

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**POLIANA NAISSINGER HARTMANN**

**ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

**Alegrete  
2019**

**POLIANA NAISSINGER HARTMANN**

**ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. D.Sc. Jaelson Budny

**Alegrete  
2019**

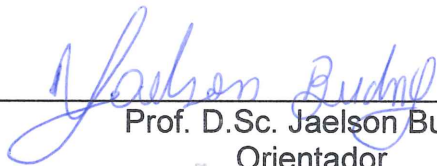
POLIANA NAISSINGER HARTMANN

**ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM  
MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE  
POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de novembro de 2019

Banca examinadora:



---

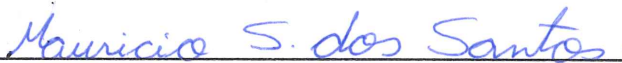
Prof. D.Sc. Jaelson Budny  
Orientador

Universidade Federal do Pampa



---

Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann  
Universidade Federal do Pampa



---

Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos  
Universidade Federal do Pampa

Dedico este trabalho com todo meu amor  
aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força e coragem para enfrentar os obstáculos que encontrei pelo caminho.

Agradeço imensamente aos meus pais Lauri e Maria Eli, pelo amor e apoio que sempre me acalmaram nas horas de desespero, por se esforçarem tanto sol a sol para que eu pudesse seguir meus sonhos e pela confiança que sempre depositaram em mim. Eu os amo muito e vocês foram os melhores pais que eu poderia querer.

Ao meu namorado Gabriel Denardin, por todo amor, carinho e dedicação, por ter sido meu pilar de apoio durante os tempos difíceis e por não ter me deixado desistir quando tudo parecia difícil.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jaelson Budny, agradeço por todo auxílio na realização desta pesquisa. Mas muito além disso, por ter sido um amigo durante a graduação e ser um exemplo de profissional que certamente buscarei seguir.

Aos demais professores que fizeram parte da minha formação como Engenheira Civil, que ao longo do tempo serviram como mentores de conhecimento técnico e de vida.

A pedreira ICCILA pela doação dos agregados e a CBB Asfaltos pela gentil doação do ligante.

Ao Professor Luciano Specht, ao técnico do GEPASV Fernando Boeira e a Universidade Federal de Santa Maria, por cederem gentilmente o laboratório para que as moldagens e os ensaios fossem possíveis.

Aos amigos, Andreisson Rocha, Charles Cenci, Gracieli Vieira, Mariane Kyiotani, Mayara Delonzek e Pedro da Silva, agradeço pelo companheirismo, pela amizade, pelos momentos de consolo e pelas horas e horas de estudo. Sem vocês eu não teria chegado até aqui, obrigada meus colegas engenheiros.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.

Albert Einstein

## RESUMO

Com o crescente aumento do tráfego rodoviário, combinado com a degradação precoce dos pavimentos e a falta de investimentos na ampliação e na manutenção do modal, novas tecnologias e materiais são avaliados para amenizar os defeitos no pavimento ao longo do tempo. Devido aos bons resultados que as adições de fibras, têm proporcionado na matriz de concreto convencional e na estabilidade de solos, no que se refere ao aumento na capacidade de suporte, o presente trabalho tem por finalidade analisar a viabilidade da adição de fibras de polipropileno no comportamento mecânico do concreto asfáltico. O trabalho consistiu na caracterização dos materiais utilizados, dosagem Superpave e a realização dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e de Módulo de Resiliência. Os ensaios foram realizados em misturas de Concreto Asfáltico com adição de 0,25% e 0,50% de fibras de polipropileno de 20 mm de comprimento e 0,85 mm de espessura. Os resultados mostram que a fibra de polipropileno, conserva propriedades benéficas para o asfalto até 160 °C, com derretimento em 170 °C. A adição de fibras revelou uma tendência do aumento da resistência a tração, enquanto o módulo de resiliência tende a diminuir, tornando a mistura menos rígida, entretanto, todos valores de RT e MR estão dentro dos limites normatizados. Assim, pode-se afirmar que a utilização das fibras de polipropileno, como material de reforço em pavimentos flexíveis é válida, pois a fibra tende a melhorar as propriedades mecânicas da mistura.

Palavras chave: misturas asfálticas, fibras de polipropileno, propriedades mecânicas.

## **ABSTRACT**

With the growing increase in road traffic, combined with the early degradation of pavements and the lack of investments in modal expansion and maintenance, new technologies and materials are being evaluated to alleviate pavement defects over time. Due to the good results that the fiber additions have provided in the conventional concrete matrix and in the soil stability, regarding the increase in the carrying capacity, the present work aims to analyze the viability of the addition of polypropylene fibers on the mechanical behavior of asphalt concrete. The work consisted of the characterization of the materials used, Superpave dosing and tensile strength tests by diametral compression and resilience modulus. The tests were carried out on asphalt concrete mixtures with the addition of 0.25% and 0.50% of 20 mm length and 0.85 mm of thickness polypropylene fibers. The results show that polypropylene fiber retains beneficial properties for asphalt up to 160 ° C, with melting at 170 ° C. The addition of fibers revealed a tendency to increase tensile strength, while the resilience modulus tends to decrease, making the mixture less rigid, however, all RT and MR values are within the normalized limits. Thus, it can be argued that the use of polypropylene fibers as a reinforcement material in flexible pavements is valid because the fiber tends to improve the mechanical properties of the mixture.

Keywords: asphalt mixtures, polypropylene fibers, mechanical properties.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estado de tensões de um pavimento sob ação da roda de um veículo .....	21
Figura 2 - Sequência dos procedimentos metodológicos realizados.....	29
Figura 3 - Agregados utilizados na pesquisa.....	30
Figura 4 - Limites das faixas granulométricas para os agregados utilizados .....	31
Figura 5 - Temperatura X Viscosidade.....	33
Figura 6 - Rótulo da fibra de polipropileno utilizada na mistura.....	34
Figura 7 - Fibra de polipropileno cortada com 20 mm de comprimento .....	34
Figura 8 - Máquina para auxiliar o corte das fibras .....	34
Figura 9 - Microscópio ótico .....	35
Figura 10 - Prensa hidráulica .....	36
Figura 11 - Procedimento de mistura do CA .....	37
Figura 12 - Procedimento de ensaio de massa específica máxima .....	40
Figura 13 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente.....	41
Figura 14 - Exemplo de determinação do teor ótimo de ligante .....	42
Figura 15 - Plano de ruptura das amostras por compressão diametral.....	42
Figura 16 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de RT .....	43
Figura 17 - UTM - 25 do laboratório da Universidade Federal de Santa Maria .....	45
Figura 18 - Análise física das fibras para 1 hora de exposição .....	47
Figura 19 - Encurtamento da fibra exposta a temperatura de 160 °C .....	47
Figura 20 - Análise física da fibra com tempo de exposição de 2 horas .....	48
Figura 21 - Análise física da fibra para tempo de exposição de 4 horas .....	48
Figura 22 - Obtenção do módulo de elasticidade secante .....	49
Figura 23 - Tensão e deformação para diferentes temperaturas e tempos de exposição .....	51
Figura 24 - Comportamento das fibras para o tempo de exposição de 1 hora.....	52
Figura 25 - Comportamento das fibras para o tempo de exposição de 2 horas .....	52
Figura 26 - Comportamento das fibras com o tempo de exposição de 4 horas .....	53
Figura 27 - Massa específica máxima X Teor de ligante.....	54
Figura 28 - Massa específica aparente X Teor de ligante .....	54
Figura 29 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra referência .....	55
Figura 30 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra com 0,25% .....	55

Figura 31 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra com 0,50% .....	55
Figura 32 - Média dos resultados de RT .....	57
Figura 33 - Média dos resultados de MR .....	58
Figura 34 - Teste Tukey para os resultados de RT .....	59
Figura 35 - Teste Tukey para os resultados de MR .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria por lavagem .....	31
Tabela 2 - Caracterização dos agregados .....	32
Tabela 3 - Temperaturas para a execução das misturas .....	33
Tabela 4 - Organização de níveis de serviço do método Superpave .....	38
Tabela 5 - Critérios de Compactação usando o Compactador Giratório .....	39
Tabela 6 - Módulo de elasticidade secante da linha de polipropileno .....	50
Tabela 7 - Caracterização volumétrica dos CP's da moldagem .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CP – Corpo de Prova

DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ETA – Estações de Tratamento de Água

ETE – Estações de Tratamento de Esgoto

GEPPASV - Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária

Gmb - Massa Específica Aparente

Gmm - Massa Específica Máxima

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

PRO – Procedimentos

RBV - Relação Betume-Vazios

RT – Resistência à Tração

SMA - *Stone Matrix Asphalt*

SSF - Segundos *Saybolt-Furol*

VAM - Vazios no Agregado Mineral

VTM – Número de Vazios Total da Mistura

Vv - Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
<b>1.2</b>	<b>Estrutura da Pesquisa</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Uso de Fibras na Construção Civil</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Fibras de Polipropileno</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Problemas e Soluções Usualmente Empregados em Pavimentos</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Fibras Utilizadas como Reforço em Pavimentos Asfálticos</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>29</b>
3.1.1	Agregados	30
3.1.2	Ligante	32
3.1.3	Fibras	33
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>36</b>
3.2.1	Misturas	36
3.2.2	Dosagem Superpave	37
3.2.2.1	Massa Específica Aparente (Gmb)	39
3.2.2.2	Massa Específica Máxima (Gmm)	40
3.2.2.3	Volume de Vazios x Teor Ótimo de Ligante	41
3.2.3	Ensaio Mecânicos	42
3.2.3.1	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	42
3.2.3.2	Ensaio de Módulo de Resiliência	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização Física das Fibras de Polipropileno</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização Mecânica das Fibras de Polipropileno</b>	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização Volumétrica das Misturas Asfálticas</b>	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>Caracterização Mecânica das Misturas Asfálticas</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O histórico da pavimentação brasileira teve início no século XIX, influenciado pela ineficiência de outros meios de transportes, pela necessidade de escoamento de bens e pelo crescimento do intercâmbio entre as regiões. Conseqüentemente, surge em 1928 a primeira rodovia pavimentada do país, conhecida hoje como Washington Luís, a qual possuía uma extensão de 506 km e ligava a cidade do Rio de Janeiro a Petrópolis (CNT, 2006).

Com todos os benefícios gerados na mobilidade, o governo JK enfatizou esforços para aumento do modal rodoviário, passando de 800 km de estradas pavimentadas para cerca de 5 mil km de rodovias, tal situação incentivou a nascente indústria automobilística nacional (SENATUS, 2002). Mas, o que impulsionou de fato a pavimentação asfáltica, foi a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), oriundo do imposto sobre os combustíveis líquidos, e a criação da Petrobrás (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Atualmente no Brasil, a matriz de transportes rodoviária é dominante, correspondendo a mais de 90% do transporte de passageiros e mais de 60% do transporte de cargas. A malha rodoviária é de aproximadamente 1,72 milhões de km, porém, apenas 12,4% destes possuem pavimentação, o que deixa claro a falta de investimentos e as dificuldades enfrentadas pelo principal modal do país (CNT, 2018).

Uma pesquisa realizada pelo CNT (2018), mostra que de 2008 a 2018 a malha rodoviária teve uma expansão de 8,4%, enquanto a frota de veículos de 82,4%, gerando um aumento significativo no tráfego e, por consequência, reduzindo a vida útil do pavimento, o qual não foi projetado para estas condições. Junto a isso, acredita-se que a falta de manutenção periódica, além de dificultar o transporte, acabe afetando a economia, pois a lentidão do trânsito gera congestionamentos e consequentes atrasos nas mercadorias, além disso, o mau estado do pavimento aumenta os acidentes causando prejuízos aos cofres públicos.

Outro fator que prejudica as rodovias é o excesso de peso dos veículos de carga, fazendo com que haja uma evolução da deterioração dos pavimentos, comprometendo o conforto e a segurança dos usuários, aumentando os custos de operação dos automóveis. Albano (2005), afirma que uma sobrecarga de 20%, o que é permitido pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB), levam a reduções de até 80%

da vida útil estimada para um pavimento delgado, sendo considerado o principal responsável pela sua degradação.

Tratou-se até o momento de problemas que afetam o pavimento após a sua construção, no entanto, existem fatores que prejudicam a qualidade e durabilidade do mesmo durante a fase de projeto e execução, como o método de dimensionamento e os materiais utilizados. Segundo Souza Júnior (2018), o método de dimensionamento atual é o método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o qual não leva em consideração alguns parâmetros, que proporcionam na maioria das vezes uma vida útil menor que a estimada. Em relação aos materiais, têm-se o conhecimento de que em muitas regiões não há agregados de boa qualidade, ou seja, com Índice de Suporte Califórnia (ISC, ou do inglês, CBR – *California Bearing Ratio*) inferior ao exigido pelo norma, além disso, o envelhecimento excessivo ou excesso de ligante e a má compactação podem levar a defeitos como trincas, afundamento de trilha de roda, exsudação, entre outros.

Como o pavimento asfáltico revela-se muito suscetível a defeitos em função dos materiais utilizados, do modo de execução, dos efeitos climáticos e até mesmo do método de dimensionamento, vários pesquisadores buscam novos materiais para melhorar o desempenho do mesmo contornando o atual problema. Nessa busca observou-se que o uso de fibras tem se mostrado satisfatório, pois tende a melhorar o desempenho, principalmente frente à resistência mecânica e ao controle de fissuração. Outros fatores que tem expandido o uso de fibras é o baixo custo do material e por não apresentarem efeitos nocivos à saúde humana.

Pensando no asfalto como um todo, outros benefícios são trazidos pela adição de modificadores, como afirma FERNANDES *et al.* (2007), os quais são listados a seguir:

- Endurecimento da mistura e do ligante em altas temperaturas, que tendem a diminuir a deformação;
- Maior flexibilidade do ligante a baixas temperaturas, podendo assim minimizar a formação de fissuras térmicas;
- Melhora na resistência à fadiga, na adesividade, na abrasão e envelhecimento;
- Formação de filmes mais espessos envolta dos agregados;

- Redução da espessura de pavimento flexíveis e da suscetibilidade à água;
- Redução dos custos de manutenção e restauração do pavimento.

Outros autores confirmam a citação de Fernandes *et al.* (2007), como é o caso de Kaloush *et al.* (2008) ao concluírem que, a adição de fibras gerou um aumento no desempenho das misturas e que isto pode ser levado em consideração durante o processo de dimensionamento, reduzindo assim, a espessura da camada de revestimento. As fibras de polipropileno, apresentam alta flexibilidade e tenacidade, o que proporciona um aumento da resistência de impacto (TAYLOR, 1994 apud HOMEM, 2002). Heck (2015) afirma que a adição destas fibras faz com que o asfalto suporte maiores deformações num período de tempo com tensões mais baixas que as de pico, mantendo-se o módulo de resiliência padrão para este tipo de mistura, além de retardar os defeitos de fadiga.

Apesar do uso de fibras ter crescido nos últimos anos, pouco se sabe sobre a aplicação e os benefícios desses materiais em pavimentos asfálticos, portanto este trabalho visará contribuir na análise mecânica em misturas de concreto asfáltico com adição de fibra de polipropileno.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a viabilidade mecânica da adição de fibras de polipropileno em misturas de concreto asfáltico.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Verificar se a fibra de polipropileno resiste a exposição nas temperaturas de produção da mistura de concreto asfáltico;
- Avaliar a influência da adição de 0,25% e 0,5% de fibras de polipropileno com espessura de 0,85 mm e comprimento de 20 mm nos parâmetros de: dosagem Superpave, resistência à tração e módulo de resiliência.



## **1.2 Estrutura de Pesquisa**

O presente trabalho inicia o primeiro capítulo com uma introdução sobre o problema estudo, junto aos objetivos do tema. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre os principais conceitos. Os materiais utilizados e os procedimentos experimentais realizados durante a investigação são apresentados no terceiro capítulo, enquanto os resultados e discussões podem ser encontrados no quarto capítulo. Finalmente no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e suas contribuições para a pavimentação.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Uso de Fibras na Construção Civil

A história de materiais reforçados com fibras é datada de mais de 3000 anos atrás. Na Bíblia, no texto de Êxodo, há registros de tijolos de argila reforçados com palha e de crina de cavalo em outros materiais cimentícios, utilizados com o intuito de aumentar a ductilidade da mistura. Seu uso continuou crescendo e as técnicas de reforço se expandiram para estabilizar solos, como é o caso de partes da Muralha da China e as estradas construídas pelos Incas no Peru, onde se empregou lã de lhama como reforço, e mais tarde na pavimentação, no qual em 1926 o departamento de estradas da Carolina do Sul (EUA) usou mantas de algodão como reforço de camadas asfálticas (PALMEIRA, 1992 apud SOUZA, 2010).

