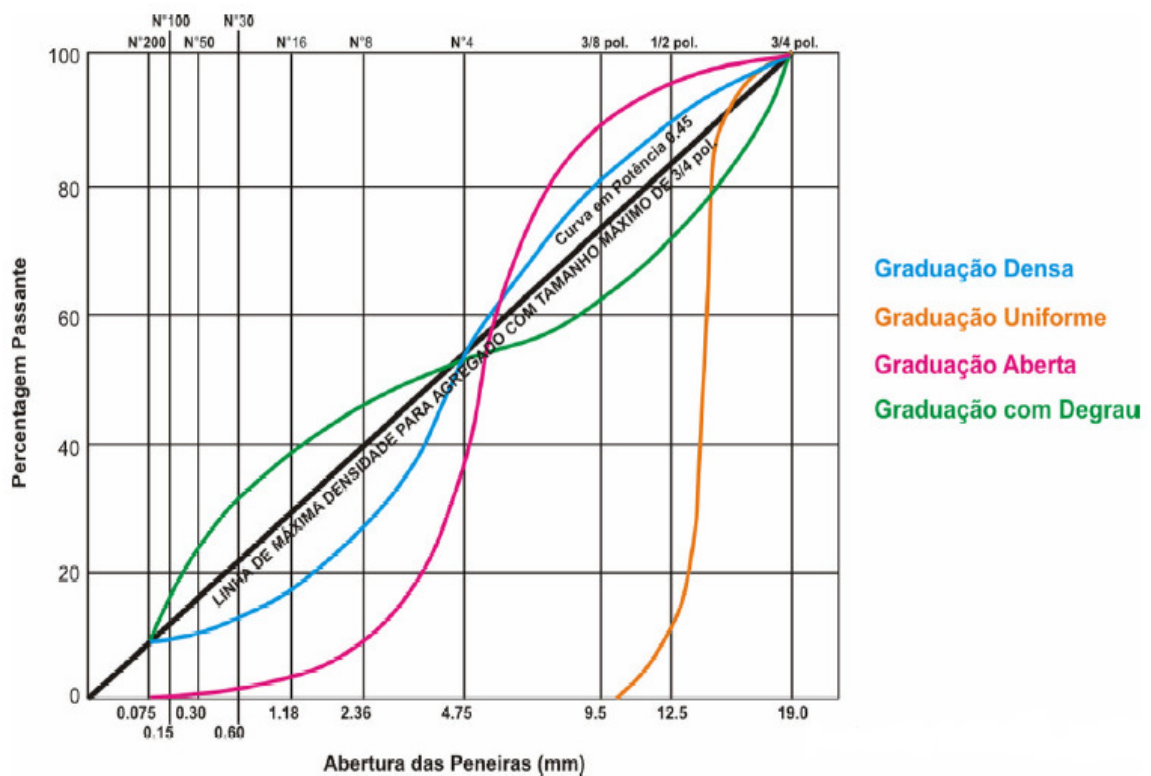


Figura 3: representação de curvas granulométricas (BERNUCCI et al., 2008, p. 123)

Na graduação densa quase não há vazios presentes entre os agregados, sendo que os menores grãos preenchem os espaços entre os mais graúdos, por exemplo, concreto asfáltico (CA). Na graduação aberta existem muitos vazios entre os agregados. São formados principalmente por grãos de mesmo tamanho e sem a presença de material fino formando uma estrutura bastante drenante como a camada porosa de atrito ou revestimento asfáltico drenante (CPA). Possui uma grande quantidade de vazios, entre 18 a 25%, preenchidos com ar por causa da pequena quantidade de fíler, materiais finos e ligante.

Na graduação uniforme os agregados possuem tamanhos praticamente iguais, representando uma faixa bastante estreita na curva granulométrica. Já a graduação descontínua, apresenta todos os tamanhos de agregados, porém, com predominância para os maiores grãos na qual forma uma estrutura bastante resistente às deformações permanentes, por exemplo, *Stone matrix asphalt* (SMA). Devido à ausência de finos na mistura SMA, a sua superfície se torna mais rugosa, estabelecendo assim, uma espécie de microdrenagem evitando a formação de lâminas de água em períodos chuvosos (BALBO, 2007, p. 181).

Existe ainda a classificação denominada *Gap-graded* que é a graduação com intervalo entre descontínua e densa. É considerada uma faixa de granulometria especial, pois resulta numa macrotextura superficial aberta ou rugosa e sem apresentar teor de vazios elevado. Esse tipo de mistura asfáltica tem sido mais empregado como camada estrutural de revestimento e de restauração de pavimentos rodoviários (BERNUCCI et al., 2008, p. 172).

Outro tipo de mistura asfáltica a quente é a areia asfalto usinado a quente – AAUQ –, executado onde existe escassez de agregados graúdos. Utiliza uma argamassa como revestimento composto principalmente por agregados miúdos, em geral areia, ligante (CAP), e fíler se necessário. Um dos problemas gerados nesse tipo de mistura é a baixa resistência às deformações permanentes devido à presença de agregados com pequenas dimensões. Portanto, é utilizado como revestimento em rodovias com baixo fluxo de veículos.

Além das misturas asfálticas a quente, também são produzidas misturas a frio para revestimento de pavimento. São misturas de agregados e materiais asfálticos pouco viscosos (emulsões) à temperatura ambiente, sem necessidade de aquecimento dos agregados ou do ligante. Exemplos de misturas a frio são o pré-misturado a frio (PMF), microrevestimento asfáltico a frio (MRAF), areia asfalto a frio (AAF), os tratamentos superficiais e outros.



A mistura asfáltica mais utilizada no Brasil é o concreto asfáltico (CA) ou também chamado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Segundo Bernucci et al. (2008, p. 158), “Trata-se do produto da mistura conveniente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.”.

Segundo as definições de Balbo (2007, p. 168-170) o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é:

[...] um material para construção de revestimentos de pavimentos, incluindo as capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos, obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), em geral bem graduados, de material fino de enchimento – filer (pó-de-pedra, finos calcários ou cimento Portland) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Trata-se de uma mistura elaborada a quente, em usina misturadora (central de usinagem), contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte.

Na produção do CA os agregados devem ser corretamente dosados e estarem perfeitamente secos antes da usinagem. Além da secagem, os agregados são aquecidos a uma temperatura compatível para que, quando misturados, fiquem na temperatura ideal próxima a 140 a 145°C (BALBO, 2007, p. 177).

A temperatura de aplicação em pista depende de muitos fatores, entre eles, distância da usina até o local de aplicação, as condições climáticas no dia, a proteção do material até local, etc. Com todas essas variações, é necessário fazer a verificação por meio de controle no caminhão basculante. Caso houver modificação na viscosidade, pode-se perder todo o material devido às mudanças nas características da mistura.

Suas propriedades são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico sendo que uma pequena variação para mais ou para menos, ainda dentro do admissível, pode acarretar problemas de deformação permanente por fluência e exsudação ou enfraquecimento da mistura e da resistência à formação de trincas (BERNUCCI et al., 2008, p. 162). Deve-se considerar uma faixa de 3 a 5% de vazios para camadas de rolamento e de 4 a 6% de vazios para camadas de ligação. Caso não se tenha esse cuidado, a mistura asfáltica deixa de ser estável ao tráfego e, por fluência, deformam-se significativamente (BERNUCCI et al., 2008, p. 162). O quadro 1 apresenta as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT.

Peneira de malha quadrada		Faixas			
Série ASTM	Abertura (mm)	Porcentagem em massa, passando			
		A	B	C	Tolerância
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
¾"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±5%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Teor de asfalto, %		4,0 a 7,0	4,5 a 7,5		±0,3%
Tipo de camada de revestimento asfáltico		Camada de ligação	Camada de ligação ou rolamento	4,5 a 9,0 Camada de rolamento	

Quadro 1: faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES) (BERNUCCI et al., 2008, p. 163)

Todas as misturas asfálticas descritas anteriormente são caracterizadas como misturas asfálticas a quente, tanto na produção em usina como na compactação em pista. São produzidas a altas temperaturas para garantir “[...] a secagem dos agregados, cobrirem-los com o ligante asfáltico, alcançar as condições de trabalhabilidade, e fornecer tempo suficiente para a compactação desta mistura em campo.” (NAKAHARA et al., 2010a, p. 1). Existem também, dentro das misturas asfálticas convencionais, àquelas que são produzidas a temperaturas ambientes e intermediárias.

### 3.1.2 Misturas asfálticas mornas

As misturas asfálticas a quente convencionais são produzidas sempre com temperaturas elevadas o que acarreta um gasto enorme de energia e emissão de gases e vapores de poluentes na atmosfera, além de problemas relacionados às condições insalubres para os trabalhadores. Larsen et al. (2004 apud SOUZA et al., 2006, p. 2) salientam que “[...] a crescente conscientização mundial voltada para a segurança, saúde e meio ambiente, tem resultado em significantes esforços para a conservação da energia, aproveitamento de fontes não-renováveis de combustíveis fósseis e redução de emissões.”.