As fibras podem ser definidas como materiais finos e alongados, podendo ser de origem natural, artificial ou sintética. As fibras naturais são encontradas prontas na natureza, as artificiais são produzidas pelo homem através de materiais naturais e as sintéticas são também produzidas pelo homem, porém, oriundas de produtos químicos (DOBBIN e ROCHA, 2011). As propriedades de algumas das fibras comumente utilizada, estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,8	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	43557,0	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2,0-3,0
Polipropileno	20-200	0,9	1,0-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10,0	1,5	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9,0	1,9	230,0	2,6	1,0
Náilon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10,0	0,3-0,5	-
Acrílico	18,0	1,2	14-19,5	0,4-1,0	3,0
Polietileno	-	1,0	0,3	0,7x10 <sup>-3</sup>	10,0
Fibra de madeira	-	1,5	71,0	0,9	-
Sisal	10-50	1,0-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,0	10-45	3,7	0,0

Fonte: FIGUEIREDO (2011)

Com a grande variedade de composições e finalidades, as fibras tem sido cada vez mais utilizadas na construção civil, as quais estão destinados a melhora das propriedades de concretos, argamassas, pavimentos de concreto e de asfalto. No concreto, segundo Figueiredo (2011) o uso de fibras, quando em proporções e com as propriedades adequadas, diminuem a velocidade de propagação de fissuras, além de conferir certa capacidade resistente após a sua fissuração. Já Casagrande (2001) afirma que as fibras em matriz cimentadas tendem a reforçar o compósito, quanto a resistência a tração e melhorar a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis. Bentur e Mindess (2007) acrescentam, que as fibras não afetam a resistência a compressão e o módulo de elasticidade.

Araújo *et al.* (2005) relatam que a adição de fibras de polipropileno à argamassa de assentamento, melhora suas propriedades mecânicas iniciais, como resistência a compressão e tração, deformabilidade e distribuição dos esforços no conjunto. Se tratando de fibras de acrílicas, Oliveira *et al.* (2007) afirmam que os benefícios são basicamente no controle da retração na fase plástica. Em relação a estabilização de taludes, a adição de fibras ao solo diminuiu a susceptibilidade de deslocamentos laterais e deformações do terrapleno, e promovem aumento na capacidade de carga do solo (TRINDADE *et al.*, 2005).

Tratando-se de pavimentos de concreto, Silva (2017) afirma que o uso de fibras de aço e de nylon, não apresentou aumento de resistência à tração, mas influenciou positivamente na microfissuração superficial, responsável pelo aumento da deformação. Em pavimentos do tipo concreto asfáltico (CA), pouco se sabe sobre o uso e as vantagens da incorporação de fibras na mistura, o que se tem de conhecimentos até então, é que fibras vegetais como o capim Annoni tendem, segundo Lopes (2017), a não apresentar melhoria quanto a resistência ao desgaste. Entretanto, fibras poliméricas contribuem para retardar os defeitos de fadiga (HECK, 2015), além disso, Souza (2010) afirma que foram encontradas melhoras na resistência a tração.

## **2.2 Fibras de Polipropileno**

Bentur e Mindess (2007) definem fibras de polipropileno como material sintético de diferentes propriedades, tamanhos e formas, fabricadas a partir de um homopolímero, com módulo de elasticidade entre 3,5 a 10 GPa. As fibras de

polipropileno podem ser fornecidas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. As microfibras, apresentam-se, em duas formas, as monofilamento e as fibriladas, a estrutura das fibriladas por ser em formato malha de finos filamentos, promove um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, devido ao efeito de intertravamento (BENTUR e MINDESS, 1990), já as fibras de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão. As macrofibras poliméricas começaram a ser comercializadas nos anos de 1990, seu formato original era em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa. Atualmente vários fabricantes disponibilizam diferentes tipos de macrofibras no mercado brasileiro, estas foram concebidas para se obter um reforço estrutural, nos mesmos moldes que uma fibra de aço (FIGUEIREDO, 2011).

Quanto a sua composição, são constituídas por um material polimérico termoplástico, sendo este caracterizado por possuir uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, as quais encontram-se separadas e podem deslizar uma sobre a outra (HOLLAWAY, 1994 apud, HOMEM 2002). Característica esta, que explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e o aumento substancial da resistência ao impacto aos materiais em que é incorporada (TAYLOR, 1994 apud HOMEM, 2002).

Vários são os motivos que justificam o uso de fibras de polipropileno em pesquisas, no plano técnico, pode-se citar a compatibilidade mecânica e física, além disso é quimicamente inerte, não absorve água, não enferruja e não se decompõe. Já no plano econômico, o aumento do uso dessa fibra se justifica pelo baixo custo e fácil disponibilidade, soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece qualquer dano prejudicial à saúde dos operários. (RODRIGUES e MONTARDO, 2002).

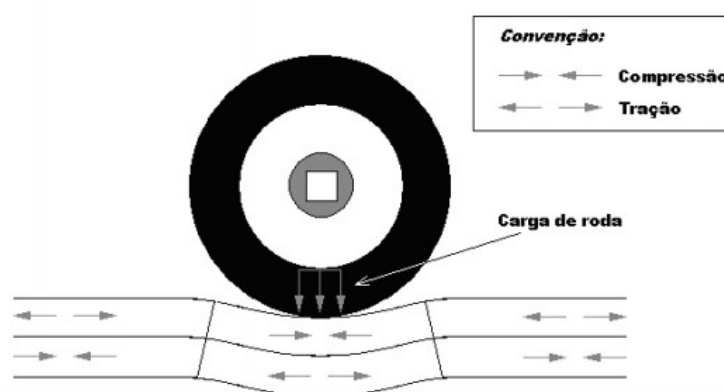
Apesar da literatura afirmar que o uso destas fibras no asfalto não é frequente, devido a sua baixa resistência a altas temperaturas, o uso desse material tem começado a crescer, sendo utilizado como modificante asfáltico ou como reforço de misturas pré-misturadas a frio. Neste contexto, o *Ohio State Department of Transportation* (ODOT) publicou normas para a utilização de fibras de polipropileno em concreto asfáltico de alto desempenho (JAHROMI e KHODAII, 2008).

### 2.3 Problemas e Soluções Usualmente Empregados em Pavimentos

Ao realizar a análise mecânica de pavimentos, alguns parâmetros são de grande relevância, como o módulo de resiliência, a resistência a tração e a energia de fratura. O módulo de resiliência, pela definição da norma, é a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa, e a deformação específica recuperável e correspondente à tensão aplicada, numa dada temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2008). De forma simplificada pode ser definido como, a capacidade do material não absorver deformações após o cessamento da ação da carga.

O ensaio de resistência à tração indireta ou compressão diametral, é um dos ensaios mais difundidos no país quanto a análise de deformabilidade, este ensaio tem a finalidade de simular o comportamento de um veículo sobre o pavimento, como mostra a Figura 1 e assim, é possível avaliar a resistência máxima à tração suportada pelo pavimento. O Quadro 2 apresenta valores de MR, RT e MR/RT para misturas asfálticas convencionais, nos quais os autores utilizaram o CAP 50/70, a faixa C do DNIT e a dosagem Superpave.

Figura 1- Estado de tensões de um pavimento sob ação da roda de um veículo



Fonte: CEZARO JUNIOR (2008)

Quadro 2 – Comportamento mecânico de misturas realizadas por diferentes autores

<b>Características</b>	<b>Autor</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>MR/RT (MPa)</b>
Concreto Asfáltico - CAP 50/70	Araújo <i>et al.</i> (2008)	2982	0,88	3389
Concreto Asfáltico - CAP 50/70	Borges <i>et al.</i> (2016)	4496	1,16	3876
Concreto Asfáltico - CAP 50/70	Bruxel (2015)	3584	1,15	3117
Concreto Asfáltico - CAP 50/70	Pinheiro <i>et al.</i> (2014)	3988	1,16	3438
Concreto Asfáltico - CAP 50/70	Machado <i>et al.</i> (2017)	3733	1,2	3111

Fonte: Adaptado de MACHADO *et al.* (2017)

O último parâmetro apresentado no Quadro 2 é a relação entre os parâmetros de módulo de resiliência e resistência à tração, este vem sendo utilizado como parâmetro da vida útil de fadiga de misturas, sendo desejável um pequeno valor na razão a fim de que a mistura apresente: i) baixa rigidez para evitar a alta absorção de tensões que levam a um trincamento prematuro do revestimento, ii) alta resistência à tração que uma vez que está associada a resistência à fadiga. Deve-se levar em conta também, que os módulos de resiliência variam ao longo do tempo em função do envelhecimento do ligante, o que enrijece o mesmo levando ao aumento da rigidez do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para melhorar as características citadas acima, Pavei *et. al* (2014) adicionaram cinza pesada na camada de revestimento de misturas asfálticas, este processo trouxe um incremento da resistência à tração, resultado do aumento de pontos de contato intergranular, isto se deu pela cinza pesada preencher os vazios e a deficiência de finos da mistura. Já Mello (2012) acrescentou Evotherm, um tipo de composto químico que tem por objetivo melhorar o comportamento das misturas asfálticas, quando estas são produzidas e compactadas a temperaturas inferiores daquelas usualmente praticadas. Seus resultados foram satisfatórios tanto para módulo de resiliência quanto para a resistência à tração por compressão diametral, sendo que estas apresentaram valores acima do comumente utilizado no Brasil para misturas asfálticas quentes.

Outra alternativa, é o uso de cal em misturas asfálticas do tipo CA, Castro (2011) relata que estas alteraram as características volumétricas, reduzindo o volume de vazios e o valor da densidade relativa máxima medida, e ainda, elevaram o valor

de densidade aparente, além disso houve um aumento no módulo de resiliência e na resistência à tração, melhorando a mistura como um todo. Grande (2011) confirmou as afirmações de Castro (2011) em relação à cal, e foi além, adicionando ácido polifosfórico o que gerou um aumento no módulo de resiliência, na resistência à tração e na flexibilidade.

Martinez (2011) tentou buscar um viés mais sustentável, adicionando lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE), e lodo de estações de tratamento de água (ETA), e observou que a mistura com lodo de ETA apresentou maiores valores de resistência à tração por compressão diametral, e de módulo de resiliência que as misturas de referência. Semelhantemente as misturas do lodo de ETE, adicionado diretamente no agregado graúdo apresentaram melhoria das propriedades mecânicas, quando comparadas às amostras de referência. Já Fonseca *et al.* (2016) incluíram geossintéticos entre as camadas do pavimento, o que implicou em acréscimos de resistência à tração na flexão, além disso constatou que resultados semelhantes foram encontrados para geotêxtil e geocomposto.

Balbo (2007) seguiu uma linha mais conservadora, visto que o uso de polímeros modificados já vem sendo estudado a alguns anos, ele afirma que os principais benefícios são de tornar o material mais rígido ao receber esforços, sofrendo menores deformações e mais maleável ao aliviar os mesmos esforços, apresentando assim maior recuperação elástica quando comparadas ao concreto asfáltico convencional. Além disso, eles tendem, a elevar a coesão e a resistência à deformação plástica e a resistência ao envelhecimento, atuam também, reduzindo a fissuração e a fadiga, a susceptibilidade térmica e a viscosidade à temperatura de aplicação, e ainda melhorar a adesividade, tornando-o menos suscetível a defeitos.

## **2.4 Fibras Utilizadas como Reforço em Pavimentos Asfálticos**

O Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é uma mistura entre agregados minerais e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Os agregados têm a função de proporcionar a resistência mecânica e estabilidade da mistura, enquanto que o CAP de promover a aglutinação, flexibilidade, impermeabilidade e durabilidade da mistura asfáltica.

O pavimento é constituído em camadas, sendo que as mais inferiores de leito, subleito, base e sub-base são em geral submetidas principalmente a compressão,

deixando para o revestimento a função de resistir aos esforços de compressão e de tração devido à flexão (BENEDETTI *et al.*, 2012). Por ser a camada de revestimento a que sofre diferentes tipos de esforço, é de suma importância que ela resista de forma adequada a estes, para aprimorar estas características o uso de fibras tem se mostrado promissor, pois atua melhorando a resistência frente a estes esforços. Para tornar mais claro, o Quadro 3 apresenta os prós e contras de alguns tipos de fibras que foram testadas em misturas asfálticas.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do uso de alguns tipos de fibra no pavimento

Fibra	Vantagens	Desvantagens
Asbestos	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto Durabilidade Possível melhora de resistência de deformações permanentes	Nocivo à saúde
Celulose	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto	Suscetível à umidade Pouco ou nenhum efeito de reforço
Mineral	Alta capacidade de ligar-se ao asfalto	Pouco ou nenhum efeito de reforço
Vidro	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Fragilidade Baixa capacidade de aderência ao asfalto sem a utilização de tratamento superficial
Sintéticas >Poliéster >Polipropileno > Acrílica	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Baixa capacidade de aderência ao asfalto
Aço	Atua como reforço Possível melhora de resistência da mistura	Nenhuma capacidade de aderência ao asfalto Ferrugem Problemas de compactação e de característica da superfície

Fonte: PIARC (1998), apud SOUZA (2010)

Apesar dos benefícios comprovados do uso de fibras, na pavimentação ela não é difundida, provavelmente devido a necessidade de altas temperaturas das misturas. Os estudos nessa área são mais voltados para as misturas SMA (*Stone Matrix Asphalt*), sendo esta uma graduação descontínua com cerca de 70 a 80% de agregados graúdos, com 6 a 7% de ligante e com uma porcentagem aproximadamente 4% de índices de vazios. Nesse tipo de mistura a inclusão de fibras



não tem caráter de reforço, servindo apenas para evitar o escorrimento do ligante dentro na estrutura (BABADOPULOS *et al.*, 2008).

Neves Filho (2004) afirma que a mistura SMA produz uma película asfáltica em torno de 50 % mais espessa, do que a de uma mistura com granulometria contínua, o que inibe o desgaste, em contrapartida, isso acarreta em uma maior susceptibilidade ao escorrimento do ligante. Blasius e Carpio (2016) para solucionar este problema utilizaram lã de vidro e obtiveram resultados positivos, pois a mesma atua como estabilizante. Resultados semelhantes foram encontrados por Vale *et al.* (2007) que utilizaram fibras de coco e por Costa (2017) que empregou fibras de pseudocaule de bananeira, e que além de resultados eficazes quanto ao escorrimento ainda encontrou incremento nas propriedades mecânicas da mistura.

Gallo (2017), incrementou fibras vegetais de linho e de cânhamo (*Cannabis ruderalis*) no pavimento do tipo concreto asfáltico com índice de vazios de 4% e com o ligante 50/70 de origem alemã. As fibras possuíam comprimento de 40 a 60 mm e o teor utilizado foi de 0,2% da massa total da mistura. Com essas configurações obteve resultados satisfatórios para ambas as fibras que demonstraram melhora na resistência à tração e rigidez superior a mistura de referência, entretanto as fibras de linho se sobressaíram e atingiram valores próximos aos de misturas com polímero modificado.

Abtahi *et al.* (2013) decidiu optar pelo reforço híbrido e utilizou um composto com fibras de vidro e fibras de polipropileno (pp) em uma mistura de concreto asfáltico, com ligante de penetração 8,3 dmm. As fibras de vidros foram incrementadas no agregado quente, com 170 °C de temperatura, enquanto as fibras de polipropileno foram adicionadas ao ligante em temperatura de 150 °C, salientado que esta última mistura foi realizada pelo método úmido. Ambas as fibras foram cortadas com 12 mm de comprimento e foram introduzidas com diferentes combinações de porcentagens que variaram de: 0,2%, 0,1%, 0,05% e 0% para o vidro e de: 6%, 4%, 2% e 0% para o polipropileno em referência à massa total de ligante.

Os resultados obtidos para o tratamento de reforço híbrido, foram mais satisfatórios para a combinação de fibra pp 6% e 0,1% de fibras de vidro, pois apresentaram as propriedades mecânicas mais adequadas, elevando o valor da estabilidade em 25% em comparação com a amostra não modificada. De acordo com o aumento da VTM (número de vazios total da mistura) houve também um aumento na resistência de afundamento e na resistência da deformação induzida pelo tráfego,

sendo este, portanto, mais apropriado para usar em regiões quentes. Outra constatação do autor foi que ao aumentar a quantidade de fibras, houve um acréscimo de estabilidade Marshall e no VTM, em contrapartida houve redução do peso total da amostra, quando comparadas às amostras convencionais.