Para um pavimento atingir um desempenho esperado, deve-se ter um controle tecnológico dos materiais empregados no momento da sua execução. O controle da temperatura é muito importante, pois as faixas de temperaturas, máximas e mínimas, devem ser respeitadas. A viscosidade tem forte relação com a temperatura. Quando a viscosidade é alta, os agregados se movem com dificuldade na rolagem do rolo compressor. Se a viscosidade é baixa os agregados se movem com facilidade, porém, não possuem aderência suficiente após a compactação

Temperaturas muito elevadas causam a **queima da mistura** e aceleração do envelhecimento e temperaturas baixas não atingem a viscosidade ideal para sua produção. Nakahara et al. (2010b, p. 9-10) acrescenta que “A temperaturas muito elevadas o ligante asfáltico se degrada emitindo para o meio ambiente fumo de asfalto e substâncias como CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, contribuindo assim com o aumento do efeito estufa e conseqüentemente para o agravamento do aquecimento global.”.

Em busca de soluções para minimizar os efeitos causados pelas emissões de poluentes e dos gastos de energia, através dos termos do protocolo de Kyoto em 2005, quando entrou em vigor, as indústrias de pavimentação começaram a desenvolver tecnologias para atender às exigências desse Protocolo. Os países europeus largaram na frente com variados processos mecânicos e químicos para diminuir a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de produção e compactação em pista. Porém, todos os novos processos apresentam a mesma finalidade de diminuir custo e emissões de gases poluentes na atmosfera. As tecnologias inovadoras empregadas para produzirem misturas asfálticas mornas visam atingir temperaturas até 55°C mais baixas que as atuais misturas asfálticas a quente convencionais que chegam a atingir temperaturas entre 150 e 180°C. As misturas asfálticas

mornas surgiram nesse contexto, diminuindo a temperatura de produção e compactação, trazendo muitos benefícios, tanto para a saúde dos trabalhadores quanto econômicos e sem prejudicar a qualidade das misturas asfálticas.

As misturas asfálticas mornas vêm ganhando atenção mundial devido as suas principais vantagens em relação às misturas asfálticas a quente convencionais. Al-Rawashdeh (2008, p. 15) apresenta:

- a) redução no consumo de energia;
- b) redução nas emissões, negro de fumo e odores desagradáveis;
- c) redução no envelhecimento do asfalto;
- d) aumento no tempo de construção em climas temperados.

D'Angelo et al. (2008, p. 1) também relataram benefícios ao pavimento, como por exemplo, a capacidade de se executar pavimentos em temperaturas mais baixas, transportar as misturas a distâncias maiores, maior trabalhabilidade no lançamento e compactação, compactação com menor esforço e maior porcentagem de regeneração do pavimento.

A concessionária da rodovia Osório-Porto Alegre S/A e a UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (2007, p. 24-25), também citam algumas vantagens construtivas e de desempenho com a diminuição da temperatura de misturas asfálticas:

[...] melhores resultados de trabalhabilidade garantindo melhor compactação; temperaturas de produção e aplicação reduzidas podem melhorar os resultados em pavimentação em climas frios e ainda representar menor envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, podendo possibilitar melhor desempenho do pavimento aumentando a resistência ao trincamento.

A figura 4 apresenta uma classificação das misturas asfálticas quanto a temperatura de produção. A concessionária da rodovia Osório-Porto Alegre S/A e a UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (2007, p. 24) determinaram as faixas de temperaturas para misturas a frio entre 20 e 50°C, misturas asfálticas a quente entre 140 e 170°C e as misturas asfálticas mornas entre 105 e 135°C. Segundo D'Angelo et al. (2008, p. 13), as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas em dois tipos: as que usam água e as que usam alguma forma de aditivo orgânico ou cera para a redução da temperatura. A água em contato com o asfalto quente se transforma em vapor expandindo o asfalto e diminuindo a

viscosidade da mistura. A diminuição da viscosidade de misturas com inserção de aditivos orgânicos acontece quando o ponto de derretimento da cera é atingido.

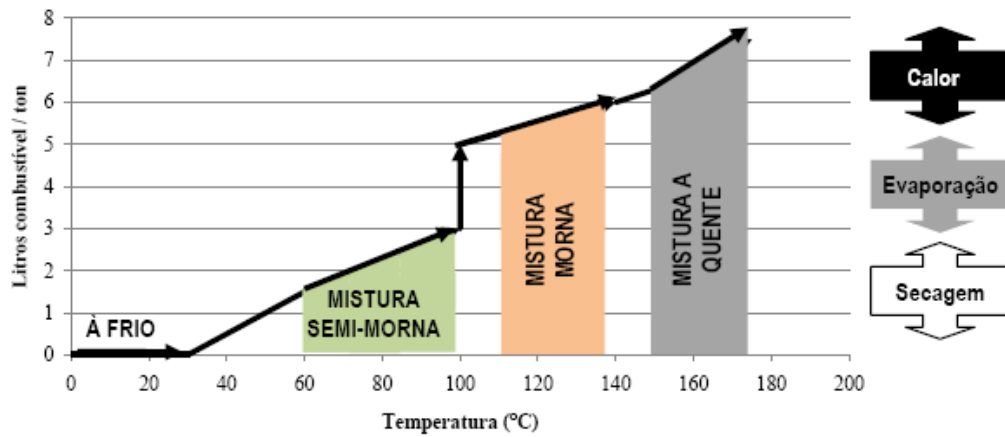


Figura 4: classificação de misturas asfálticas em função da temperatura de produção. (NAKAHARA et al., 2010a, p. 10)

As misturas asfálticas mornas, quanto a sua produção, são semelhantes às misturas a quente convencionais, diferenciando em relação à temperatura usada e pelos parâmetros de resistência e durabilidade do produto final. D'Angelo et al. (2008, p. 31) relataram que as usinas de misturas asfálticas a quente são as mesmas que as de misturas asfálticas mornas. A figura 5 mostra uma usina na Noruega utilizada para produzir misturas asfálticas mornas.



Figura 5: usina de misturas asfálticas mornas, Kolo Veidekke na Noruega (D'ANGELO et al., 2008, p. 31)

Nakahara et al. (2010a, p. 2) citam as diferentes maneiras de se produzir misturas asfálticas mornas utilizadas mundialmente:

- a) adição de zeólitas durante a produção da mistura na usina para criar um efeito de espuma no ligante;
- b) utilização de aditivos orgânicos como o Sasobit<sup>®</sup>, uma cera parafínica, e o Asphaltan B<sup>®</sup>, uma cera esterificada de baixo peso molecular;
- c) produção de concreto asfáltico com emulsão especial comercializada com Evotherm TM;
- d) um sistema composto por dois ligantes comercializado como WAM-Foam<sup>®</sup>, que introduz um ligante de menor rigidez e uma espuma de ligante asfáltico mais rígido em diferentes estágios durante a usinagem do concreto asfáltico;
- e) utilização de espuma de asfalto produzida a partir da mistura de uma emulsão asfáltica invertida e um ligante convencional proposta pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC);
- f) produção de concreto asfáltico com secagem parcial dos agregados, processos conhecidos como LEA e EBE.

As técnicas de produção de misturas asfálticas mornas resultam na redução da viscosidade do ligante asfáltico na secagem e completo recobrimento dos agregados a temperaturas mais baixas que as misturas asfálticas convencionais. A mistura e compactação em temperaturas mais baixas chegam a reduzir em 30% o consumo de energia e emissões de poluentes na atmosfera (APAO, 2003 apud AL-RAWASHDEH, 2008).

D'Angelo et al. (2008, p. 1) descrevem também que as emissões de poluentes nas usinas de produção de misturas mornas chegam a redução de 30 a 40% de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, 50% de compostos orgânicos voláteis (VOC), 10 a 30% de monóxido de carbono (CO), 60 a 70% de óxidos nitrogenados (NO<sub>x</sub>) e 20 a 25% de poeiras.

Como já visto anteriormente sobre as diferentes formas de se diminuir a temperatura de misturas asfálticas, a seguir, é discutido com mais detalhes sobre um método que é a inserção de zeólitas nas misturas asfálticas.

### 3.2 ZEÓLITAS

Para se produzir misturas asfálticas mornas é necessário diminuir suas temperaturas de mistura e compactação. Uma das tecnologias inovadoras que conseguiu diminuir a resistência

ao cisalhamento proporcionando uma viscosidade mais baixa no ligante, foi a inserção de zeólitas durante o processo de mistura entre ligante e agregados. Existem dois tipos básicos de zeólitas: as naturais e as sintetizadas. Esses tipos são descritos a seguir.

### 3.2.1 Zeólitas naturais

As zeólitas são encontradas em vesículas e fendas de rochas vulcânicas, podendo também ser encontradas em filões e outros ambientes da fase hidrotermal tardia. Em algumas rochas eruptivas é o resultado de alterações de aluminosilicatos como os feldspatos ou nefelina. Gottardi (1989 apud FERRET, 2004, p. 9) citou quatro tipos de ocorrência de zeólitas:

- a) hidrotermal;
- b) diagenética (por alteração de componentes de um sedimento);
- c) magmática (por erupção vulcânica);
- d) geodos e vesículas em rochas (especialmente em basalto).

Segundo Dal Bosco<sup>1</sup> et al. (2004, apud SOUZA et al. 2006, p. 2):

Zeólitas são alumino-silicatos hidratados altamente cristalinos. São compostos por uma rede tridimensional de tetraedros de  $AlO_4$  e  $SiO_4$  ligados entre si pelos átomos de oxigênio, originando assim uma estrutura microporosa compensada eletronicamente por outros cátions, como por exemplo Na, K, Ca, Mg [...].

Souza et al. (2006, p. 2) descrevem que, por ser uma estrutura muito porosa e com grande quantidade de cavidades, as moléculas de água que estão presentes nessa área de vazios, se movimentam e se desprendem facilmente quando aquecidos. Esse processo é seletivo e depende das características de cada zeólita como, por exemplo, o tamanho do poro, podendo assim, ser usada como peneira molecular, pois, permite a entrada de moléculas maiores, não permitindo a entrada das menores.

Gianneto<sup>2</sup> (1990 apud FERRET, 2004, p. 7) explica que:

---

<sup>1</sup> DAL BOSCO, S. M.; JIMENEZ, R. S.; CARVALHO, W. A. Aplicação da zeólita natural na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. *Eclética Química*, v. 29, n. 1, 2004.

<sup>2</sup> GIANNETO, G. **Zeólitas, características, propiedades y aplicaciones industriales**. Caracas: Edit Ediciones Innovación Tecnológica, 1990. 170 p.

O termo zeólita foi utilizado inicialmente para designar uma família de minerais naturais que apresentavam como propriedade particular o intercâmbio de íons e a desorção reversível de água. Esta última propriedade deu origem ao nome genérico de zeólita, o qual deriva das palavras gregas: *zeo* – que ferve, e *lithos* – pedra, ou seja, pedra que ferve.

Ferret (2004, p. 8) determinou como sendo a principal função das zeólitas a relação entre Si e Al, na qual classificam as zeólitas como possuindo grande capacidade de trocas catiônicas. Devido a esse fenômeno, as zeólitas são usadas para trocar seus cátions com outros que estejam imersos em líquidos. A figura 6 apresenta um exemplo de zeólita com ocorrência no Rio Grande do Sul e, a figura 7, as estruturas cristalinas de zeólitas.



Figura 6: zeólita natural Heulandita de Dois Irmãos (FERRET, 2004, p. 10)

A estrutura de uma zeólita apresenta diferentes capacidades de armazenamento de água em seus poros. Segundo Ferret (2004, p. 8) são encontrados íons de compensação, moléculas de água e outros adsorbatos e sais presentes nas cavidades interconectadas da estrutura de uma zeólita. Por ser uma estrutura microporosa, a zeólita apresenta uma superfície interna muito grande se comparada com a superfície externa.

Como as zeólitas de ocorrência natural normalmente possuem um teor elevado de impurezas e/ou não possuem as propriedades necessárias ao seu uso principalmente em catálise e troca catiônica, zeólitas começaram a ser sintetizadas. Existe basicamente um processo comercial de fabricação de zeólitas: o processo hidrotérmico, que utiliza caulim como fonte de Si e Al.



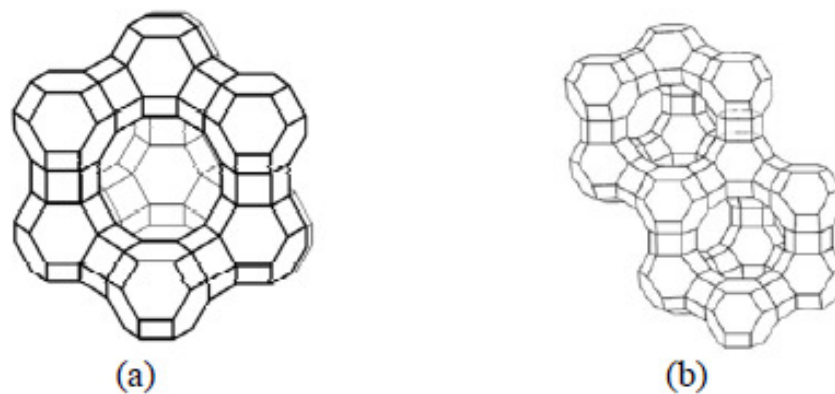
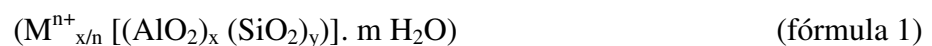


Figura 7: (a) face hexagonal de uma zeólita; (b) estrutura cristalina de uma zeólita (SOUZA et al., 2006, p. 3)

Silveira et al. (2007, p. 3) apresentaram a fórmula química para cada célula unitária de zeólita como mostra a fórmula 1:



Onde:

M = cátion de valência n;

m = número de moléculas de água;

x + y = número de tetraedros por célula unitária.

### 3.2.2 Zeólitas sintéticas

Os processos de obtenção das zeólitas sintéticas podem ser divididos em dois diferentes tipos: por via úmida (hidrotérmico) ou por via seca (gel seco). Segundo Ferret (2004, p. 11) existe basicamente um único processo comercial de fabricação de zeólitas: o processo hidrotérmico, que é semelhante a um dos processos naturais de formação de zeólitas. O processo hidrogel e a conservação de materiais sólidos naturais e/ou resíduos são variantes do mesmo processo hidrotérmico. Enquanto o primeiro utiliza soluções supersaturadas de aluminatos e silicatos (géis), o segundo usa como fonte de Al e Si aluminossilicatos amorfos sólidos (caulim, cinzas

de combustão, etc.). A reação básica para o processo hidrogel e para o processo de conversão do Caulim são explicados nos itens seguintes.

### 3.2.2.1 Processo hidrogel

As zeólitas de sódio são formadas pela cristalização de um gel de aluminossilicato correspondente, preparado a partir de alumínio, silicato e uma solução de hidróxido, todos de sódio. O silicato de sódio pode ser obtido pela digestão de sílica em uma solução de hidróxido de sódio à temperatura acima de 130°C e pressão de 100 psi ou pela calcinação da sílica com carbonato de sódio (NAKAHARA et al., 2010b)

O aluminato de sódio é formado pela dissolução de alumina tri-hidratada em solução aquosa de hidróxido de sódio. A seguir tem-se a reação do aluminato de sódio com silicato de sódio, em uma solução aquosa de hidróxido de sódio, para formar um hidrogel amorfo ou gel de síntese. Para uma zeólita com alta relação sílica/alumina, sílica gel pode ser adicionada à mistura da reação. A zeólita é formada pela cristalização controlada desse gel, onde o aluminato e os ânions de silicato são arranjados em uma estrutura cristalina ordenada. Os principais fatores que afetam a estrutura de formação das zeólitas são os seguintes: temperatura e tempo de cristalização, relação sílica/alumina da mistura de reação e tipo cátion presente (NAKAHARA et al. 2010b).

### 3.2.2.2 Processo de conversão do caulim

A primeira etapa no processo de conversão do caulim consiste na desidratação do caulim através de calcinação (500-600°C). As zeólitas são formadas sem aglutinante, onde o caulim pré-formado é convertido *in situ* pelo tratamento com solução de hidróxido de sódio a 100°C (MURAT et al., 1987 apud NAKAHARA et al., 2010b).

Tanaka et al. (2002 apud NAKAHARA et al., 2010b) explicam que:

O mesmo princípio reacional de conversão do caulim em zeólita é aplicado para as cinzas de carvão, porém, sem a etapa de calcinação. As características químicas mineralógicas e morfológicas das cinzas leves tornam esses resíduos de combustão do carvão muito apropriado como matéria-prima para a síntese de zeólitas.

A produção mundial de zeólitas esta estimada em 1,5 milhões t/ano e dois terços dessa produção esta voltada para a fabricação de detergentes e o restante aos processos de catálise. Primeiramente elas eram usadas nos processos catalíticos de craqueamento do petróleo. No Brasil, a produção se resume à da Petrobrás que produz 25 mil t/ano destinado às refinarias para craqueamento catalítico de petróleo.

### 3.3 SÍNTESE HIDROTÉRMICA DE ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO

O termo hidrotérmico, de origem geológica, descreve as mudanças na crosta terrestre, sob as condições de temperatura e pressão, formando assim rochas e minerais. A tecnologia hidrotermal foi desenvolvida para entender essas transformações minerais. Foi utilizada pela primeira vez em 1892 para beneficiamento do ouro, mas somente em 1948 foi sintetizada pelo processo hidrotérmico (FERRET, 2004, p. 12).

Zeólitas puras são sintetizadas com soluções supersaturadas de aluminatos e silicatos e são complicadas de se produzir, pois, sabe-se que pequenas variações de temperatura, se resultam em zeólitas com propriedades diferenciadas. Segundo Nakahara et al. (2010b, p. 23):

Dependendo das condições experimentais e da composição da cinza utilizada são obtidos diferentes tipos de zeólitas. Muitos são os fatores que influenciam a síntese de zeólitas a partir de cinzas volantes de carvão, entre eles cabe destacar: tipo e composição das cinzas, tipo e concentração do meio reacional, pressão, temperatura e tempo de reação, relação solução/cinzas e uso de promotores (sementes, direcionadores...).

Segundo Singer e Berkgaut (1996 apud NAKAHARA et al., 2010b) as cinzas volantes de combustão de carvão, por apresentarem elevado conteúdo de fases reativas e granulometria fina, são ótimas para a síntese de zeólitas por meio da ativação hidrotermal alcalina sob pressão e temperatura adequadas. Os rendimentos de conversão de cinzas volantes em zeólitas podem variar de 50 a 75% (SINGER; BERKGAUT, 1996 apud NAKAHARA et al., 2010b).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS LABORATORIAIS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os procedimentos utilizados nesse trabalho. Serão apresentadas as características dos materiais e os ensaios utilizados para avaliar o ligante e as misturas asfálticas alvo desse projeto.