Mantendo-se no mesmo enfoque de fibras sintéticas, Jaskula *et. al* (2017) aditivaram fibras de aramida-polialfaolefina de 19 mm de comprimento no teor de 0,05% em três tipos diferentes de misturas para concreto asfáltico, sendo eles: mistura de granito e pedra calcária agregado com 5,6% (em peso) de ligante puro 50/70 para categoria meio tráfego de carga; mistura de agregado de granito com 4,6% (em peso) de ligante puro 35/50 e ligante modificado por polímero 25/55-60 para a categoria carga de tráfego médio e pesado. O tipo de fibra utilizado na pesquisa é recomendado no caso de misturas típicas de asfalto quente, nas quais a temperatura de produção e compactação está dentro da gama de 121 °C a 190 °C, então para este estudo, a temperatura de compactação para o ligante 35/50 e 50/70 foi de 135 °C ± 5 °C, enquanto que para as misturas de asfalto com ligante modificado foi de 145 °C ± 5 °C.

Seus resultados foram positivos quanto a adição de fibras, pois esta melhorou as características de desempenho da mistura, tais como a resistência à fissuração a baixa temperatura (craqueamento). Observou-se que a 20 °C, todas misturas modificadas com fibras apresentaram melhoras na resistência à flexão, tensão crítica e redução do módulo de rigidez à flexão, a mesma tendência foi observada na análise do fator de intensidade de tensão, mas as diferenças não eram significativas. Estudo do módulo dinâmico ( $E^*$ ) das misturas com fibras confirmou a capacidade de aprimoramento das propriedades a baixas temperaturas, para o ligante 50/70 com fibras o módulo encontrado foi inferior ao seu referencial, já o ligante 35/50 com fibra apresentou um ligeiro aumento e o ligante PMB 25/55-60 não apresentou diferença significativa. Em resumo, o comportamento das três misturas de asfalto com fibras em baixas frequências reduzidas foi semelhante para fazer referência a amostras, assim pode-se concluir que a sua resposta às deformações permanentes em altas temperaturas não será melhorada com o uso de fibras.

Mello *et al.* (2008) para reforçar o asfalto decidiu incrementar um composto de duas fibras sintéticas, sendo elas: fibras de polipropileno e fibras de aramida, possuindo 19,05 cm e 38,10 cm respectivamente. Esta mistura de fibras foi adicionada ao concreto convencional com ligante PG 70-10, a mesma possuía um índice de

vazios de 7%, para comparar os resultados foram feitas misturas convencionais com ligante PG 70-10 e PG 64-22.

Seus resultados foram bem promissores, quanto à falha pós-pico testada em ensaios triaxiais, esta mostrou uma queda gradual na força para mistura reforçada, este é um efeito desejável que foi atribuído à influência das fibras de aramida na mistura. Semelhante aos resultados triaxiais, os testes de deformação permanente também revelaram uma acumulação gradual de tensão permanente, uma propriedade desejável que também foi atribuída à função das fibras de aramida na mistura. Os valores de módulo dinâmico  $E^*$  medidos a temperaturas elevadas (37 e 54 °C) e frequência de carga de 10 Hz, estavam 1,5 a 1,6 mais elevada do que os das misturas convencionais utilizadas na presente investigação, indicando uma melhor resistência à deformação permanente ou afundamento de trilha de rodas, além disso foi realizada uma comparação entre a vida de fadiga obtida para a mistura de fibra reforçada e uma de referência com ligante PG 70-10, os melhores valores foram encontrados para a mistura de fibra reforçada, embora ambos tenham a mesma rigidez à flexão inicial.

Souza (2010) seguiu o mesmo princípio de Mello *et al.* (2008), incrementou fibras de polipropileno e fibras de aramida para avaliar os seus efeitos de reforço na mistura, para isto ele utilizou a granulometria da curva IV do Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens (DNER - ES), composta de agregados calcários e como aglutinante utilizou o CAP 50/70. As fibras foram cortadas com comprimento de 19 mm e foram adicionadas a mistura em uma proporção de 0,05% em relação à massa total da mistura, esta proporção era composta por 14% de fibra de aramida e 86% de fibra de polipropileno.

Na avaliação mecânica das misturas, houve aumentos na resistência à tração e no módulo de resiliência, além de características superiores para a viga de fadiga, entretanto os resultados para deformação permanente e desgaste foram piores para as misturas com fibras, este fato pode ser ocasionado pelas porcentagens de fibras utilizadas, visto que as fibras de aramida possuem alta resistência à tração, o que melhora o desempenho de fadiga e deformações permanentes, já a de polipropileno atua como agente modificante do ligante apenas. Um estudo adicional foi realizado aplicando apenas fibras de polipropileno derretidas no ligante, a fim de modificar o mesmo, os resultados indicaram acréscimo da consistência, o que reduziu as propriedades dúcteis, em contrapartida acarretou em melhorias frente à suscetibilidade térmica.

Em contrapartida aos demais pesquisadores, Khattak *et al.* (2013) concluíram que a adição de nanofibras de carbono em misturas asfálticas usinadas a quente não proporciona alterações nas características mecânicas, de módulo de resiliência e resistência a tração, mas tendem a melhorar a adesão da mistura, a vida de fadiga e a resistência a deformação permanente. Para chegar a esta conclusão, Khattak *et al.* (2012), utilizaram fibras com diâmetro de 60 a 150 nm e comprimento de 30 a 100  $\mu\text{m}$  com módulo de elasticidade de 600 GPa e resistência à tração de 7 GPa.

Heck (2015) e Aduati (2016) incrementaram fibras de polipropileno à mistura asfáltica do tipo CA, com o intuito de melhorar a resistência mecânica e a adesividade e vida de fadiga respectivamente, ambos utilizaram o teor de 0,5% de fibra em relação ao peso total da mistura e a mesma possuía um comprimento de 24 mm, além disso, utilizaram cal hidratada para ajuste da curva granulométrica. Aduati (2016) afirma que a resistência à tração retida apresentou um valor menor para a mistura reforçada com fibras, porém, ambas as misturas ficaram com valores acima de 80%, e que ratificada pela Metodologia Superpave, são consideradas adequadas em relação à adesividade, referente à vida de fadiga, resultados positivos, apresentando um ganho de 40% na vida de projeto estimada.

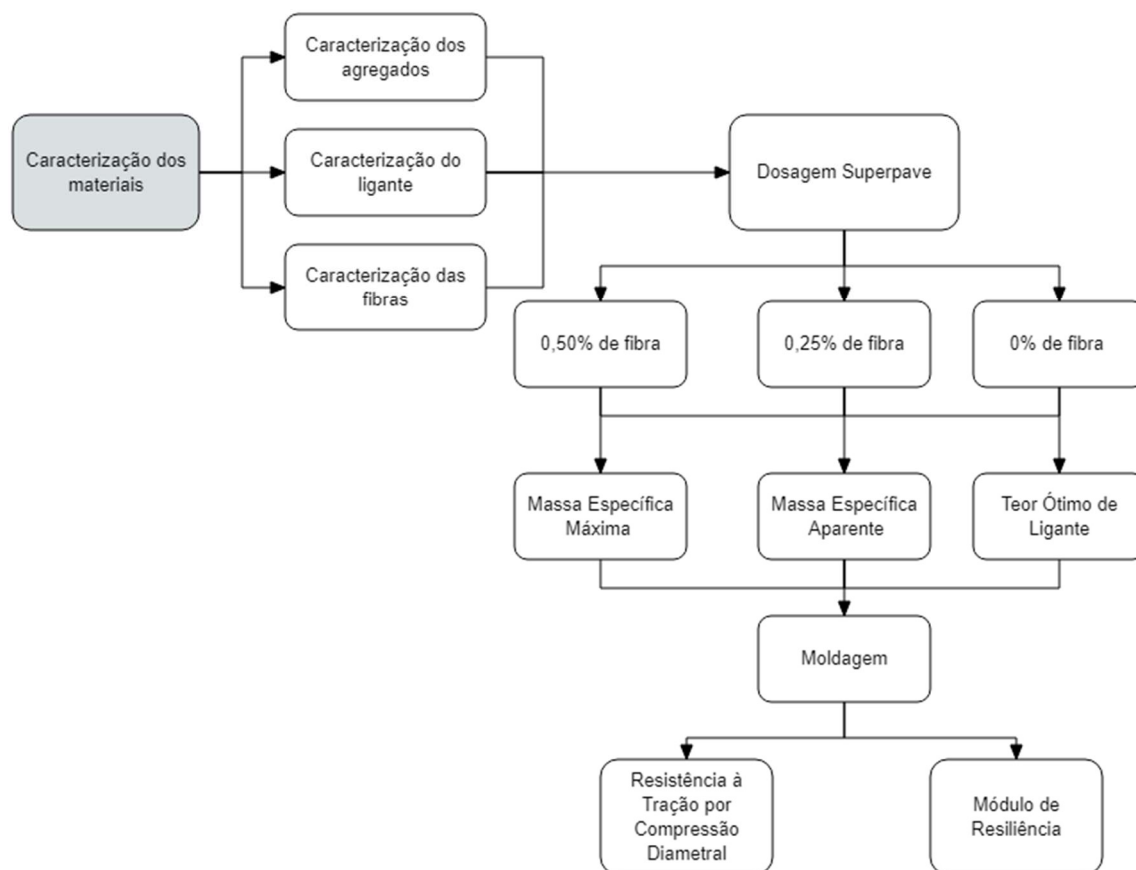
Heck (2015) afirma que a mistura convencional apresenta um menor teor de ligante, isso se dá pelo fato de que as fibras são apenas envoltas pelo ligante e seu interior apresenta ar, deixando assim também a mistura com o volume de vazios maior. Já em relação às características mecânicas, o módulo de resiliência apresentou valores inferiores para as misturas com fibras, sendo de 3084 MPa para a misturas convencional de 2183 e 2656 MPa para as com fibras, reduzindo assim a rigidez da composição, o que tende a retardar os defeitos oriundos da fadiga.

Breitenbach (2016) seguiu os mesmos procedimentos dos autores citados acima e utilizou fibras de polipropileno no asfalto, porém ela variou as porcentagens e o comprimento das fibras, utilizou 0,5% com comprimento de 12 mm, 1% com comprimento de 24 mm e 1% com comprimento de 12 mm. Seus resultados foram positivos, tanto para o módulo de resiliência como para a resistência a tração, assim como Heck (2015) para uma mistura com 0,5% de fibras e comprimento de 12 mm, o módulo de resiliência se mantém dentro dos padrões estabelecidos, já em relação à resistência a tração por compressão diametral os resultados indicaram que a adição de 0,5% de 12 mm resulta em maiores valores de pico em relação às demais misturas, seguida pela adição de 1% de 12 mm e 1% de 24 mm.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos, utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Para melhorar o entendimento, a Figura 2 apresenta de forma esquemática os procedimentos realizados.

Figura 2 - Sequência dos procedimentos metodológicos realizados



Fonte: Elaboração própria (2019)

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados durante a pesquisa foram, os agregados basálticos, o CAP 50/70, comumente utilizado no estado do Rio Grande do Sul, e as fibras de polipropileno. As respectivas caracterizações e ensaios são apresentados nos itens 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3.

### 3.1.1 Agregados

Os agregados são responsáveis pela formação da estrutura pétreo no CA, a qual é necessária para resistir às cargas oriundas do tráfego, além disso os agregados podem representar até 95% do peso da mistura e influenciam diretamente no seu comportamento mecânico. Por isso a importância da caracterização previa dos mesmos.

Os agregados utilizados neste trabalho, são provenientes de doação da pedreira ICCILA, situada às margens da BR - 290 no município de Rosário do Sul - RS. A Figura 3 apresenta as 3 granulometrias de agregados basálticos empregadas, a brita 1, a brita 0 e o pó de brita.

Figura 3 - Agregados utilizados na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2019)

Para conhecer a granulometria de maneira mais adequada, e considerar os materiais pulverulentos que ficam muitas vezes aderidos aos agregados maiores, foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento com lavagem, normatizado pela NBR NM 46 (2001). Este ensaio consiste, em lavar em água corrente certa quantidade de material na peneira de 75  $\mu\text{m}$  até que a água passante esteja limpa, posteriormente o material é seco em estufa a 105 °C e então peneirado. Os resultados deste ensaio são apresentados na Tabela 1.

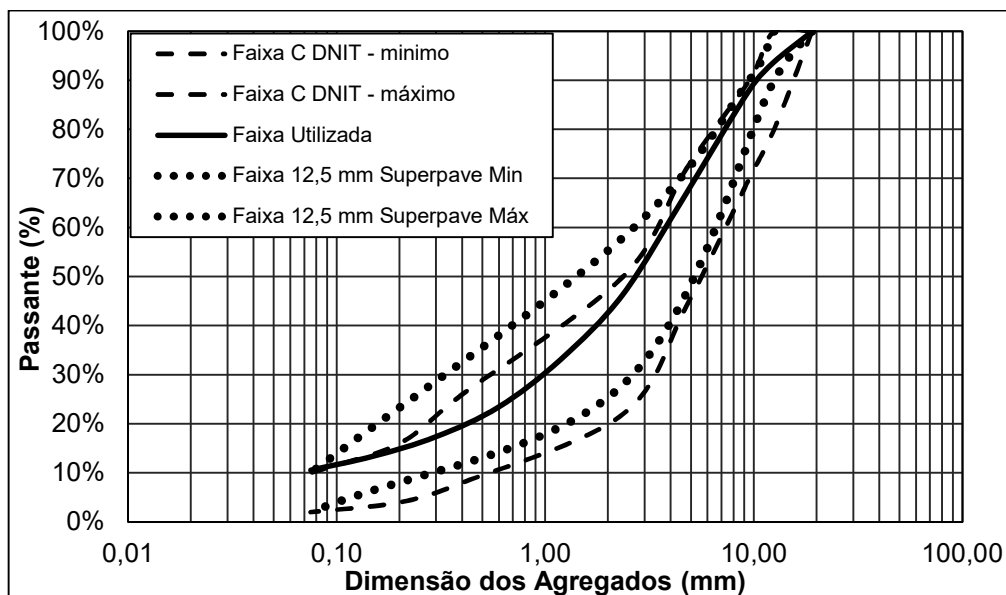
Tabela 1 - Granulometria por lavagem

Abertura da Peneira (mm)	Brita 1		Brita 0		Pó de Brita	
	Massa Retida	Porcentagem Retida	Massa Retida	Porcentagem Retida	Massa Retida	Porcentagem Retida
12,5	1345,2 g	52,21%				
9,5	942,1 g	36,56%	137,8 g	5,34%		
4,75	245,8 g	9,54%	1965,3 g	76,09%	18, g	1,20%
2,36	,1 g	0,00%	396,8 g	15,36%	401,4 g	26,67%
1,18			3,1 g	0,12%	317,9 g	21,14%
0,6			,5 g	0,02%	229, g	15,23%
0,3			1,2 g	0,05%	145,9 g	9,70%
0,15	,4 g	0,02%	5,9 g	0,23%	93,3 g	6,20%
0,075	1, g	0,04%	1,4 g	0,05%	67,7 g	4,50%
Finos	42, g	1,63%	70,9 g	2,74%	231,2 g	15,36%
		100,00%		100,00%		100,00%
<b>Massa Total Final</b>	2534,6 g		2512, g		1273,3 g	
<b>Massa Total Inicial</b>	2576,6 g		2582,9 g		1513, g	

Fonte: Elaboração própria (2019)

Com os dados obtidos da granulometria, foi possível traçar a curva escolhida para esta pesquisa. A curva foi ajustada para ficar entre os limites da curva C do DNIT, comumente utilizada pelos pesquisadores brasileiros e normalizada pela norma DNIT 031 (2006), e os limites da metodologia Superpave para agregados com dimensão máxima nominal de 12,5 mm, metodologia esta que foi utilizada na pesquisa. A Figura 4 , apresenta a curva de trabalho e os limites das normas.

Figura 4 - Limites das faixas granulométricas para os agregados utilizados



Fonte: Elaboração própria (2019)

Os ensaios de caracterização dos agregados são de extrema importância, pois estes determinam propriedades na mistura, como o consumo o ligante e a densidade. Utilizou-se a NBR NM 53 (2003), para determinar a massa específica e a absorção de água dos agregados graúdos (brita 1 e brita 0), enquanto para o agregado miúdo (pó de brita) baseou-se na NBR NM 52 (2003) para determinação das massas específicas e a NBR NM 30 (2001) para a absorção de água. Os resultados para os ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados

Ensaio de caracterização	Agregado		
	Brita 1	Brita 0	Pó de brita
Massa específica do agregado seco	2,74 g/cm <sup>3</sup>	2,70 g/cm <sup>3</sup>	2,50 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica do agregado na condição saturada superfície seca	2,78 g/cm <sup>3</sup>	2,76 g/cm <sup>3</sup>	2,55 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica	2,87 g/cm <sup>3</sup>	2,86 g/cm <sup>3</sup>	2,64 g/cm <sup>3</sup>
Absorção	1,62%	2,06%	1,28%

Fonte: Elaboração própria (2019)

Além disso, com base na NBR 7809 (2008) foi determinado o índice de forma dos agregados graúdos, este foi realizado com o intuito de avaliar o intertravamento pétreo da mistura. O ensaio foi realizado para a brita 0 e para a brita 1, os resultados apresentaram fator de forma de 2,5 e 2,1 respectivamente. Baseando-se no estudo de Silva (2018), que comparou normas nacionais e internacionais de caracterização do agregado quanto ao seu formato, pode-se afirmar que, a brita 1 tende a ser lamelar, enquanto a brita 0 mostra-se angular.

### 3.1.2 Ligante

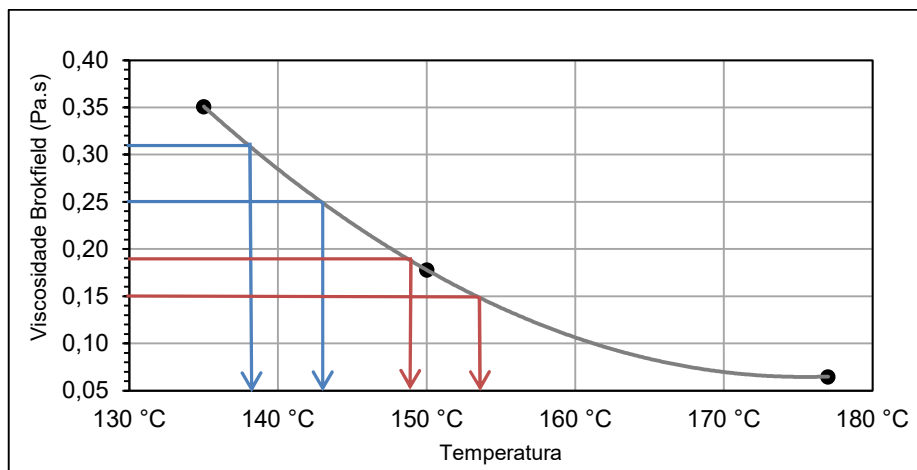
O ligante utilizado nesta pesquisa, é classificado no Brasil de acordo com a viscosidade como CAP 50/70, de fabricação da empresa CBB Asfaltos. A ficha técnica completa do ligante em questão é apresentada no Anexo A, esta é válida para o lote utilizado na pesquisa.

A escolha das temperaturas da mistura e compactação são obtidas a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido. Segundo Bernucci *et al.* (2008), a temperatura de mistura deve ser tal que a sua viscosidade, esteja situada preferencialmente entre 0,15 e 0,19 Pa.s (Pascal segundos), enquanto para a compactação, a viscosidade deve estar entre 0,25 a 0,31 Pa.s. A Figura 5 apresenta, o gráfico da temperatura versus viscosidade para o ligante em questão, a partir deste



foram determinadas as temperaturas de mistura, compactação e dos agregados a qual é mostrado na Tabela 3.

Figura 5 - Temperatura X Viscosidade



Fonte: Elaboração própria (2019)

Tabela 3 - Temperaturas para a execução das misturas

Resultados		
Temperatura de Mistura °C	Temperatura de Compactação °C	Temperatura dos Agregados °C
154 <-> 149	143 <-> 138	164 <-> 159

Fonte: Elaboração própria (2019)

### 3.1.3 Fibras

As fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa, eram no formato de linha, sendo este um emaranhado de fibras, a mesma era da marca comercial Circulo, comercializadas em rolos de 500 m, com diâmetro de aproximadamente de 0,85 mm, caracterizada como linha fina, como mostra a Figura 6. Para facilitar a distribuição na mistura, a fibra foi cortada em pequenos pedaços de aproximadamente 20 mm como mostra a Figura 7, para isto foi desenvolvido um equipamento que enrola a fibra, facilitando e agilizando o corte, o mesmo é mostrado na Figura 8. Segundo a literatura os melhores resultados são para teores de fibras abaixo de 1%, além disso uma tentativa de moldagem com 0,5% de fibra apontou um alto consumo de ligante e, portanto, para esta pesquisa foi estabelecido as proporções de 0,25% e 0,5%, em relação ao peso total de agregados da mistura.

Figura 6 - Rótulo da fibra de polipropileno utilizada na mistura



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 7 - Fibra de polipropileno cortada com 20 mm de comprimento



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 8 - Máquina para auxiliar o corte das fibras



Fonte: Elaboração própria (2019)

Para caracterização das fibras baseou-se na ASTM C1557 (2008), norma específica para obter a resistência a tração e o módulo de elasticidade de fibras. Como

o interesse é incrementá-las ao asfalto, as fibras foram aquecidas a temperaturas variáveis de 100 °C, 120 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C e 170 °C com tempo de exposições distintos de 1h, 2h e 4h, além da amostra de referência, a qual não foi exposta a temperatura, para cada temperatura e tempo de exposição foram ensaiadas 5 amostras com comprimento de 10 cm.

Após o aquecimento, as fibras foram fotografadas em um microscópio ótico, com capacidade de aumento de 100 vezes, isto permite analisar como a estrutura da fibra se comporta em diferentes temperaturas, o equipamento é mostrado na Figura 9. O comportamento mecânico, é avaliado com o ensaio de resistência a tração, para isto as fibras foram ensaiadas em uma prensa hidráulica da marca Shimadzu, como mostra a Figura 10, até atingir a ruptura para assim obter os gráficos do seu comportamento. O objetivo destes ensaios é avaliar o comportamento das fibras nas condições citadas acima e descobrir a sua temperatura de derretimento.

Figura 9 - Microscópio ótico



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 10 - Prensa hidráulica



Fonte: Elaboração própria (2019)

## 3.2 Métodos

Para cumprir o objetivo desta pesquisa, e avaliar os efeitos da adição de fibras de polipropileno em misturas asfálticas do tipo CA, foi necessário realizar a dosagem Superpave, além da massa específica aparente, massa específica máxima e o teor ótimo de ligante para cada uma das 3 misturas. Também foram efetuados os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral e o ensaio de módulo de resiliência, seus respectivos procedimentos são apresentados nos itens abaixo.

### 3.2.1 Misturas

Para realizar a mistura dos materiais, os agregados foram mantidos por 24 horas em uma temperatura de 161 °C, enquanto o ligante permaneceu aquecido por 2 horas a uma temperatura de 151 °C. Posteriormente, o agregado foi transferido ao misturador mecânico, o qual estava a uma temperatura de 151 °C, juntamente com as fibras, permanecendo durante 5 min em mistura. Em sequência o ligante foi adicionado ao misturador, e permaneceu durante 8 min, por fim a mistura foi deixada durante 2 horas em estufa a uma temperatura de 141 °C, para que a mesma envelhecesse e assim pudesse simular o procedimento real em uma usina de asfalto. O último passo foi a compactação dos CP's no compactador giratório, o procedimento de mistura é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Procedimento de mistura do CA



Fonte: Elaboração própria (2019)

### 3.2.2 Dosagem Superpave

A dosagem Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) regulamentada pela norma AASHTO M323 (2013), tomou forma a partir de 1993, onde após anos da pesquisa de SHRP (*Strategic Highway Research Program*) as universidades e departamentos norte-americanos desenvolveram esta nova metodologia. Consiste basicamente em estimar o teor ótimo de ligante através da fixação do volume de vazios e da granulometria dos agregados utilizados. A principal diferença com o método Marshall está na forma de compactação da mistura. A compactação é realizada com o auxílio do compactador giratório, que simula as condições reais de campo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O procedimento Superpave é dividido em 3 níveis de projeto dependendo do volume e características do tráfego e da importância da rodovia, como pode ser visto na Tabela 4. Para o nível 1 basta realizar a análise volumétrica, já para os demais níveis são necessários ensaios de desempenho a fim de otimizar o projeto e fazê-lo resistir a falhas por deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento à baixa temperatura.

Tabela 4 - Organização de níveis de serviço do método Superpave

Nível	1	2	3
Critério	Volumétrico	Volumétrico Ensaios de previsão de desempenho a 1 temperatura	Volumétrico Ensaios de previsão de desempenho a 3 temperatura
N (AASHTO)	$< 10^6$	$10^6$ a $10^7$	$\geq 10^7$

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

O primeiro passo para realizar a dosagem é a determinação da curva granulométrica que está dentro dos parâmetros desta metodologia, após isto deve-se encontrar o teor estimado de ligante, obtido por equações matemáticas. Posteriormente, segundo Moura (2010), realiza-se a compactação, na faixa granulométrica escolhida, de no mínimo, 02 corpos de prova, com os teores de ligante indicados abaixo:

- teor de ligante estimado – 0,5%;
- teor de ligante estimado;
- teor de ligante estimado + 0,5%;
- teor de ligante estimado + 1,0%.

Para realizar a compactação é necessário que o equipamento possua pressão aplicada de  $600 \text{ kPa} \pm 18 \text{ kPa}$  e o ângulo de rotação seja induzido (DNIT 178 – PRO, 2018). Os esforços de compactação em função do número de giros  $N_{\text{mín}}$ ,  $N_{\text{projeto}}$  e  $N_{\text{máx}}$ , são utilizados para avaliar a compactabilidade da mistura, e a partir do  $N_{\text{projeto}}$  é selecionado o teor de ligante de projeto. Estes valores estão em função do tráfego (N), e variam conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios de Compactação usando o Compactador Giratório

Número de Giros			Volume de tráfego comercial
N min	N proj	N máx	
6	50	75	Muito baixo
7	75	115	Médio
8	100	160	Pesado
9	125	205	Muito pesado

Fonte: DNIT 178 - PRO. (2018)

Após obter os dados, determinam-se as propriedades volumétricas dos corpos de prova a fim de elaborar os gráficos de Volume de vazios (Vv), Relação betume-vazios (RBV) e de Vazios no agregado mineral (VAM) versus o teor de ligante asfáltico. Sabendo-se que o teor de vazios recomendado é de 4%, conforme estabelecido pela ASSHTO M323 (2013), obtém-se o teor ótimo de ligante a partir da plotagem do gráfico volume de vazios versus teor de ligante. Além disso, deve-se avaliar se os valores de RBV e VAM atendem aos requisitos do Superpave (BERNUCCI *et al.*, 2008; DNIT 178 - PRO., 2018).

### 3.2.2.1 Massa Específica Aparente (Gmb)

O ensaio para obtenção da massa específica aparente da mistura compactada (Gmb) foi realizado conforme a normativa do DNIT - ME. 117 (2010). Este parâmetro é numericamente igual a razão entre a massa seca e a massa de volume igual de água, ambas em temperatura pré-fixada. Seu procedimento consistiu em pesar os corpos de prova cilíndricos, nas condições: seca, saturada superfície seca e submersa, como mostra a Figura 12.

Para se obter o valor do Gmb utilizou-se a equação 1.

$$Gmb = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{SSS_{sub}}} * 0,9971 \quad \dots(1)$$

Onde:

Ms= massa do corpo de prova seco;

Msss= massa do corpo de prova na condição de superfície saturada seca;

Msss sub= massa do corpo de prova submerso.

Figura 12 - Procedimento de ensaio de massa específica máxima



Fonte: Elaboração própria (2019)

### 3.2.2.2 Massa Específica Máxima (Gmm)

Esse parâmetro é normatizado pelas normas ASTM D 2041 (2000), AASHTO T209 (1999) e pelo método europeu EM 12697-5.

O procedimento do ensaio consistiu em pesar 1500 kg de concreto asfáltico na condição solta e seca, e colocá-la em um frasco de peso conhecido, com uma quantidade de água ( $25 \pm 05$  °C) suficiente para cobrir a amostra. Após aplicou-se vácuo por um período de  $15 \pm 2$  minutos para gradualmente reduzir a uma pressão residual no frasco para  $3,7 \pm 0,3$  KPa, ao final deste período, o vácuo foi reduzido gradualmente. Por fim, preencheu-se completamente o frasco com a mistura de água e realizou-se a pesagem do conjunto, mantendo sempre a temperatura constante de  $25 \pm 05$  °C, a Figura 13 exemplifica o procedimento.

Para o cálculo do GMM utiliza-se a seguinte equação 2:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad \dots(2)$$

Onde:

A= massa da amostra seca em ar;

B= massa do recipiente com volume de água;

C= massa do recipiente + amostra submersa em água;



Figura 13 - Procedimento do ensaio de massa específica aparente



Fonte: Elaboração própria (2019)

### 3.2.2.3 Volume de Vazios x Teor Ótimo de Ligante

Para obtenção do teor ótimo de ligante é necessário moldar corpos de prova com diferentes teores, com o mínimo de 4 teores, sendo 1 o teor ideal calculado, 1 valor acima e 2 abaixo, com variações de 0,5% entre eles. A partir deste é realizado o gráfico de teor de ligante x volume de vazios e assim pode-se encontrar o teor ótimo correspondente a 4% do volume de vazios, como mostra o exemplo da Figura 14. Este foi realizado para as misturas de referências e para cada uma das proporções de fibras adicionadas às misturas, visto que cada uma terá um teor ideal.

Para obtenção desse parâmetro, segue a equação 3 utilizada.

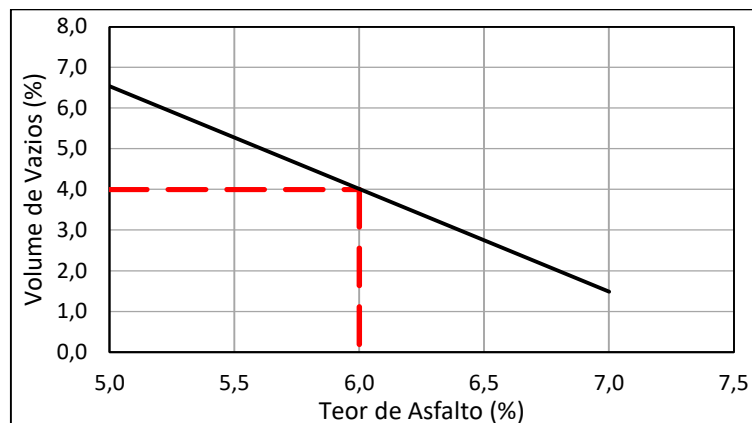
$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad \dots(3)$$

Onde:

Gmm= massa específica máxima da mistura;

Gmb= massa específica aparente da mistura.

Figura 14 - Exemplo de determinação do teor ótimo de ligante



Fonte: Elaboração própria (2019)

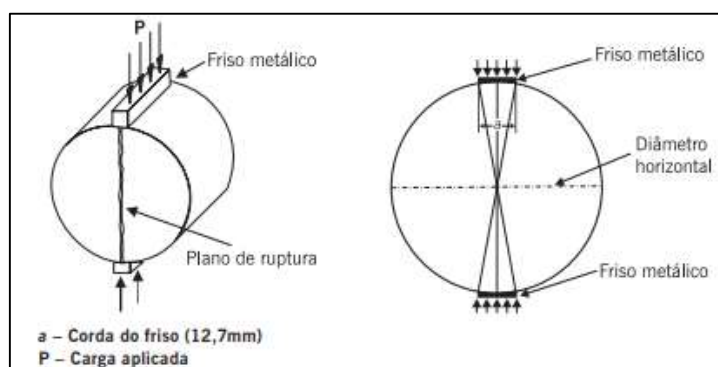
### 3.2.3 Ensaios Mecânicos

Para caracterização mecânica das amostras, foi executado o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e ensaio de Módulo de Resiliência. Posteriormente, foi realizada uma comparação entre as amostras com fibras e as de referência e assim avaliado se os resultados atendem os objetivos desta pesquisa.