### 4.1 MATERIAIS

Nos próximos itens são descritos as características dos agregados, ligante e a zeólita que foram utilizados para a preparação das misturas asfálticas.

#### 4.1.1 Agregados

Para esse trabalho foram utilizados agregados retirados de uma jazida representativa de materiais utilizados na pavimentação de estradas no Rio Grande do Sul. Os agregados foram selecionados da jazida basáltica localizada em Santo Antônio da Patrulha. As rochas basálticas formadas por erupções vulcânicas são encontradas em todo o norte do Estado abrangendo um total de 54% de sua área.

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA<sup>3</sup> (1998 apud ROHDE, 2007, p. 122):

Os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes ocorrendo principalmente na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde totalizam mais de 90% das rochas vulcânicas existentes. A mineralogia essencial é plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-15%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, micro granular, por vezes amigdaloidal.

Os agregados utilizados nessa pesquisa foram retirados diretamente das correias que transportam o material até as pilhas de estocagem e guardadas em sacos plásticos impermeáveis. De acordo com Rohde (2007) a rocha apresentava aparência sã com pouca argila ou outros materiais deletérios. O quadro 2 apresenta as médias das granulometrias dos

---

<sup>3</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Geologia de engenharia. São Paulo, 1998.

agregados utilizados nesse trabalho e o quadro 3 algumas propriedades físicas e mecânicas determinadas por Rohde (2007).

Peneiras		Passante (%)		
		Jazida Santo Antônio da Patrulha		
n°	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra
3/4	19,1	100	100	100
1/2	12,7	47,9	100	100
3/8	9,5	13,4	99,6	100
4	4,76	0,3	6,8	92,8
10	2,0	0,2	0,7	62,0
40	0,42	0,2	0,6	28,2
80	0,18	0,2	0,6	21,5
200	0,074	0,2	0,5	15

Quadro 2: distribuição granulométrica dos agregados (ROHDE, 2007, p. 124)

Propriedade	Método de ensaio	Características	
Índice de lamelaridade (%)	EL 180/01 (DAER, 2001)	30	
Absorção (%)	ME 081 (DNER, 1998c)	0,79	
Massa específica (kN/m <sup>3</sup> )	ME 081 (DNER, 1998c) e ME 084 (DNER, 1995a)		
		Real	28,03
		Aparente	27,42
		Efetiva	27,73
Sanidade (%)	ME 089 (DNER, 1994b)	6,7	
Perda por abrasão (%)	ME 035 (DNER, 1998b)	16	

Quadro 3: características dos agregados (ROHDE, 2007, p. 124)

Na confecção dos CP foram utilizadas porcentagens diferentes para cada fração de agregado. A figura 8 mostra essas frações já misturadas e aquecidas a 120°C a espera do ligante e da zeólita.



Figura 8: frações de agregados já misturados

#### 4.1.2 Ligante asfáltico

Para esse trabalho foi utilizado o ligante asfáltico denominado CAP 50/70 para a dosagem da mistura asfáltica convencional que servirá de comparação com outra mistura asfáltica utilizando o mesmo ligante, porém, com o acréscimo do material zeólita em sua composição. Rohde (2007) determinou em laboratório a densidade, a penetração e o ponto de amolecimento do CAP 50/70 utilizado no trabalho e o quadro 4 apresenta as características do ligante.

A denominação CAP 50/70 provem da caracterização do ligante pelo ensaio de penetração. Os números representam a faixa de penetração, em milímetros, obtidos no ensaio.

CARACTERÍSTICAS	CAP 50/70
Densidade	1,010
PEN – 100g, 5s, 25°C (10-1mm)	52
PA (°C)	47

Quadro 4: características do ligante CAP 50/70 (ROHDE, 2007, p. 140)

### 4.1.3 Zeólita

As cinzas de carvão utilizadas para a síntese das zeólitas tiveram os seguintes critérios de escolha nas centrais termoelétricas (FERRET, 2004, p. 27):

- a) cinzas de carvão precursor de Candiota, por ser o carvão responsável por 50% as cinzas geradas no Rio Grande do Sul;
- b) cinzas de queima pulverizada, por serem deste tipo a quase totalidade das unidades industriais com base carvão, principalmente as termoelétricas, em operação no Brasil;
- c) cinzas de fluido fluidizado, já que as termoelétricas a leito pulverizado estão no primeiro estágio de evolução das térmicas.

Segundo Ferret (2004, p. 40) o procedimento adotado para a zeolitização das cinzas foi o seguinte: amostras de cinzas foram pesadas e colocadas em reatores de plásticos ou de aço inoxidável com interno de teflon, posteriormente adicionava-se a solução de base (NaOH ou KOH) na concentração requerida. Após, os frascos foram fechados e levados à estufa nas temperaturas do teste (60, 100, 150 e 200°C), permanecendo pelo tempo de necessário de 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 10 dias. Depois de esfriados, os sólidos foram centrifugados para a remoção da solução alcalina, lavados quatro vezes com H<sub>2</sub>O Milli-Q. Após cada lavagem eram centrifugados e, depois de quatro lavagens, foram colocadas a secar por 24 horas a 105°C. Então as amostras tratadas eram subdivididas em número adequado às análises físico-químicas a que seriam submetidas.

Muitas zeólitas são caracterizadas pela sua capacidade de absorver ou liberar água da sua estrutura cristalina. A zeólita produzida por Ferret (2004) e que foi utilizada nesse trabalho, figura 9, possui granulometria fina, porém, na formulação da mistura morna foi utilizada somente a porção passante pela peneira n. 40. Este aditivo é classificada do tipo zeólita P ou 30Na6, ou seja, zeólita elaborada em um meio reacional alcalino (NaOH) em 3mol/L de concentração na razão solução alcalina/cinza (s/CZ) de 6mg/L, com abertura de poro entre 3 a 4,5 Å.



Figura 9: zeólita produzida por Ferret (2004)

## 4.2 TEMPERATURA DE MISTURA E COMPACTAÇÃO

A viscosidade de um material asfáltico é a resistência ao fluxo desenvolvido por um material submetido a tensões. Quando um material é submetido a esforços de cisalhamento, suas moléculas tendem a impedir esse movimento, portanto, a relação entre deformação aplicada e a resistência ao cisalhamento desenvolvida varia de material para outro. No caso de materiais betuminosos a temperatura tem grande influência na viscosidade.

Neste trabalho foi utilizado o viscosímetro Brookfield (figura 10) para a determinação da viscosidade do CAP 50/70. Esse dado é extremamente importante na preparação de misturas asfálticas, pois esta diretamente ligada à temperatura de mistura e compactação do concreto asfáltico.

O viscosímetro Brookfield mede a viscosidade em centipoise da amostra por meio de medidas de taxa de tensão de cisalhamento. A temperatura de mistura e compactação empregada no CAP é um parâmetro que afeta diretamente o desempenho dos pavimentos asfálticos e suas características finais em campo. A escolha das temperaturas de usinagem e compactação foi feita através da curva logarítmica viscosidade-temperatura do ligante. O quadro 5 mostra as temperaturas de mistura e compactação determinadas por Rohde (2007) para a mistura asfáltica convencional.

Esta pesquisa faz parte de um projeto que está sendo desenvolvido no LAPAV onde serão testadas várias temperaturas de confecção de misturas asfálticas mornas (entre 80 a 120°C).



Os corpos-de-prova foram confeccionados na temperatura de 120°C e compactados na temperatura de 95°C, na energia de compactação de 75 golpes por face.



Figura 10: equipamento Brookfield

Ligante	Viscosidade (Pa.s)				Temperatura (°C)	
	135°C	155°C	175°C	195°C	Mistura	Compactação
CAP 50/70	0,48	0,195	0,098	0,058	157-164	144-150

Quadro 5: viscosidades e temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica convencional (ROHDE, 2007, p. 144)

### 4.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a dosagem das misturas asfálticas foi utilizado os equipamentos propostos pelo método Marshall para a determinação do teor de projeto do ligante e das características volumétricas da mistura. A dosagem realizada normalmente no trabalho seguiu as orientações da norma DNER ME 043/95, apesar de algumas controvérsias que a metodologia apresenta (BERNUCCI et al., 2008, p. 277). A granulometria dos agregados utilizadas foi a faixa C, recomendada pelo DNIT.

A prensa Marshall, figura 11, é capaz de aplicar cargas de até 39,2 kN com erro inferior a 24,5 N. Possui um embolo capaz de percorrer 5 cm em 1 minuto e também é equipada com

um anel dinamométrico com capacidade de 22,2 kN com sensibilidade de 44,5 N. Compõe de molde de compactação de aço, com um anel superior e outro inferior e uma placa base.