#### 3.2.3.1 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio é regulamentado pela norma DNIT 136 – ME. (2017), e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de dois planos paralelos, a tração é medida a partir das tensões geradas do diâmetro horizontal, perpendicular à carga aplicada, conforme exemplifica a Figura 15. Para a realização do ensaio em misturas asfálticas é necessário posicionar o corpo de prova no equipamento com o auxílio de dois frisos metálicos com 12,7mm de espessura, sob os quais é aplicada a força.

Figura 15 - Plano de ruptura das amostras por compressão diametral



Fonte: DNIT 136/2017 ME. (2017)

Para se obter a resistência a tração (RT) deve-se antes do ensaio, determinar as dimensões dos CP's, manter a temperatura em 25° C pelo menos com 4 horas de antecedência, centralizar o corpo de prova na pressão e ajustar a pressão, por fim aplicar a carga progressivamente com uma velocidade de deslocamento de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que se dê a ruptura total do mesmo, a Figura 16 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio. Após a obtenção dos dados, os mesmos são incrementados na equação 4 e assim se obtêm a RT.

$$\sigma_r = \frac{2 * F}{\pi * D * H} \quad \dots(4)$$

Onde:

$\sigma_r$  = resistência a tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do cilindro;

H = altura do corpo de prova.

Figura 16 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de RT



Fonte: BOERIA (2018)

### 3.2.3.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência pela definição da norma é a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável e correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (BERNUCCI *et al.*, 2008). A partir deste

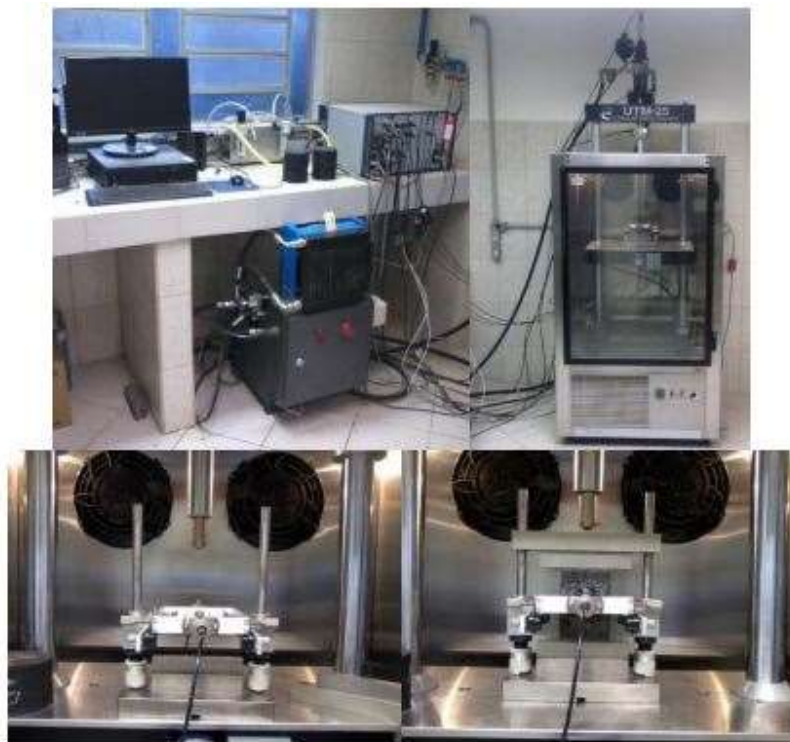
ensaio obtém-se o parâmetro de rigidez da mistura, o qual possibilita fazer uma análise do comportamento mecânico da mesma.

No Brasil o ensaio é normatizado pelo DNIT 135 – ME. (2018). Para sua realização é necessário que os corpos de prova sejam cilíndricos, com altura entre 35 mm e 70 mm e com diâmetro de  $101,6 \text{ mm} \pm 3,8 \text{ mm}$ . O equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que gera carregamentos cíclicos pulsantes com o auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz, o mesmo funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, permitindo assim ensaiar em diversas temperaturas (SPECHT, 2004).

Para realizar o ensaio do módulo de resiliência (MR), previamente deve ser executado o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, mostrado no item 3.2.3.2, pois a carga deste ensaio deve estar entre 5% e 25% da resistência à tração média obtida, além disso o CP deve receber o condicionamento térmico, permanecendo por 4h em uma temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Posteriormente, o mesmo é posicionado, alinhado e centralizado e recebe 50 ciclos de carga para condicionamento. O ensaio se dá pela aplicação de 15 ciclos de carga aplicados sem interrupções, após a carga aplicada é aumentada em 5% e serão realizados mais 15 ciclos de carga, este procedimento é realizado 2 vezes. As deformações horizontais, são obtidas a partir de LVDT's (*Linear Variable Differential Transducer*), que podem ser instalados interna ou externamente e estes, estão ligados a um microcomputador (DNIT 135 – ME, 2018).

O MR é obtido para cada um dos 15 ciclos de carga, considerando os últimos cinco ciclos de cada conjunto, os valores médios de cada parâmetro, para cada conjunto de 15 ciclos, devem ser comparados entre si e não podem diferir mais que 5 % em relação à média global. O equipamento utilizado para o ensaio de MR foi uma UMT – 25 (*Universal Test Machine*) da IPC global, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - UTM - 25 do laboratório da Universidade Federal de Santa Maria



Fonte: BOERIA (2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados provenientes dos ensaios de caracterização volumétrica, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. Ainda, a análise do comportamento mecânico da mistura asfáltica convencional e as misturas asfálticas com adições de 0,25% e 0,50% de fibras de polipropileno.

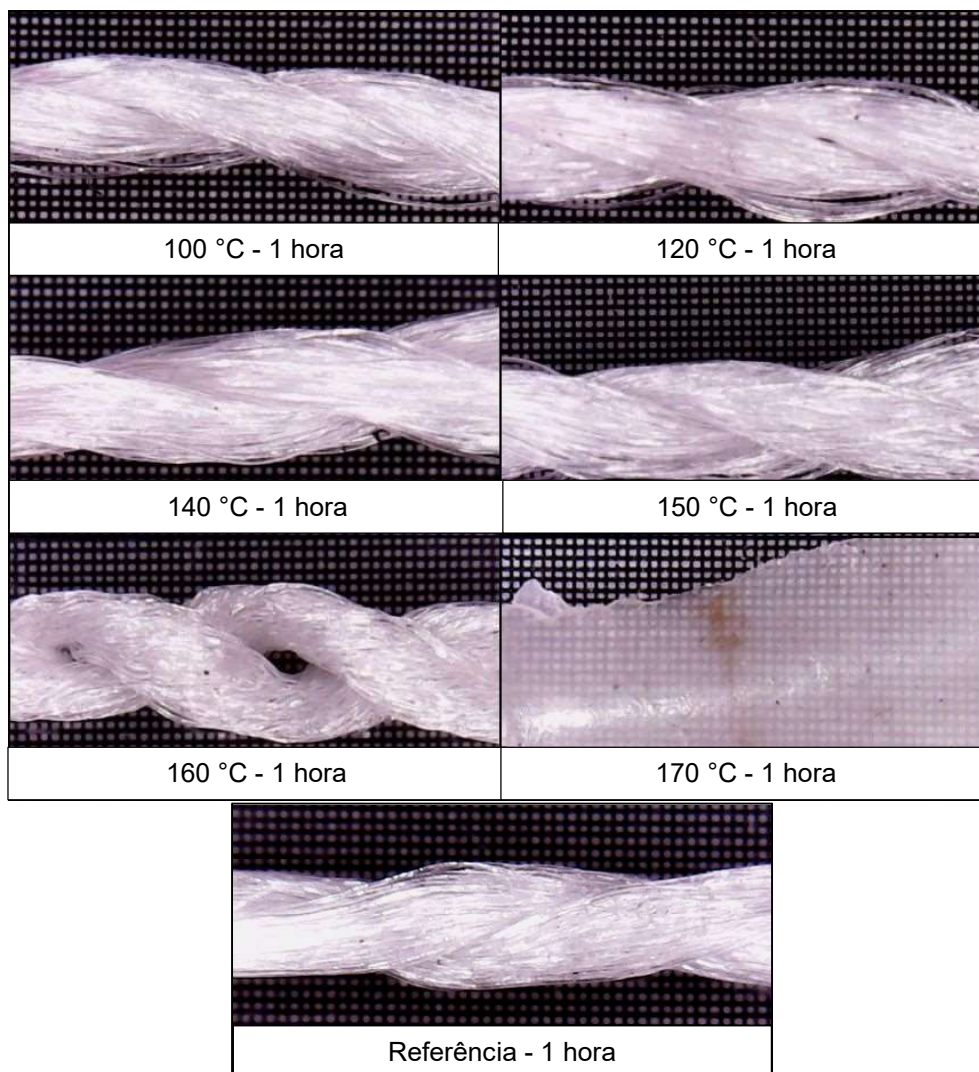
### 4.1 Caracterização Física das Fibras de Polipropileno

Com o intuito de estimar a massa específica das fibras, realizou-se um procedimento laboratorial baseado na NBR NM 52 (2003), a qual é utilizada para determinar a massa específica de agregados miúdos, pois devido à falta de materiais não se pode realizar o ensaio de picnometria de Hélio. Este procedimento consistiu, em pesar uma cerca de 5 g de material na condição seca, seguido da submersão em água por 24 horas, e por fim, a determinação do volume ocupado pela fibra em um picnômetro com água. O resultado mostrou, que a massa específica da fibra é de aproximadamente 0,92 g/cm<sup>3</sup>, sendo, portanto, menos densa que a água.

Como a finalidade deste estudo é adicionar as fibras no CA, a temperatura exerce grande influência, por isso as fibras de polipropileno foram aquecidas, e após fotografadas com o microscópio ótico, para avaliar a mudança na estrutura da fibra com o aumento da temperatura. A Figura 18 apresenta as imagens das fibras para ambas as temperaturas, com tempo de exposição de 1 hora, enquanto a Figura 20 mostra o tempo de exposição de 2 horas e a Figura 21 o tempo de 4 horas.

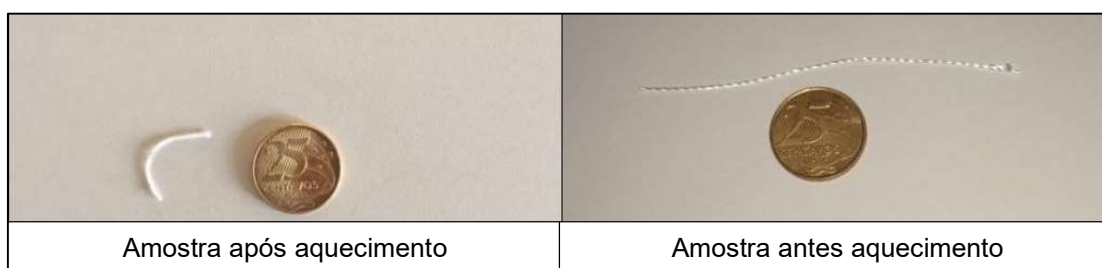
O derretimento total da fibra ocorreu a 170 °C com tempo de exposição de 1 hora como mostra a Figura 18. Para os demais tempos de exposição, as imagens só mostram mudanças significativas para 160 °C, quando ocorreu a união dos pequenos fios de fibra, e formaram dois grandes fios. Além disso, para esta temperatura ocorreu um encurtamento no comprimento da fibra de aproximadamente 70%, como mostra a Figura 19.

Figura 18 - Análise física das fibras para 1 hora de exposição



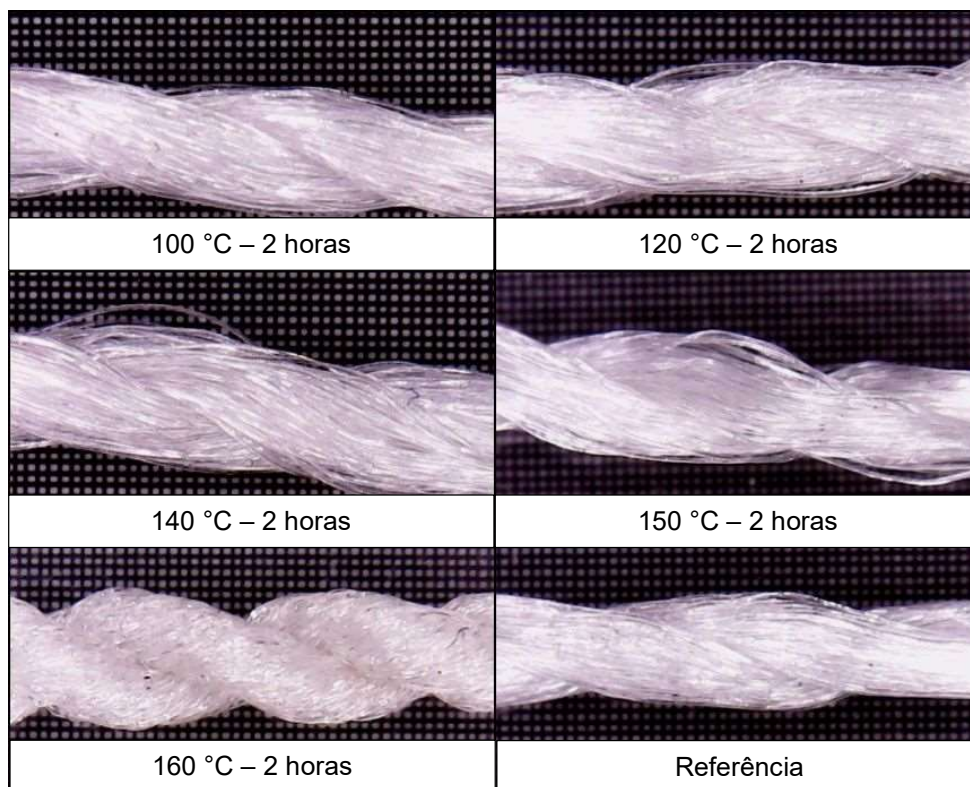
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 19 - Encurtamento da fibra exposta a temperatura de 160 °C



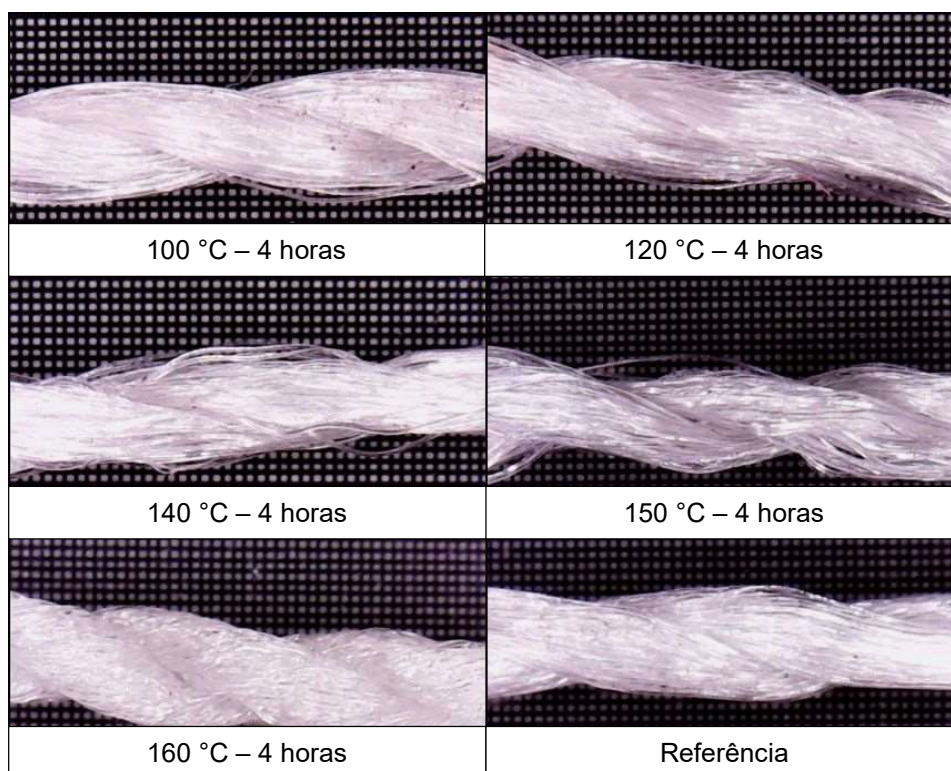
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 20 - Análise física da fibra com tempo de exposição de 2 horas



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 21 - Análise física da fibra para tempo de exposição de 4 horas



Fonte: Elaboração própria (2019)

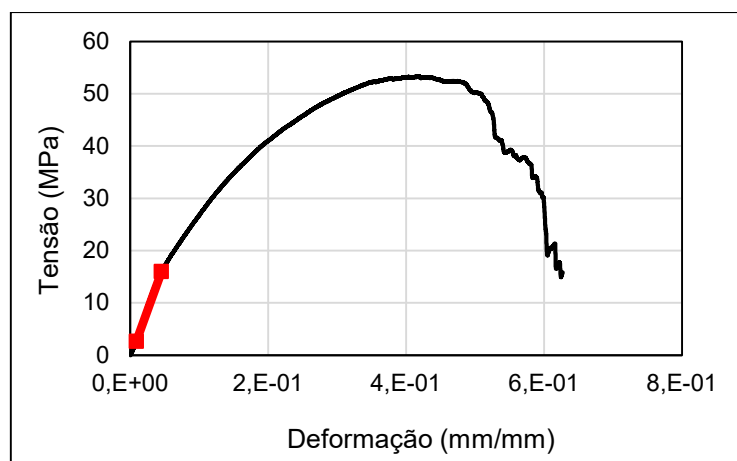


## 4.2 Caracterização Mecânica das Fibras de Polipropileno

Para compreender o comportamento elástico da fibra, optou-se por determinar o módulo de elasticidade secante, que segundo Mehta e Monteiro (2008), é obtido através da inclinação de uma reta que passa pela origem e por outro ponto em um nível de tensão pré-definido. A ABNT NBR 6118:2014 recomenda que o módulo secante seja utilizado para análises elásticas de projeto, como por exemplo, as análises de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço.

O módulo de elasticidade secante da linha de polipropileno foi encontrado a partir, da inclinação da reta secante do gráfico Tensão X Deformação, entre os valores de 5% e 30% da tensão de pico, conforme exemplifica a Figura 22. A escolha destes parâmetros, justifica-se pela garantia de que o módulo de elasticidade secante seja obtido no estado elástico, já que valores abaixo de 5% podem conter erros de ajuste da prensa, enquanto valores acima de 30% podem estar no regime plástico. Os resultados são apresentados na Tabela 6, estes são a média de 3 amostras. A temperatura de 170 °C não é apresentada, pois durante o processo de aquecimento na estufa, a mesma atingiu o derretimento total, e assim não pode ser ensaiada.

Figura 22 - Obtenção do módulo de elasticidade secante



Fonte: Elaboração própria (2019)

Tabela 6 - Módulo de elasticidade secante da linha de polipropileno

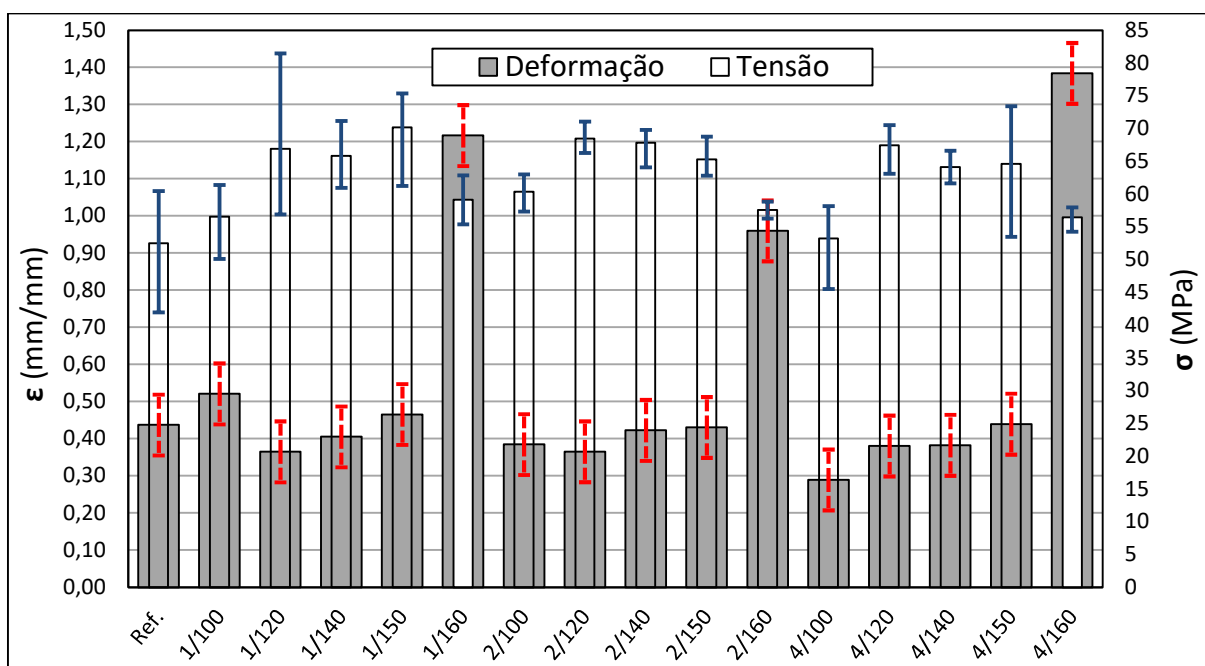
	Referência (GPa)	100 °C (GPa)	120 °C (GPa)	140 °C (GPa)	150 °C (GPa)	160 °C (GPa)
1 Hora	8,168	5,525	7,876	7,124	6,831	4,377
	8,632	6,850	8,496	7,385	6,797	5,479
	8,516	2,307	5,410	7,896	5,967	3,622
<b>Média</b>	<b>8,439</b>	<b>4,894</b>	<b>7,261</b>	<b>7,468</b>	<b>6,531</b>	<b>4,493</b>
2 Horas	8,168	8,615	8,641	7,950	5,491	2,914
	8,632	6,006	9,343	5,846	4,845	3,339
	8,516	6,518	8,110	8,251	6,092	4,582
<b>Média</b>	<b>8,439</b>	<b>7,046</b>	<b>8,698</b>	<b>7,449</b>	<b>5,476</b>	<b>3,611</b>
4 Horas	8,168	8,401	7,480	4,233	4,634	3,767
	8,632	8,080	7,549	7,088	7,725	6,881
	8,516	8,287	9,017	8,731	3,785	6,441
<b>Média</b>	<b>8,439</b>	<b>8,256</b>	<b>8,015</b>	<b>6,684</b>	<b>5,381</b>	<b>5,696</b>

Fonte: Elaboração própria (2019)

Ao observar a Tabela 6, pode-se afirmar que a linha de polipropileno apresenta um valor de módulo secante, semelhante ao módulo de elasticidade da fibra, que segundo a literatura está entre 3,5 a 10 GPa, resultado este esperado, já que ambas são produzidas com o mesmo tipo de polímero. A tendência é que a fibra perca a elasticidade com o aumento da temperatura. Em relação ao tempo de exposição houve um incremento no módulo, com o passar das horas até 120 °C. Para as demais temperaturas o efeito foi inverso, exceto a temperatura de 160 °C, a qual não apresentou o comportamento esperado.

Além do módulo de elasticidade, foi avaliada a tensão e a deformação para todas as temperaturas e tempos de exposição. A Figura 23, apresenta o comportamento das fibras para os diferentes tempos de exposição para as temperaturas de 100 °C, 120 °C, 140 °C, 150 °C, 160 °C e para a amostra de referência, com tempos de exposição de 1h, 2h e 4h. As barras apresentadas no gráfico, são os valores de pico da média de 3 amostras, também são apresentadas barras de erros dos valores de máximos e mínimos para cada situação analisada.

Figura 23 - Tensão e deformação para diferentes temperaturas e tempos de exposição



Fonte: Elaboração própria (2019)

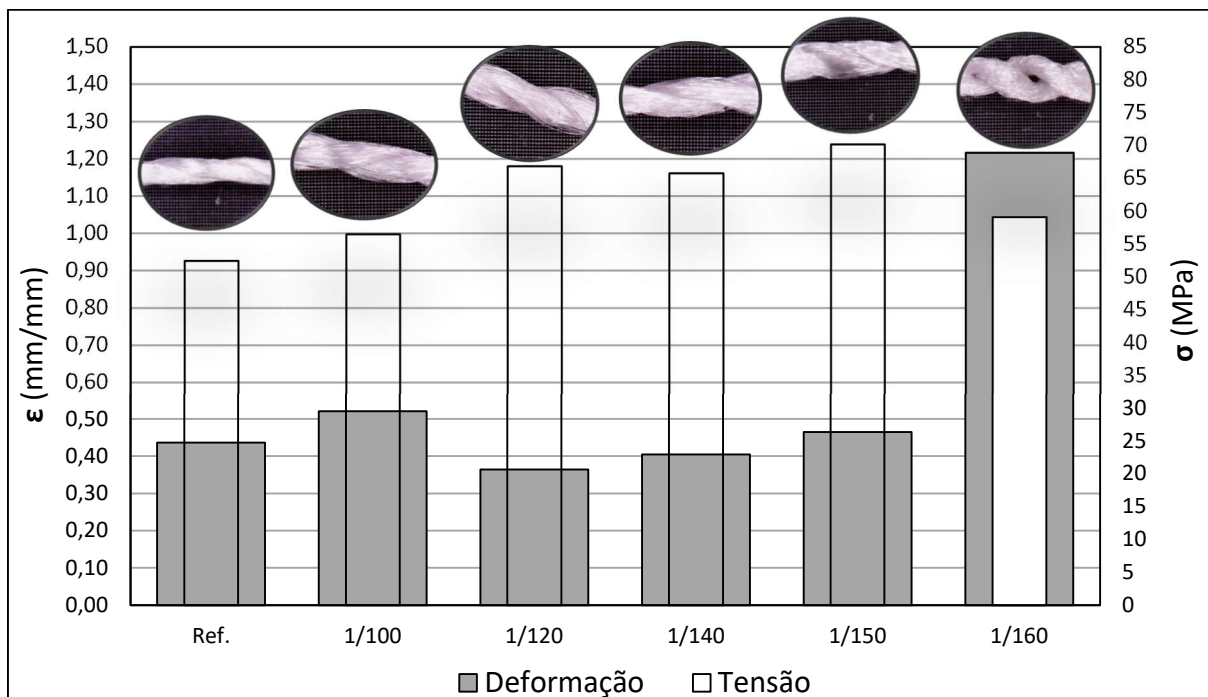
Ao avaliar o comportamento das fibras, para uma mesma temperatura em função do tempo de exposição, pode-se afirmar que a deformação não apresentou variação significativa para as temperaturas de 120 °C, 140 °C e 150 °C. Para 100 °C houve uma queda na deformação com o aumento do tempo de exposição. As maiores deformações, foram registradas para a temperatura de 160 °C em ambos os tempos de exposição, entretanto seu comportamento foi distinto das demais temperaturas, apresentando a deformação mínima para 2h de exposição e máxima para 4h.8

Para tensão, quando analisada a média dos resultados, não houve grandes variações entre os tempos de exposição para uma mesma temperatura. Entretanto, a tendência é que para ambas as temperaturas a menor tensão esteja em 4h de exposição, fato este que pode implicar no não aproveitamento total da fibra, visto que o processo de mistura e resfriamento do CA supera o período de 4 horas.

Observando a variação de temperatura para um mesmo tempo de exposição, ilustrado na Figura 24, a qual apresenta o comportamento para 1 hora, na Figura 25 para 2 horas e na Figura 26 para 4 horas, tem-se uma tendência de a tensão elevar-se até 120 °C e após começar a cair suavemente. Já a deformação aumenta com o aumento da temperatura, devido ao aumento da ductibilidade da fibra. Com 160 °C

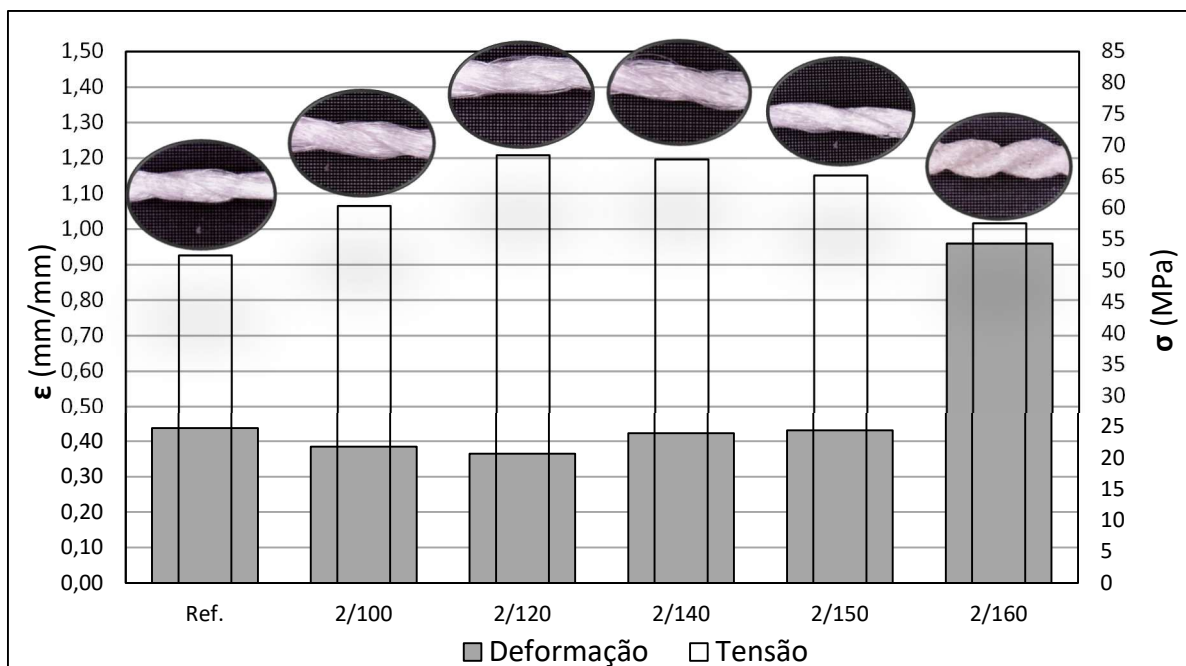
tem-se os dois extremos, a maior deformação para uma menor tensão, e sendo este o limite de temperatura em que a fibra conserva o seu formato.

Figura 24 - Comportamento das fibras para o tempo de exposição de 1 hora



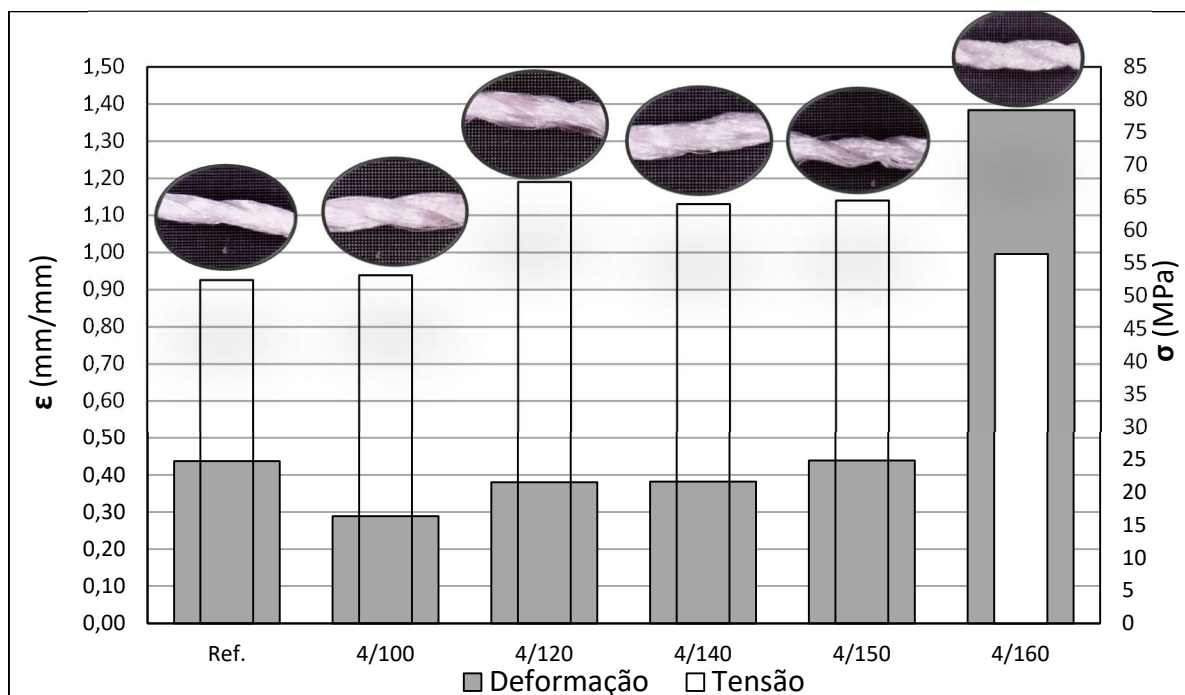
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 25 - Comportamento das fibras para o tempo de exposição de 2 horas



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 26 - Comportamento das fibras com o tempo de exposição de 4 horas



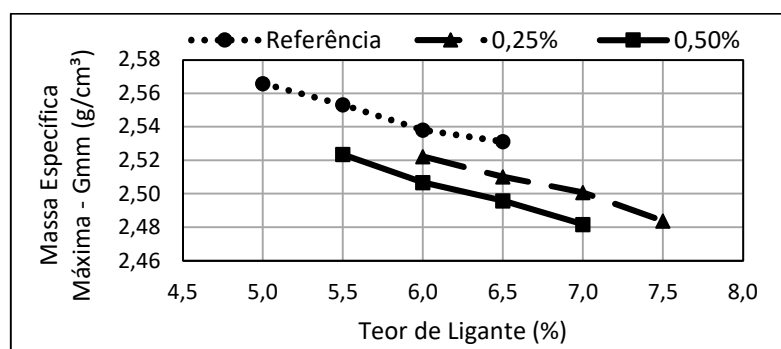
Fonte: Elaboração própria (2019)

Porém quando comparadas a amostra de referência, a qual não foi exposta a temperatura, todos os casos apresentam um maior valor de tensão de pico, e os valores de deformação tendem a crescer com o aumento da temperatura, assumindo valores maiores ou muito próximos dos valores da amostra de referência. Estes resultados já eram esperados, devido a uma possível união de algumas fibras, ocasionado pelo derretimento parcial das mesmas.