Figura 11: prensa Marshall (BERNUCCI et al., 2008, p. 223)

O método Marshall segue basicamente as seguintes etapas: secar os agregados em estufa até atingir massa constante e após separar em porções determinadas. A mistura dos agregados e do ligante deve produzir CP que tenha cerca de 1200 g e  $(63,5 \pm 1,3)$  mm de altura. Os agregados devem ser aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 10 a 15°C acima da temperatura do ligante. Misturam-se os agregados, o ligante e, no caso da mistura morna desta pesquisa, 0,3% de zeólitas (sobre o peso total da mistura). Após a homogeneização dos materiais por 2 a 3 minutos até a cobertura dos agregados, coloca-se a mistura dentro dos moldes de compactação conforme a norma do DNER 043 (BRASIL, 1995, p. 4). Esta porcentagem de zeólita foi fixada com base em estudos prévios executados em zeólitas artificiais por Hurley e Prowell (2006 apud NAKAHARA et al., 2010a). O aditivo foi adicionado juntamente com o ligante asfáltico durante o processo da mistura.

A mistura é acomodada com 15 golpes com espátula no interior e ao redor dos moldes e 10 golpes no centro da massa. Remover o anel superior e fazer o alisamento da mistura com uma colher ligeiramente aquecida. Recolocar o anel superior e aplicar 75 golpes com o soquete a uma altura de queda de 45,72 cm. Remover novamente o anel superior e inverter o anel inferior e forçar com o soquete a mistura até atingir a placa-base e aplicar o mesmo número de golpes, porém, com o CP invertido. Após a compactação do CP, retirar o anel inferior e

colocar o CP numa superfície lisa e plana durante aproximadamente 12 horas à temperatura ambiente. É feita a verificação da altura do CP em quatro posições diametralmente oposta. Esta altura deverá ser de aproximadamente 63,5mm. Essa medição servirá para o cálculo de parâmetros volumétricos de acordo com a norma DNER-ME 043 (BRASIL, 1995, p. 5).

Nos CP moldados são determinadas a estabilidade (E) e a fluência (F) seguindo os passos seguintes: os CP são imersos em banho-maria a  $(60^{\circ} \pm 1)$  °C por 30 a 40 minutos. Em seguida, cada CP é colocado no molde de compressão que devem estar à temperatura de  $(21$  a  $38)^{\circ}\text{C}$ , limpos e lubrificados. O molde é posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor da fluência é ajustado na posição correta. Acionado a prensa, o êmbolo se eleva a uma velocidade de 5 cm por minuto até o rompimento do CP na qual é observado no defletômetro pela indicação de um máximo. É feita a leitura desse máximo, anotado e convertido em N (kgf) pelo gráfico de calibração do anel dinamométrico. A norma DENR-ME 043 diz que a carga necessária para o rompimento é denominada Estabilidade (BRASIL, 1995, p. 5-6). Na figura 12 pode-se ver um exemplo de curva gerada no ensaio. O valor da fluência se obtém no mesmo ensaio da estabilidade através do defletômetro.

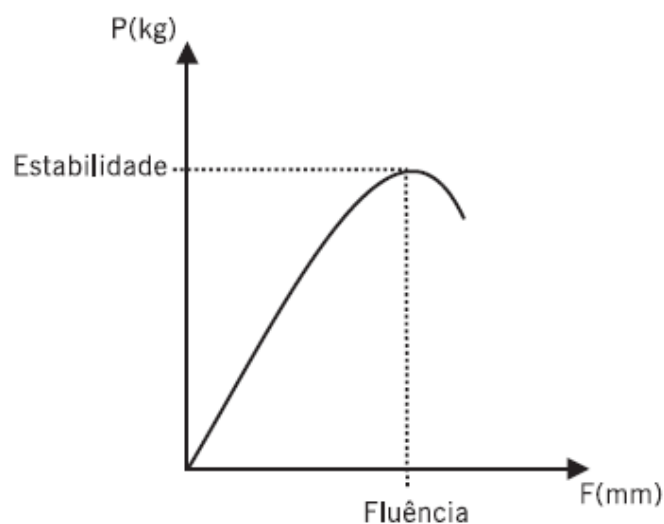


Figura 12: exemplo de curva estabilidade x fluência gerado pela prensa Marshall

A estabilidade Marshall é a carga máxima a qual o CP resiste antes da ruptura, podendo ser tanto um deslocamento ou quebra de agregados e fluência é o deslocamento apresentado pelo CP correspondente à aplicação da carga máxima.

Além desses dois parâmetros, as características volumétricas como: a massa específica aparente, o volume de vazios ( $V_v$ ), os vazios no agregado mineral (VAM) e a relação betume/vazios (RBV), também são calculados.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Nos itens seguintes são descritos os ensaios de ruptura, de módulo e ensaios complementares para a caracterização de misturas asfálticas.

##### 4.4.1 Resistência à tração por compressão diametral

Segundo a norma DNER-ME 138 o ensaio para a determinação da resistência à tração estática consiste na aplicação de duas forças diametralmente opostas sobre um CP cilíndrico e que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. O equipamento necessário para esse ensaio é a prensa mecânica com sensibilidade de 19,60 N com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s (BRASIL, 1994a, p. 2).

Antes do ensaio, o CP moldado pelo método Marshall, passa por um aquecimento em estufa por 2 horas. Depois é colocado em posição horizontal, repousando, segundo uma geratriz sobre o prato inferior da prensa. A carga começa a ser aplicada e no momento da ruptura do CP anota-se o valor da carga de ruptura (P) (BRASIL, 1994a, p. 2).

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela seguinte fórmula:

$$RT = 2P / \pi dh \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

RT = resistência à tração em kgf/cm<sup>2</sup>;

P = Carga de ruptura em kgf;

d = Diâmetro do corpo-de-prova em cm;

$h$  = Altura do corpo-de-prova em cm.

As figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, o estado biaxial de tensões, gerado na amostra durante o carregamento e um exemplo de equipamento para a execução do ensaio de resistência à tração estática.

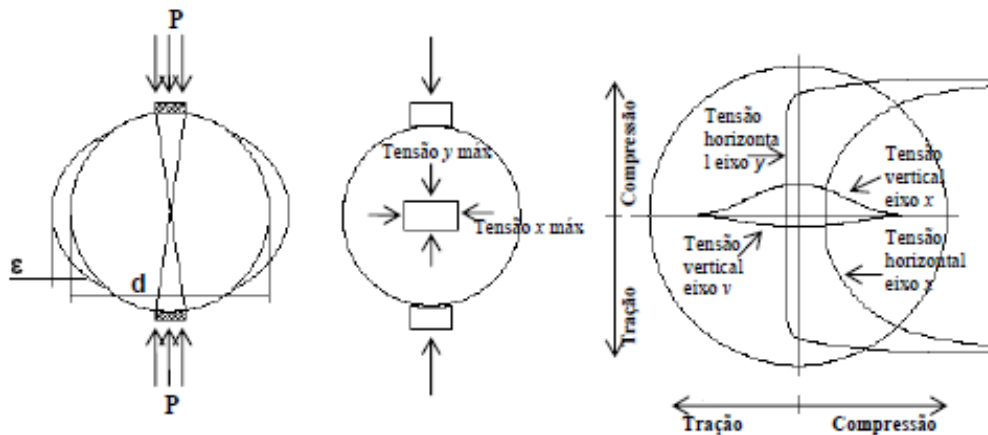


Figura 13: estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral (ROHDE, 2007, p. 132)

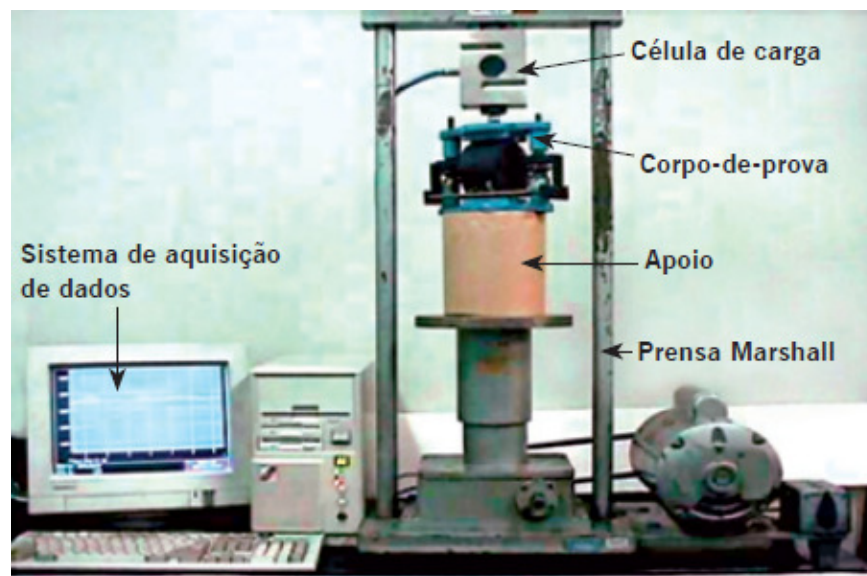


Figura 14: exemplo de equipamento para ensaio de Resistência à Tração estática (BERNUCCI et al., 2008, p. 310)

#### 4.4.2 Módulo de resiliência

O termo resiliência é definido classicamente como a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. O ensaio de módulo de resiliência é padronizado pela norma DNER-ME 133/94 e consiste na aplicação de uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um CP padrão. Esse carregamento gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação. Mede-se o deslocamento diametral recuperável horizontal correspondente à tensão gerada em certa temperatura (BERNUCCI et al., 2008, p. 291).