### 4.3 Caracterização Volumétrica das Misturas Asfálticas

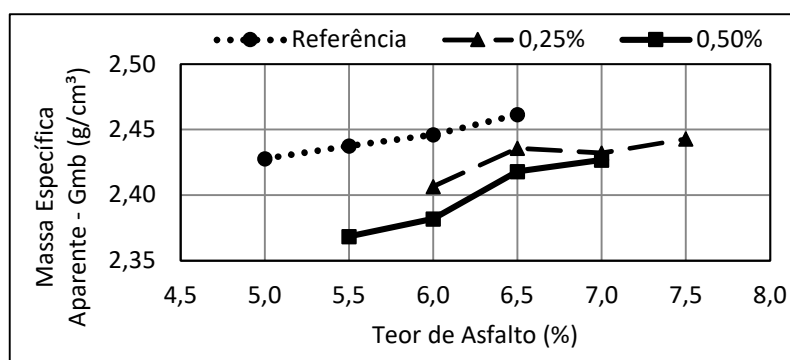
A dosagem foi realizada com 4 teores de ligante para cada mistura, e assim foram realizados os ensaios de massa específica máxima, massa específica aparente e então obtido o teor de ligante ótimo para cada situação, estes dados são apresentados no Anexo B. A Figura 27 apresenta a massa específica máxima (Gmm) para as 3 misturas da dosagem, que mostra uma tendência da queda dos valores com o incremento da fibra e com o aumento do teor de ligante, sendo os menores para a mistura com 0,50% de fibra. Do mesmo modo, a Figura 28 mostra os resultados do ensaio da massa específica aparente que segue o mesmo padrão. Este fato deve-se, a baixa densidade apresentada pela fibra quando comparada ao agregado.

Figura 27 - Massa específica máxima X Teor de ligante



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 28 - Massa específica aparente X Teor de ligante

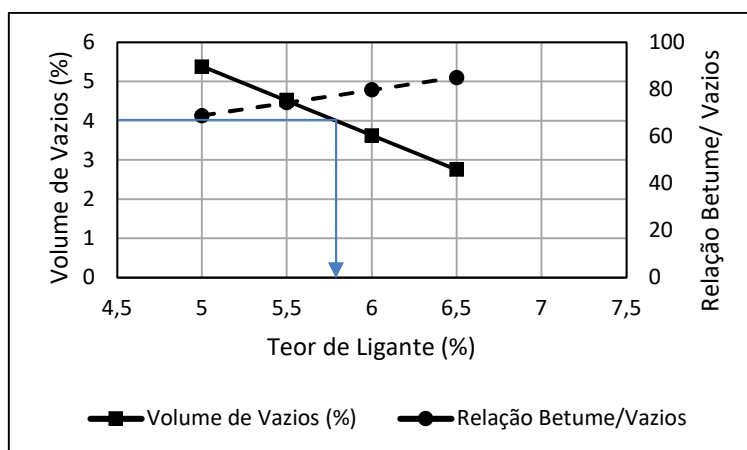


Fonte: Elaboração própria (2019)

Para obtenção do teor ótimo de ligante, foram plotados os gráficos de volume de vazios – relação betume/vazios – teor de ligante, sendo o procedimento descrito no item 3.2.2.3. A Figura 29 apresenta o comportamento das amostras de referência, as quais não possuem adições de fibra, o teor ótimo foi de 5,80%, apresentando, portanto, um alto consumo de ligante, em consequência da elevada absorção dos agregados, apresentada na Tabela 2. O teor ótimo para as amostras com adições de 0,25% foi de 6,25%, conforme mostra a Figura 30, enquanto para as amostras com 0,50% de adições o valor foi de 6,30%, o qual é mostrado na Figura 31.

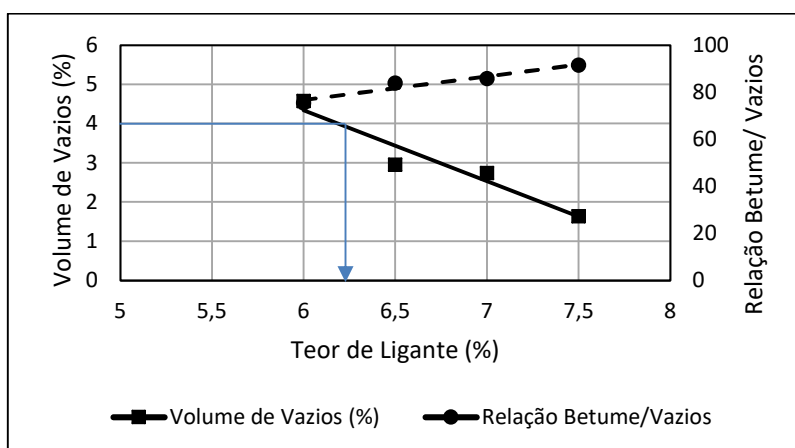
O incremento da fibra na mistura mostrou um acréscimo no teor de ligante, resultado este esperado, devido a absorção da fibra. Apesar da diferença entre as adições de 0,25% e 0,50% ser de apenas 0,05%, acredita-se que, maiores adições de fibras, tendam a encarecer a produção do CA, devido ao elevado custo do ligante, sendo recomendado para estas situações, realizar uma análise de custo-benefício.

Figura 29 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra referência



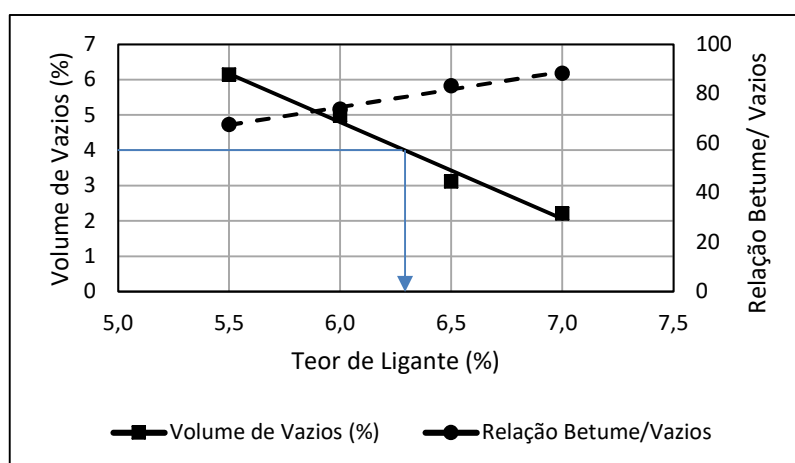
Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 30 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra com 0,25%



Fonte: Elaboração própria (2019)

Figura 31 - Determinação do teor ótimo de ligante para amostra com 0,50%



Fonte: Elaboração própria (2019)

A moldagem foi realizada para as misturas, sendo 3 corpos de prova para cada mistura, os resultados encontrados na caracterização volumétrica são apresentados

na Tabela 7. O incremento da fibra reduziu os valores de  $G_{mm}$  e  $G_{mb}$ , e elevou o consumo, apresentando o mesmo comportamento das amostras da dosagem. O volume de vazios de acordo com a DNIT 031 (2006), para a camada de rolamento deve estar entre 3% a 5%, estando todos os valores dentro dos limites da norma.

Tabela 7 - Caracterização volumétrica dos CP's da moldagem

	CP	Teor de ligante	$G_{mb}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_{mm}$ -médio (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de Vazios
Referência	1	5,83%	2,451	2,543	3,61%
	2	5,83%	2,442	2,543	3,98%
	3	5,83%	2,433	2,543	4,32%
0,25%	1	6,25%	2,416	2,516	3,95%
	2	6,25%	2,415	2,516	4,03%
	3	6,25%	2,418	2,516	3,91%
0,50%	1	6,30%	2,406	2,500	3,76%
	2	6,30%	2,393	2,500	4,30%
	3	6,30%	2,404	2,500	3,84%

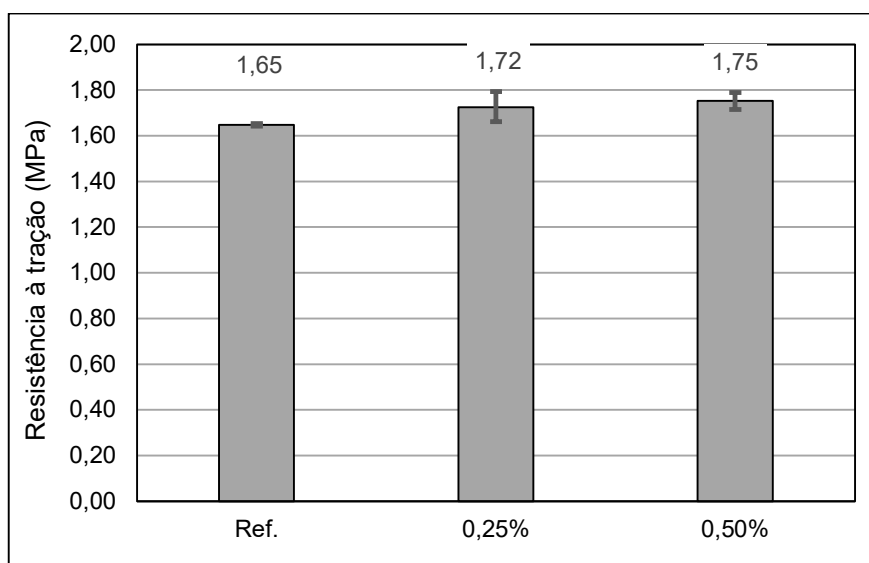
Fonte: Elaboração própria (2019)

#### 4.4 Caracterização Mecânica das Misturas Asfálticas

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, foi realizado seguindo os procedimentos descritos em 3.2.3.1. Este ensaio foi realizado, no laboratório GEPPASV da Universidade Federal de Santa Maria. O comportamento dos corpos de prova é apresentado no gráfico da Figura 32, estes são a média da tensão de pico de 3 amostras, além disso, são apresentadas as barras de máximos e mínimos para ambos os casos, a fim de avaliar a variação entre os resultados.



Figura 32 - Média dos resultados de RT



Fonte: Elaboração própria (2019)

O comportamento mecânico das misturas, mostrado na Figura 32, apresenta uma tendência do aumento na resistência à tração com o incremento das fibras, com os maiores valores para a adição de 0,50% de fibra de polipropileno, além disso, as barras de máximos e mínimos, mostram uma pequena variação entre os resultados dos ensaios. A diferença entre a amostra de referência e a amostra com 0,25% de adição foi de 4,20%, enquanto a amostra com 0,50% apresentou 6,45% no valor da resistência, entretanto entre as duas amostras com adições de fibra a diferença foi de apenas 2,16%.

Uma possível explicação para o aumento da resistência, é que o derretimento parcial da fibra, pode ter criado uma espécie de ancoragem das fibras com os outros materiais e assim elevando o valor de RT. Segundo a norma do DNIT 031 (2006) os valores mínimos de RT, tanto para a camada de rolamento, como para a camada de ligação é de 0,65 MPa, e, portanto, todos os valores encontrados, estão dentro dos limites normativos.

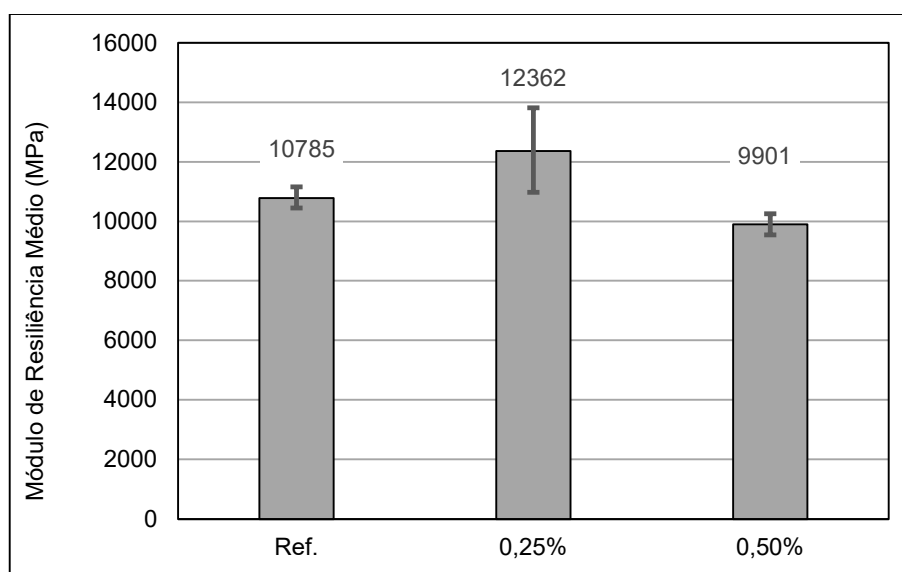
Outros autores, utilizaram a fibra de polipropileno no CA em condições semelhantes a este trabalho, entretanto ambos utilizaram a dosagem Marshall. Os valores encontrados de RT são superiores aos de Heck (2015) e Aduati (2016), tanto para a mistura convencional como para a mistura com adição de fibra, e ainda os resultados deste trabalho mostram um incremento na resistência com a adição de fibra, comportamento oposto ao encontrado por ambos os autores. Em relação ao MR

Heck (2015), obteve uma queda na rigidez da mistura com a adição de fibra, comportamento também encontrado nesta pesquisa.

Breitenbech (2016) obteve resultados superiores para as adições de fibra quanto ao RT, entretanto não realizou uma mistura convencional e, portanto, não se pode realizar uma comparação direta entre os resultados. Neste contexto, quando se trabalha com novas misturas é importante realizar ensaios completos para fins de comparação, não devendo ser extrapolados, os valores deste estudo em virtude da influência que a adição e as propriedades da fibra exercem nos resultados de MR e RT.

O ensaio de Módulo de Resiliência, assim como o ensaio de RT, foi realizado no laboratório GEPPASV, seguindo os procedimentos descritos em 3.2.3.2. A Figura 33 apresenta a média de 3 amostras submetidas ao ensaio de MR, no qual o valor do MR é a média dos valores obtidos para o corpo de prova a 0° e a 90°. Além disso, são apresentadas as barras de máximos e mínimos, para cada mistura.

Figura 33 - Média dos resultados de MR



Fonte: Elaboração própria (2019)

O comportamento apresentado na Figura 33, evidencia a tendência do aumento do MR para a mistura com 0,25% de adição de fibra, seguido por uma queda para a amostra com adição de 0,50%. A variação entre a amostra de referência e amostra com 0,25% de adição foi de 14,62%, enquanto a amostra com 0,50% de adição apresentou uma redução de 8,20%, entretanto, a maior diferença deu-se na comparação entre as 2 amostras com adições, com a amostra de 0,50% apresentando uma redução de 19,91%.