O equipamento utilizado, conforme a figura 15, e de acordo com a norma DNER-ME 133, além de possuir um pistão que proporciona um carregamento pulsante e repetido na frequência de 1 Hz, também é composto por 2 transdutores mecânico-eletromagnéticos do tipo LVTD, que servem para transformar as deformações durante o carregamento repetido em potencial elétrico na qual é registrado do oscilógrafo (BRASIL, 1994b, p. 2). O módulo de resiliência é calculado pela fórmula 3.

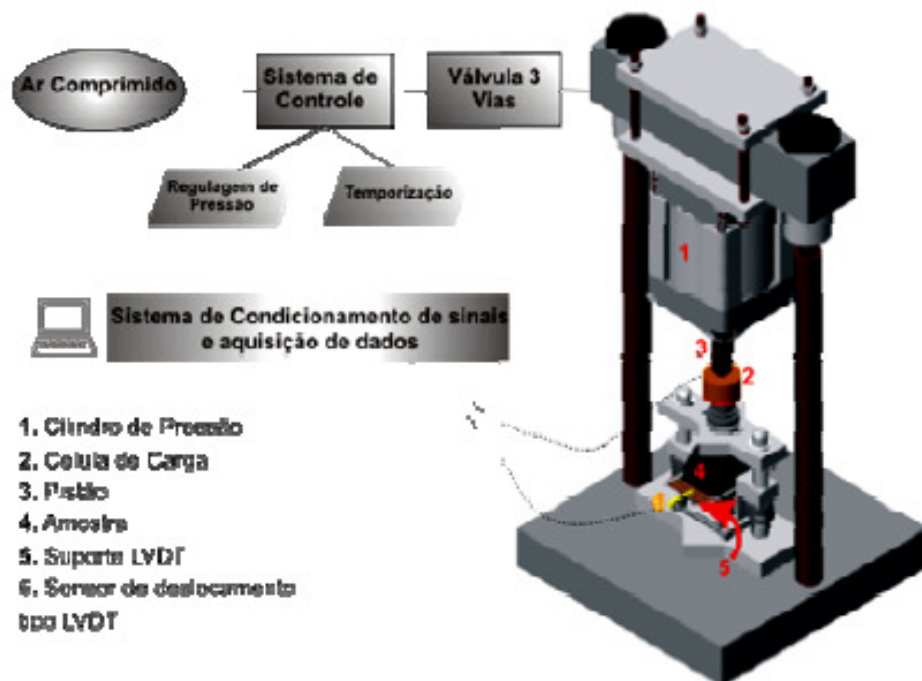


Figura 15: esquema do equipamento para ensaio de MR por compressão diametral (ROHDE, 2007, p. 133).

$$MR = P/\Delta h \times (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência em kgf/cm<sup>2</sup>;

P = carga aplicada em kgf;

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente em cm;

h = altura do corpo-de-prova em cm;

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,3 para 25°C. A diferença do coeficiente com a alteração na temperatura é necessária uma vez que alteram as propriedades mecânicas das misturas.

#### **4.4.3 Perda por umidade induzida**

Esse ensaio avalia o dano nas misturas asfálticas causadas pela umidade. O dano por umidade determina os possíveis problemas de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico. O ensaio foi realizado em CP cilíndricos compactado pelo método Marshall, com 1200 g de mistura asfáltica na faixa e teor de ligante de projeto, com vazios de 7±1% e posteriormente, analisados as relações entre resistência a tração com e sem condicionamento térmico.

O ensaio resume-se em moldar seis CP padronizados pelo método Marshall e dividí-los em dois grupos de três CP. O primeiro grupo é colocado em um saco plástico para imersão em água a 25°C por aproximadamente 2 horas. O segundo grupo é colocado em um recipiente com água destilada e se aplica vácuo até obter grau de saturação entre 70 e 80% de água. Após imersão em água, os CP são envolvidos em filme plástico e colocado em sacos plásticos com 10 ml de água adicionais, vedando-os em seguida. As amostras seguem para o congelamento a -18°C por um período de 16 horas. Mergulha-se esse grupo em banho de água a 60°C por um período de 24 horas, retirando-se os CP dos sacos plásticos e do filme após a

imersão. Coloca-se o conjunto em outro banho a 25°C por 2 horas (BERNUCCI et al., 2008, p. 330).

É aplicado ao primeiro grupo o ensaio de resistência à tração não-condicionado (RT) e também no segundo grupo após o ciclo de condicionamento (RT<sub>u</sub>). Calcula-se então, a resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) que é a razão entre RT<sub>u</sub> e RT.

Segundo Bernucci et al., (2008, p. 331), espera-se um valor de RRT maior que 70% para que a amostra seja aprovada.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados nas misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas e uma análise através da comparação com os resultados obtidos com as misturas asfálticas a quente realizados por Rohde (2007).

### 5.1 TEOR DE PROJETO E DOSAGEM DAS MISTURAS

Os agregados desta pesquisa são da pedreira localizada na cidade de Santo Antônio da Patrulha. Os agregados utilizados atendem as especificações da norma DNER ES 313/97 quanto à abrasão, durabilidade e índice de forma (agregado graúdo) e equivalente de areia (agregado miúdo), e da norma DNER ME 078/94 quanto à adesividade.

A mistura utilizada foi a do concreto asfáltico. Para a dosagem foram moldados CP com granulometria que se enquadram na faixa C do DNIT. O quadro 6 e a figura 16 apresentam a composição granulométrica da mistura e a curva correspondente. Além destes componentes, foi acrescentado, no mesmo instante da adição de ligante, 0,3% de zeólita.

% mistura		21%	13%	59%	4%	3%
PENEIRA	mm	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FILLER
3/4"	19,1	21	13	59	4,0	3,0
1/2"	12,7	13,6	13	59	4,0	3,0
3/8"	9,5	5,1	13	59	4,0	3,0
n. 4	4,8	0,3	1,0	55,4	4,0	3,0
n. 10	2,0	0,1	0,3	36,9	4,0	3,0
n. 40	0,42	0,1	0,2	13,2	2,5	3,0
n. 80	0,18	0,1	0,2	8,7	0,0	2,6
n. 200	0,075	0,0	0,1	5,3	0,0	1,6
	Frações	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	AREIA	FILLER

Quadro 6: composição granulométrica da mistura asfáltica morna

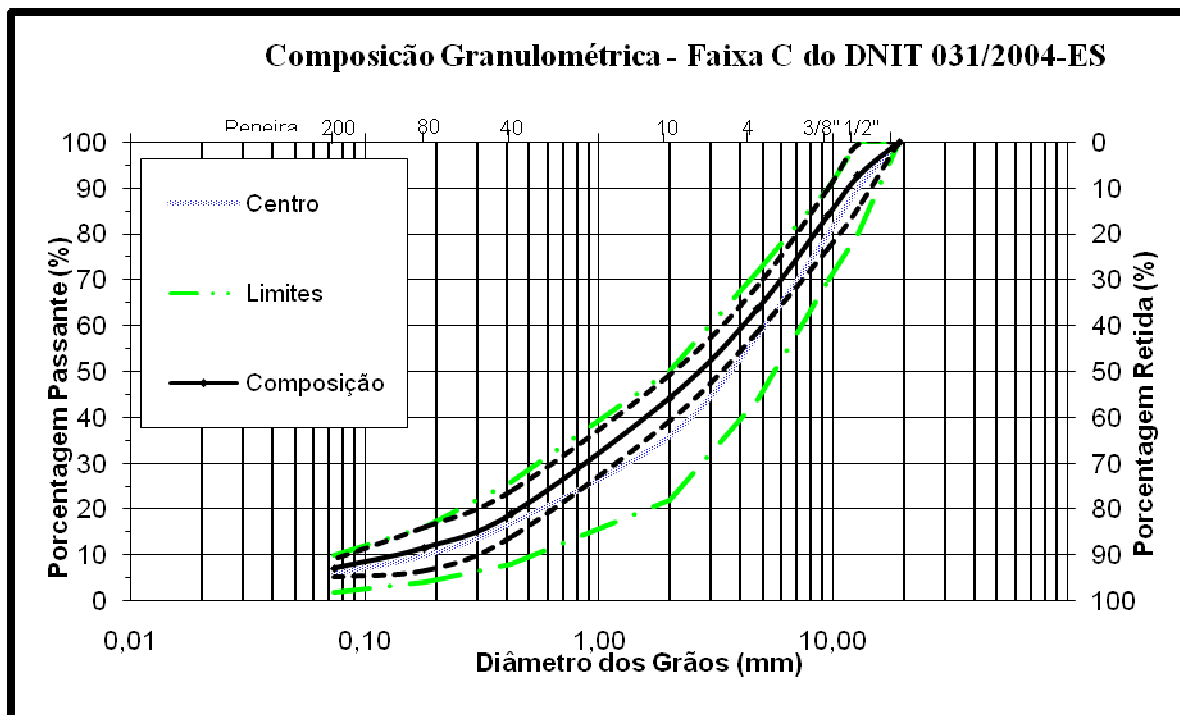


Figura 16: curva granulométrica da mistura asfáltica morna

O teor de projeto foi determinado através das retas verticais provenientes das especificações de RBV e  $V_v$ , segundo o método Marshall (DNER ME 043/95). A figura 17 apresenta os resultados para as misturas asfálticas a quente. A partir desses resultados, a confecção dos CP com 0,3% de zeólitas foi baseada no teor de ligante determinado pelo método Marshall, ou seja, 5%.

Foi utilizado o viscosímetro Brookfield para a determinação da viscosidade do CAP 50/70 com a adição de zeólita em várias temperaturas. Os dados obtidos foram correlacionados com a temperatura de compactação e usinagem da mistura através da Curva Logarítmica de Viscosidade *versus* Temperatura. Para o traço utilizado foi escolhida a temperatura de 120°C para a usinagem e 95°C para a compactação dos CP.

Os CP foram confeccionados para o ensaio de dano por umidade induzida com 10 e 12 golpes por face com a prensa Marshall e os demais CP foram compactados com 75 golpes cada face.

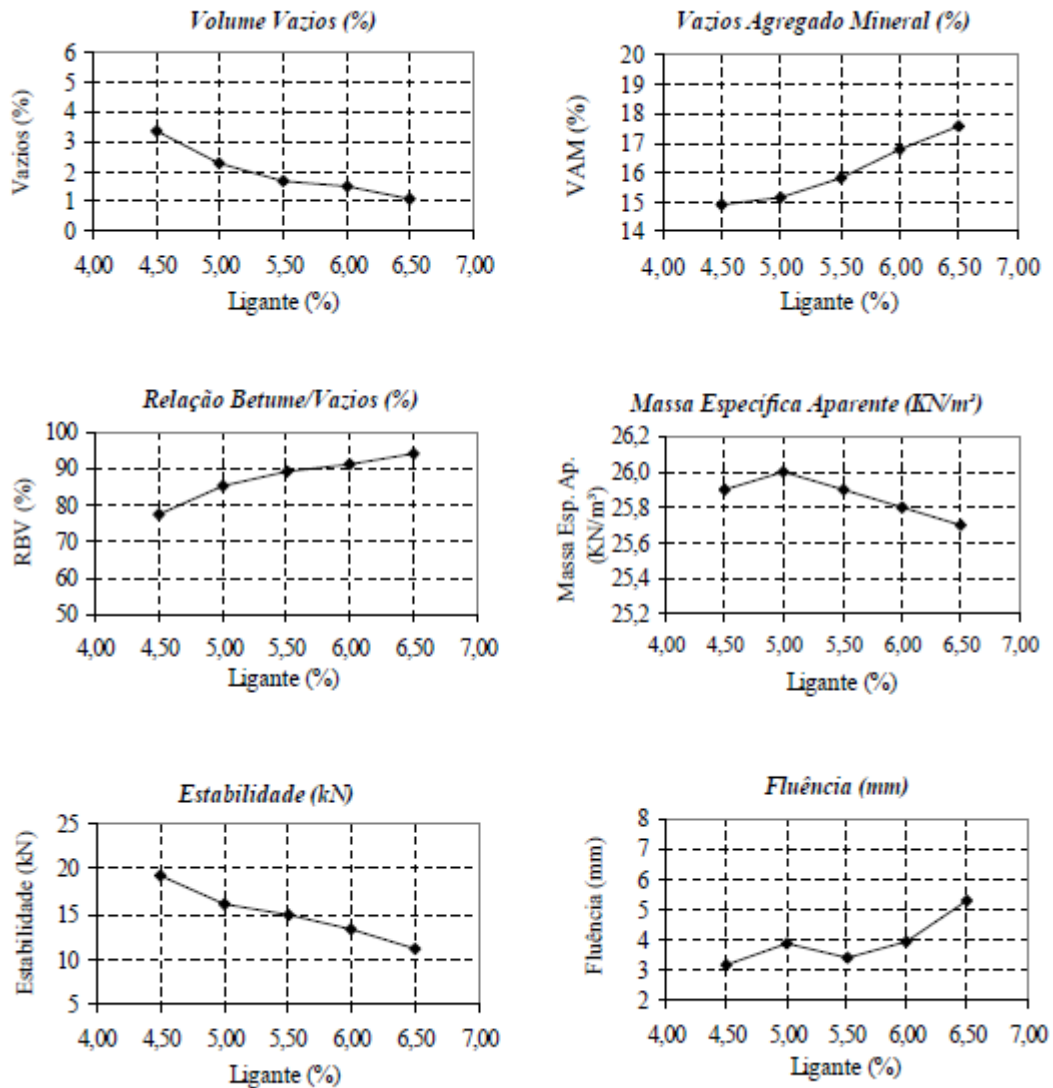


Figura 17: características de projeto da mistura de compactação (ROHDE, 2008, p. 151)

## 5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Nos itens seguintes são apresentados os ensaios realizados para a caracterização da mistura morna. Também são apresentados os comentários a respeito dos resultados obtidos através de comparações com outros CP executados em condições semelhantes às produzidas nesse trabalho.

### 5.2.1 Estabilidade Marshall

Os ensaios realizados para caracterizar a mistura morna de projeto foram estabilidade Marshall, fluência, resistência à tração estática, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. O quadro 7 apresenta as características volumétricas, a estabilidade e fluência da mistura em estudo e o quadro 8 os valores limites de cada parâmetro, conforme estabelece o DNIT 031/2006 ES.

CARACTERÍSTICAS	Convencional (Rohde, 2007)	Mistura morna
Teor de ligante (%)	5,0	5,0
Massa específica aparente (kN/m <sup>3</sup> )	26,0	23,9
Volume de vazios (%)	2,26	3,63
Relação Betume Vazios (%)	85	75,7
Vazios no Agregado Mineral (%)	15	15,79
Estabilidade (kgf)	1630	376
Fluência (mm)	3,9	11,44

Quadro 7: características das misturas asfálticas convencionais e misturas mornas com adição de zeólitas

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação
Volume de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, (MPa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Quadro 8: limites para uso da mistura DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006, p. 5)

Os resultados de  $V_v$  e RBV se enquadram dentro das especificações exigidas para serviços de concreto asfáltico a serem usados em revestimentos de pavimentos, ao contrário da estabilidade, que apresentou resultado abaixo dos padrões exigidos.

No quadro 9 são apresentados valores recomendados de estabilidade e fluência segundo a NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 12) usando como critério a pressão do pneu. O valor de estabilidade foi superior ao mínimo fornecido pela norma, porém, a fluência não alcançou os valores desejados.

Determinações	Critérios – pressão de pneu	
	Até 7 kgf/cm <sup>2</sup>	De 7 kgf/cm <sup>2</sup> a 14 kgf/cm <sup>2</sup>
Estabilidade (kgf)	250	350
Fluência (0,1 mm)	20 – 46	20 – 46

Quadro 9: valores recomendados para estabilidade e fluência NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 12)

### 5.2.2 Resistência à tração e Módulo de resiliência

Os resultados de resistência à tração e módulo de resiliência da mistura morna desta pesquisa são apresentados no quadro 10 e nas figuras 18 e 19. Além desta mistura foram adicionados resultados de uma mistura morna executada por Souza et al. (2006). Estes autores estudaram a inserção de 0,3% de zeólitas sintéticas, diferente das usadas nesse trabalho, em misturas asfálticas executadas com 6,5% de ligante, nas temperaturas de 145°C de mistura e 125°C de compactação em CP moldados com 50 golpes por face (e não 75 golpes), considerando um tráfego médio. Para comparação, são apresentados também os resultados da mistura asfáltica à quente convencional executados com 5% de teor de ligante.

Determinações	CAP 50/70		
	Souza et al. (2006)	Rohde (2007)	Mistura morna
Resistência à Tração, (MPa)	1,020	1,400	0,975
Módulo de Resiliência (MPa)	2858	5500	3212
MR/RT	2802	3929	3294

Quadro 10: valores de RT, MR e MR/RT das misturas asfálticas mornas e a convencional