Os resultados de RT e MR para a mistura convencional encontram-se na mesma ordem de grandeza, dos resultados encontrados por Boeira (2018), que utilizou a mesma faixa granulometria, o mesmo tipo de ligante e a mesma dosagem. Entretanto, quando comparados aos resultados do Quadro 2, o valor de MR encontrado é superior aos mencionados, isto deve ao fato do MR sofrer influência de muitas variáveis, que incluem, a energia de compactação, temperatura de compactação e temperatura de ensaio (BOEIRA, 2018).

Com o intuito de aumentar a confiabilidade nos resultados, foi realizada uma pequena análise estatística utilizando o software Past, sendo realizado o teste de Análise de Variância (ANOVA), juntamente com o teste de Comparações Múltiplas (Teste Tukey). A Figura 34 apresenta os resultados para o dados do ensaio de RT, sendo F menor que F crítico e Valor – P maior que 0,05, pode-se afirmar que nenhum dos valores possui diferença significativa, o que é confirmado a partir do Teste Tukey e pelos valores da variância.

Figura 34 - Teste Tukey para os resultados de RT

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	0,0176816	2	0,00884081	4,549	0,06277
Within groups:	0,0116617	6	0,00194362		
Total:	0,0293433	8			
omega <sup>2</sup> :	0,4409				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,1632  
Based on medians: p(same) = 0,2463

Welch F test in the case of unequal variances: F=10,79, df=2,747, p=0,05002

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B	C
A		0,1661	0,06032
B	2,997		0,7172
C	4,127	1,13	

Fonte: Elaboração própria (2019)

Para os valores do ensaio de MR foram realizados os mesmos testes do RT, entretanto estes apresentaram significância, como mostra a Figura 35. Neste o valor de F é maior que o de F crítico e Valor – P é menor que 0,05 indicado, portanto, que há diferença significantes, entretanto esta é apenas para a amostra de 0,50% de adição, como mostra o Teste Tukey.

Figura 35 - Teste Tukey para os resultados de MR

<input type="checkbox"/> Repeated measures					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	9,32287E06	2	4,66143E06	6,152	0,03522
Within groups:	4,54593E06	6	757655		
Total:	1,38688E07	8			
omega^2:	0,5338				
Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,1804					
Based on medians: p(same) = 0,2225					
Welch F test in the case of unequal variances: F=6,384, df=3,626, p=0,06487					
Residuals					
Tukey's pairwise comparisons:					
Q \ p(same)					
	A	B	C		
A		0,1464	0,4729		
B	3,137		0,03118		
C	1,76	4,897			

Fonte: Elaboração própria (2019)

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise mecânica e física da linha de polipropileno, revelou que a tensão tende a aumentar até a temperatura de 120 °C para ambos os tempos de exposição, após esta temperatura os valores de tensão diminuem, com o mínimo em 160 °C, já em que em 170 °C a fibra atinge o derretimento. A deformação apresentou, a tendência de elevar-se com o aumento da temperatura, este comportamento provavelmente é devido, ao derretimento parcial dos fios da linha, que ao se unirem fragilizam a estrutura, mas prolongam o seu rompimento.

A dosagem Superpave mostrou-se adequada para as misturas, tanto para a convencional, quanto para as com adições de fibras de polipropileno, pois ambas apresentaram, compactação adequada e o volume de vazios exigidos pela norma. O consumo de ligante aumentou com o aumento da adição das fibras, devido a absorção do ligante por parte da fibra.

A amostra de referência, a amostra com 0,25% de adição e a amostra com 0,50% de adição, apresentaram valores de RT semelhantes entre si e ambos dentro das normatizavas do DNIT, porém há uma tendência de aumento na resistência com o incremento da fibra, apresentando os maiores valores de tensão de pico, para a mistura com 0,50% de adição, entretanto estes valores não são representativos estatisticamente. Para o MR, o maior valor foi encontrado para a amostra com 0,25% de adição e o menor para a mistura com adição de 0,50%, sendo apenas este último um valor significativamente diferente, ou seja, a maior adição diminui consideravelmente o módulo de resiliência da mistura, reduzindo assim a rigidez da mistura.

O principal objetivo desta pesquisa foi analisar a viabilidade mecânica da adição de fibras de polipropileno em misturas de concreto asfáltico. A partir dos ensaios pode-se concluir que a fibra de polipropileno resiste até 160 °C, mantendo algumas de suas propriedades mecânicas, entretanto o seu incremento na mistura de CA não trouxe grandes benefícios, se observados os ensaios aqui realizados, mas a manteve dentro dos padrões. Outro fator a se considerar, é o aumento de consumo de ligante com o incremento da fibra.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho, com os resultados de Heck (2015) e Aduati (2016), no que diz a resistência a tração, pode-se dizer que este trabalho foi satisfatório, pois ambas encontram uma redução nos valores, enquanto,

nesta pesquisa os resultados foram positivos, mostrando uma tendência do aumento da RT.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como esse estudo com adição de fibras em mistura asfáltica convencional é pioneiro, ainda existem muitas lacunas, com o intuito de solucioná-las, tem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar o ensaio de adesividade e fadiga, para complementar o estudo;
- Realizar ensaios de deformação permanente: *Flow Number*;
- Avaliar a utilização de diferentes tipos de ligante;
- Avaliar a utilização das fibras em misturas mornas;
- Utilizar outros teores de fibras de polipropileno e outros comprimentos. Até mesmo utilizar outros tipos de fibras;
- Realizar trechos experimentais e acompanhar ao longo do tempo o desempenho do CA quando solicitado ao tráfego real;
- Realizar misturas em usina asfáltica, para verificar se o processo de incorporação e corte das fibras seria eficaz na prática.

## REFERÊNCIAS

ABTAHI, S. M. *et al.* **Hybrid reinforcement of asphalt-concrete mixtures using glass and polypropylene fibers**. Journal of engineered fibers and fabrics, Vol. 8, No. 2, 2013.

ADUATI, M. H. F. **Análise dos efeitos de fibras de polipropileno na adesividade e vida de fadiga em misturas asfálticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese (Doutorado em engenharia civil) – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO M323**: standard specification for superpave volumetric mix design. Washington, Estados Unidos, 2013.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T19-09**. Standard method of test for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate, 2004.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T209**. Standard method of test for theoretical maximum specific gravity (gmm) and density of hot mix asphalt (hma), 1999.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1557**: Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers. Pensilvânia, Estados Unidos, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 53:2003**: Agregado gráudo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**. Agregado gráudo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, 20014.

ARAÚJO, C. T. F. *et al.* In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa- Projeto- Produção em Concreto Pré-Moldados, 2005, São Carlos. **Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento das juntas de argamassa.** Maceió, 2005.

ARAÚJO, C. T. F. *et al.* In: 19º Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro, 2008. **Análise Laboratorial do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 30/45 – em Misturas Asfálticas.** Rio de Janeiro, 2008.

BABADOPULOS L. F. A. L. *et al.* In: 19º Encontro de Asfalto, 2008, Rio de Janeiro. **Análise do escoamento em misturas asfálticas do tipo sma com fibras de polipropileno.** Ceará, 2008.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo, 1 ed. Oficina de Textos, 2007.

BENEDETTI, L. Z. *et al.* In: 4º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - Universidade Federal do Pampa, 2012, Bagé. **Problemas e soluções em estruturas de pavimentos asfálticos.**, Bagé, 2012.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom. Elsevier, 1 ed. 1990.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** London And New York: Modern Concrete Technology Series, 2. ed. 2007.

BERNUCCI, L. D. *et al.* **Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros.** 1 ed., Rio De Janeiro, 2008.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados.** Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BORGES, P. R., G. S. *et al.* In: XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, 2016. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia Marshall e compactadas no compactador Marshall e no CGS (Compactador Giratório Superpave).** Rio de Janeiro, 2016.

BLASIUS L. C. B; DEL CARPIO J. A. V. **Escoamento de misturas asfálticas sma com uso de lã de vidro como aditivo estabilizante.** Artigo de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Extremo Sul Catarinense, 2016.

BREITENBACH J. **Estudo do efeito da adição de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas de módulo de resiliência e resistência a tração das misturas asfálticas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.



BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CASTRO S. F. **Misturas asfálticas com incorporação de cal: análise volumétrica e mecânica**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2011.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CNT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial**. Brasília, 2018.

CNT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Atlas do transporte 1ª edição, 2006**. Disponível em: <[http://Cms.Cnt.Org.Br/Imagens%20cnt/Site%202015/Pesquisas%20pdf/Atlas\\_Transporte\\_2006.Pdf](http://Cms.Cnt.Org.Br/Imagens%20cnt/Site%202015/Pesquisas%20pdf/Atlas_Transporte_2006.Pdf)>. Acesso em 26 de Março de 2019.

COSTA, L. F. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER ME 035/98**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - **DNIT 117/2010**. Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente, Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT 135/2018 ME**. Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação do módulo de resiliência - método de ensaio, 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT 136/2017 ME**. Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação da resistência à tração por compressão diametral - método de ensaio, 2017.

\_\_\_\_\_. **DNIT 178/2018 PRO**. Pavimentação asfáltica - preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório superpave ou o marshall – procedimento, 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT 031/2006 ES**. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço, 2006.

DOBBIN, E.S.J; ROCHA, L.F.S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle de fissuração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Centro de Ciências Exatas e Tecnologia) - Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

FERNANDES, M. R. S.; FORTE, M. M. C.; LEITE, L. F. M. in: 38ª Reunião Anual de Pavimentação, 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2007, Manaus. **Caracterização de asfaltos modificados com SBS**. Manaus, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese de Livre Docência – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FONSECA, L. L.; Almeida, m. g. g.; greco, J. a. s. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Avaliação da resistência a tração na flexão de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos**. Belo Horizonte, 2016.

GRANDE, W. R. **Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

GALLO, P. **Asphalt mix reinforced with vegetable fibers**. Faculty of Civil Engineering, Thákurova, 2017.

HECK, A. F. **Análise da viabilidade do uso de fibras de polipropileno como material de reforço em pavimentos asfálticos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

HOMEM, T.R. **comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

JAHROMI, S.G.; KHODAI, A. **Carbon fiber reinforced asphalt concrete**. The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 33, No. 2b, 2008.

JASKULA, P. *et al.* **Effect of polymer fibres reinforcement on selected properties of asphalt mixtures**. United Kingdom. Elsevier, Polônia, 2017.

KALOUSH, K. E. *et al.* **Asphalt mixtures using advanced material characterization tests – evergreen drive**. Tempe Arizona, Tempe, 2008.

KHATTAK, M. J. *et al.* **Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures**. Elsevier - Construction and Building Materials (40), Estados Unidos, 2013.

LOPES, D. L. **Análise dos efeitos de fibras de capim Annoni na adesividade e perda de massa por desgaste em misturas asfálticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

MACHADO, M. C. *et al.* In: XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte - ANPET, Recife, 2017. **Avaliação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente dosadas pela metodologia Superpave**, Rio de Janeiro, 2017.

MARTINEZ, J. G. B. **Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de eta e de ete**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2011.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3a ed. New York: McGraw-Hil, 2008.

MELLO, D. **Avaliação da adição de evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MELLO, L. G. R. *et al.* **Evaluation of fiber reinforcement in hot mix asphalt using advanced material characterization tests**. The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, México, 2008.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Univerdidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas sma produzidas com ligante asfalto-borracha**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

OLIVEIRA, L. A. P.; ALVES, P. C. P.; DIAS, S. M. M. In: 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 2007, Portugal. **Desempenho de argamassas reforçadas com fibras acrílica**. Universidade da Beira Interior, Portugal, 2007.

PAVEI, E. **Resistência à tração de misturas asfálticas com adição de cinza pesada**. Artigo de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Extremo Sul Catarinense, 2014.

PINHEIRO, G. S., R. L. *et al.* In: XXVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE, Alegrete, 2014. **Análise comparativa dos parâmetros de RT e MR para misturas com diferentes ligantes asfálticos a diferentes temperaturas**. Alegrete, 2014.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2009. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos**

**concretos para pisos e pavimentos.** Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2002.

SENATUS – **Especial 100 anos de JK.** Vol.2, No.1, Pág. 40 A 43, 2002.

SILVA, V. F. **Resistência mecânica de pavimentos de concreto com fibras de nylon e microfibras de aço.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

SILVA, D. A. **Núcleo do conhecimento, 2018.** Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/agregado-graudo>>. Acesso em 02 de Dezembro de 2019.

SOUZA JÚNIOR, J. G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal/ José Geraldo de Souza Júnior.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2018.

SOUZA, M. V. R. **Efeitos de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade Tecnológica, Distrito Federal, 2010.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TRINDADE, T. P. *et al.* **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões.** Revista Escola de Minas, Vol. 58, No. 1, Ouro Preto, 2005.

VALE A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. In: 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2007, Campinas. **Aplicabilidade de fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA,** Campinas, 2007.

**ANEXO A**

Propriedades do ligante – Ficha técnica



Número: 1941-17 G

## CÓPIA CERTIFICADO DE ENSAIO

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70 Código: 7 IK

Local de Amostragem: TQ 2954386	Laboratório: REPAR/OT/QP
Data/ hora Amostragem: 03/11/17 08:20	Endereço: Rodovia do Xisto (BR-476), km 16 83.707-440, Araucária - PR
Data/ hora Recebimento: 03/11/17 09:00	Telefone: +55 41 36412846 Fax: +55 41 36412846

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	55	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	49,6	grau C
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROLA 135 GC	E 102	141 min	181,0	S
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min	351	Cp
VISC. SS.:150GC	E 102	50 min	94,0	S
VISCOSIDADE BROKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	178	Cp
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROLA 177 GC	E 102	30 a 150	35,4	S
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	65	Cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min	56	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 máx	3,8	grau C
R_TFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min	>100	Cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,441	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>100	Cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	265	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	x 018	-1,5 a 0,7	-1,1	NIA
DENSIDADE RELATIV&A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,011	NIA
AQUECIMENTO A 177 GC	x 215	NESP (2)	NESP	NIA

**Notas:**

(1) Ensaio não faz parte da especificação. Informação para fins de faturamento.

(2) NESP = Não espuma

- Este certificado foi gerado eletronicamente e assinado digitalmente pelo responsável.



Data de Emissão: 03/11/2017 13:26:25	Página: 1 de 1	Certificado assinado digitalmente pelo responsável: Anderson Dagostin Pavei CRQ: 09302984
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		

**ANEXO B**

Características Volumétricas dos corpos de prova – Dosagem Superpave

	Teor de Ligante (%)	CP	G <sub>mb</sub>	G <sub>mb</sub> - médio	G <sub>mm</sub> - médio	Volume de Vazios (%)	Vazios com Betume	Vazios do Agregado Mineral	Relação Betume/Vazios
Referência	5,0	1	2,435	2,428	2,566	5,381	11,901	17,282	68,865
		2	2,414						
		3	2,435						
	5,5	1	2,434	2,438	2,553	4,531	13,144	17,675	74,363
		2	2,441						
		3	2,438						
	6,0	1	2,440	2,446	2,538	3,625	14,389	18,014	79,877
		2	2,448						
		3	2,450						
	6,5	1	2,445	2,461	2,531	2,756	15,686	18,442	85,054
		2	2,506						
		3	2,433						
0,25% de adição	6,0	1	2,403	2,407	2,522	4,585	14,157	18,742	75,534
		2	2,399						
		3	2,418						
	6,5	1	2,433	2,436	2,510	2,961	15,523	18,484	83,981
		2	2,450						
		3	2,424						
	7,0	1	2,420	2,432	2,501	2,747	16,692	19,439	85,867
		2	2,431						
		3	2,446						
	7,5	1	2,457	2,443	2,484	1,644	17,963	19,607	91,613
		2	2,430						
		3	2,442						
0,50% de adição	5,5	2	2,386	2,368	2,524	6,146	12,771	18,917	67,510
		2	2,363						
		2	2,356						
	6,0	3	2,401	2,382	2,507	4,978	14,011	18,990	73,783
		3	2,356						
		3	2,389						
	6,5	3	2,441	2,418	2,496	3,118	15,410	18,527	83,173
		3	2,410						
		3	2,403						
	7,0	3	2,446	2,427	2,482	2,210	16,655	18,866	88,283
		3	2,420						
		3	2,416						