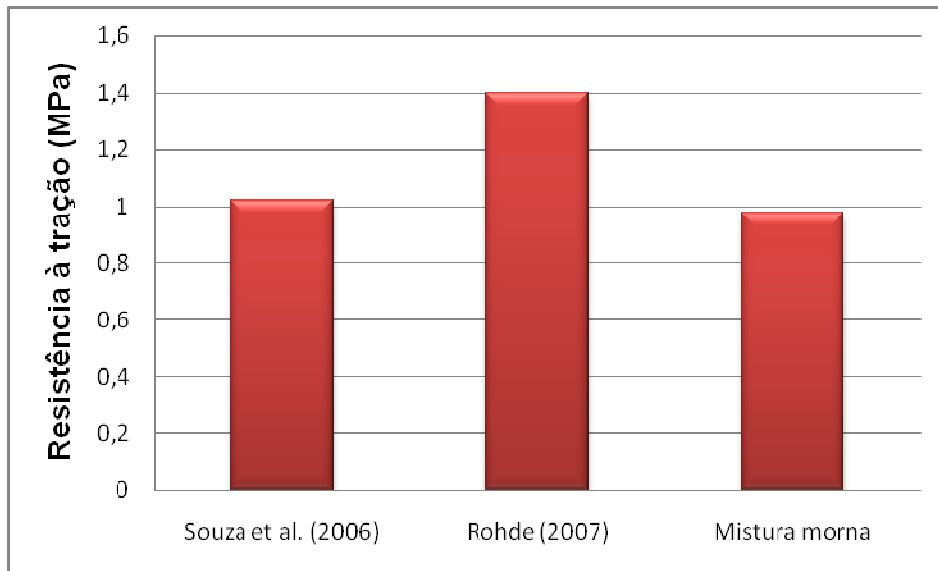


Figura 18: resultados de RT

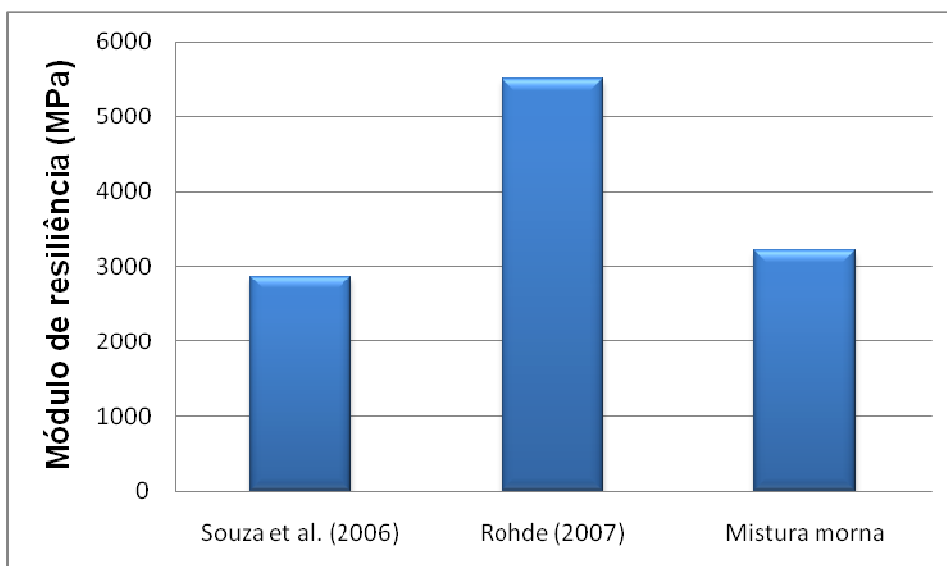


Figura 19: resultados de MR

As misturas mornas apresentaram valores de módulo de resiliência e de resistência à tração muito próximos, no entanto, comparados com os valores da mistura convencional, a inserção de zeólitas fez abaixar os valores, em aproximadamente 70% nas resistências a tração e 55% nos módulos de resiliência.

Outro parâmetro avaliado foi a razão entre estas variáveis, MR/RT, que vem sendo utilizado como indicador da vida de fadiga de misturas, uma vez que, agrega informações de rigidez e resistência. Conforme os resultados apresentados no quadro 10 e na figura 20, os valores das misturas mornas foram baixos, quando comparados com a mistura convencional. Espera-se valores baixos de rigidez para evitar elevadas tensões que levam ao trincamento, e altos valores de resistência, pois, alta resistência à tração é associada a uma maior resistência à fadiga (BERNUCCI et al., 2008, p. 301-302). Os resultados das misturas mornas refletem a manutenção da trabalhabilidade e compactabilidade da mistura com a inserção de zeólitas, já que a micro espuma resultante do fenômeno da liberação da água atua como um lubrificante entre o ligante e o agregado

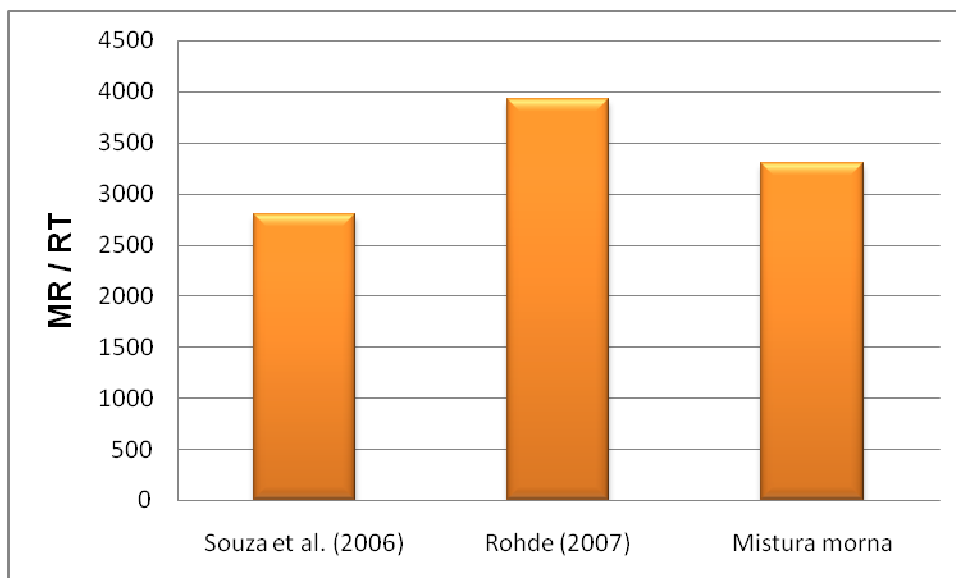


Figura 20: valores de MR/RT

### 5.2.3 Perda por umidade induzida

Este ensaio é indicado para avaliar indiretamente a adesividade agregado-ligante asfáltico através da sensibilidade à ação deletéria da água. Os CP moldados pelo método Marshall

apresentaram volume de vazios entre 6 e 8%, e para obter estes vazios, os CP foram executados com 10 a 12 golpes por face.

Durante o processo de condicionamento dos CP, ou seja, após o congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  por 16 horas e a imersão em banho a  $60^{\circ}\text{C}$ , as amostras se desintegraram, conforme mostra a figura 21.



Figura 21: desintegração dos CP durante o ensaio de perda por umidade induzida

Os resultados sugerem a susceptibilidade da mistura morna pesquisada ao deslocamento da película asfáltica do agregado e a necessidade de se avaliar o uso de algum tipo de aditivo (dope).



## 6 CONCLUSÕES

Com a execução de misturas asfálticas elaboradas com adição de 0,3 % zeólitas produzidas a partir das cinzas oriundas da queima do carvão na geração de energia, com teor de 5% de ligante, granulometria que se enquadra na Faixa C do DNIT, nas temperatura de mistura de 120°C e compactação de 95°C, simulando um tráfego pesados (75 golpes por face), chegou-se as seguintes conclusões:

- Os parâmetros volumétricos, como o volume de vazios e a relação betume-vazios, se enquadram dentro dos limites recomendados pelo DNIT-ES 031 para serviços em concreto asfáltico;
- A estabilidade ficou abaixo do mínimo para o uso da mistura em camadas de rolamento, no entanto, avaliando-se pelos critérios adotados na NBR 12891, o valor foi satisfatório;
- Houve uma diminuição na fluência da mistura morna quando comparada com a mistura convencional, indicando que a inserção de zeólitas afetou a rigidez da mistura;
- O comportamento resiliente e a resistência à tração indireta ficaram próximos ao da mistura morna pesquisada por Souza et al. (2006), apesar das condições desta mistura divergir em vários aspectos;
- Os valores de RT e MR foram inferiores aos valores da mistura asfáltica a quente convencional, com reduções de 70% nos resultados de RT e 55% na de MR;
- Os valores da razão MR/RT foram baixos, um indicativo que esta mistura apresenta rigidez que evita elevadas tensões que levariam ao trincamento, e alta resistência à tração associada a uma maior resistência à fadiga;

Durante o ensaio de perda por umidade induzida ocorreu a desintegração dos CP durante a fase de condicionamento devido à provável falta de adesividade entre o ligante, com adição de zeólita, e os agregados de origem basáltica. Sugere-se a adição de algum aditivo na mistura que proporcione tal propriedade.

## REFERÊNCIAS

AL-RAWASHDEH, A. S., **Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements**. 2008. 104 f. Thesis (Master of Science) – Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, Athens, USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891**: dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 15617**: misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2008.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA OSÓRIO-PORTO ALEGRE S/A-UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO. **Estudo de misturas asfálticas “mornas”**. Porto Alegre, 2007.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-mix Asphalt**: european practice. Technical Report FHWA. Washington, DC: Intenational Technology Scanning Program, Federal Highway Administration, USA, 2008.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 043/95**: misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 138/94**: misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994a.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 133/94**: misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994b.

FERRET, L. S. **Zeólitas de Cinzas de Carvão**: síntese e uso. 2004. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de Asfalto**. Rio de Janeiro: Petrobrás. 1989.

NAKAHARA, S. M.; ROHDE, L.; MALLMANN, E.; CERATTI, J. A. Misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas de resíduos de carvão. In.: ENCONTRO DE ASFALTO, 20., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2010a.

NAKAHARA, S. M.; FERRET, L.; ROHDE, L.; MALLMANN, E. Zeólitas artificiais: sintetizadas de cinzas de combustão de carvão mineral e seu uso em misturas asfálticas mornas. **Asfalto em Revista**. Rio de Janeiro, ano II, n. 10, mar./abr., p. 20-23, 2010b.

ROHDE, L.; **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVEIRA, L. E. M.; SOUZA, A. C.; SOARES, J. B.; SANT'ANA, H. B. Avaliação das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas Utilizando Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por polímero. In.: 4°.DPETRO, 2007. Campinas, São Paulo.

SOUZA, A. C.; SILVEIRA, L. E. M.; SANT'ANA, H. B.; SOARES, J. B. Produção e Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Obtidas a Temperaturas Intermediárias pela adição de zeólitas. In.: ENCONTRO DE ASFALTO, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2006.