

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Chaveli Brondani

**ESTUDO DO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA EM MISTURAS  
ASFÁLTICAS A QUENTE PRODUZIDAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS  
2019



**Chaveli Brondani**

**ESTUDO DO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA EM MISTURAS ASFÁLTICAS A  
QUENTE PRODUZIDAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS  
2019

BRONDANI, CHAVELI  
ESTUDO DO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA EM MISTURAS  
ASFÁLTICAS A QUENTE PRODUZIDAS NO RIO GRANDE DO SUL /  
CHAVELI BRONDANI.- 2019.  
202 p.; 30 cm

Orientador: LUCIANO PIVOTO SPECHT  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2019

1. MISTURAS ASFÁLTICAS 2. DANO POR UMIDADE INDUZIDA  
3. VISCOELASTICIDADE I. PIVOTO SPECHT, LUCIANO II.  
Título.

**Chaveli Brondani**

**ESTUDO DO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA EM MISTURAS ASFÁLTICAS A  
QUENTE PRODUZIDAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 21 de fevereiro de 2019:**

---

**Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Magnos Baroni, Dr. (UFSM)**

---

**Fernando Dekeper Boeira, Dr. (FATEC)**

Santa Maria, RS  
2019



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus maravilhosos pais Valdelirio e Nilva Brondani, a quem muito admiro e me inspiro, e sem os quais não teria chegado até aqui.  
À minha querida irmã, Rocheli Brondani, por todo amor e companheirismo.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força durante toda a trajetória.

Agradeço enormemente à minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao Daniel de Souza Santos, por compartilhar comigo tantas madrugadas e finais de semana de estudos e ensaios laboratoriais, teu apoio foi fundamental.

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela oportunidade, pela confiança e pelos ensinamentos.

Ao professor Magnos Baroni, pela disponibilidade em compor a banca examinadora compartilhando seus conhecimentos e experiências.

Ao Dr. Fernando Dekeper Boeira, pelos ensinamentos e vivências divididos durante a pós-graduação e por aceitar fazer parte da banca examinadora como membro externo.

Aos demais professores da UFSM, sempre solícitos em ensinar e apoiar, em especial aos professores Rinaldo José Barboza Pinheiro, Andrea Valli Nummer, Tatiana Cureau Cervo e Deividi da Silva Pereira.

Às amigadas que o Mestrado me proporcionou: ao Silvio Schuster, pela parceria diária nas disciplinas, no laboratório, na pesquisa e nas discussões filosóficas; ao Cléber Faccin, por toda ajuda e ensinamentos; à Karine Wille, Ketrily Martins Saraiva, Antonio Daniel Boff Vieira e Rômulo Pereira, pela amizade, companheirismo e horas-extras no laboratório, ao Eduardo Druzian, Victória Nunes, Ana Helena Back, Lucas Bueno, Jennifer Ilha, Gustavo dos Santos Pinheiro, Bethânia Machado Correa, Andressa Ambrós de Oliveira, Felipe Cipriani Luzzi, Bruno Gonçalves, Gabriela Meller e Pedro de Almeida Junior, sempre dispostos a ajudar. Aos demais amigos e colegas da pós-graduação, integrantes do GEPPASV e funcionários da UFSM, sou muito grata pelo convívio e pela ajuda quando precisei. Levarei a amizade de todos sempre!

Ao aluno Pablo Vestena, pela ajuda na montagem da planilha que automatizou o processo de ajustes de parâmetros 2S2P1D.

Ao Departamento de Geociências da UFSM, em especial aos professores Dr Luis Eduardo Robaina e Dra Andrea Nummer do Departamento de Geociências da UFSM e pela colaboração dos estagiários de Geologia da Universidade Federal do

Pampa (UNIPAMPA), Campus Caçapava do Sul: Ravi Gabriel dos Santos Pinheiro Sampaio, Gabriela Gheralde e Lucas Luiz Dal Bosco, pela avaliação petrográfica das amostras de rocha.

Ao LACHEM, especialmente à Gabriela Leal e ao senhor Luís Manoel do Rosário Ferraz, pela disponibilidade na realização do ensaio de Fluorescência de Raios-X.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante parte do Mestrado, possibilitando maior dedicação à pesquisa.

À Petrobras/ANP e à Rede de Asfalto, pelo aporte financeiro na compra de equipamentos utilizados na pesquisa.

À todas as empresas que forneceram os materiais utilizados no trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ao LMCC e à UFSM pelo suporte pessoal, material e equipamentos disponibilizados.

Enfim, a todos àqueles que fazem parte da minha vida, que contribuíram de alguma forma na minha trajetória e para conclusão desta pesquisa. Obrigada a todos vocês por me tornarem cada dia um ser humano melhor.

## RESUMO

### ESTUDO DO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE PRODUZIDAS NO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Chaveli Brondani  
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

Pavimentos asfálticos devem fornecer aos usuários um transporte seguro e confiável, entretanto, agentes como: ações do tráfego, condições climáticas e manutenção inadequada resultam no processo de deterioração das vias. A água é um propulsor que está acoplado a este problema, podendo mudar a distribuição de esforços, as propriedades de danificação e os parâmetros de rigidez, alterando a relação tensão/deformação e todo o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Com isso, estudos que abordem os processos da influência da umidade nos aspectos de rigidez e danificação das misturas asfálticas se fazem necessários. Nesse sentido essa pesquisa vem complementar os estudos de Faccin (2018) e Schuster (2018) que analisaram respectivamente a resistência a deformação permanente e o comportamento à fadiga nas mesmas misturas. A presente pesquisa vem contribuir com a construção de um banco de dados com as características de 24 misturas asfálticas densas preparadas e utilizadas no Rio Grande do Sul (RS), tendo como escopo verificar a suscetibilidade ao dano por umidade induzida sobre abordagem viscoelástica. Com o intuito de atingir os objetivos propostos trabalharam-se duas frentes na metodologia, uma analisando os agregados, sua composição química e mineralógica e a interação com o betume, e outra estudando comportamento das misturas diante do efeito deletério da água. Para isso, 12 amostras de rocha foram avaliadas e classificadas com a utilização dos ensaios de lâmina petrográfica, fluorescência de raios-X e adesividade ao ligante betuminoso. Realizou-se análise comparativa entre todos os resultados originando um *ranking* para classificação quanto a adesividade visual que vai do excelente ao péssimo. Com os corpos de prova já confeccionados foram realizados os ensaios de dano por umidade induzida (DUI) e módulo complexo com aplicação do protocolo de danificação por umidade induzida em dois ciclos. Para a análise de dados das misturas foi utilizado o modelo matemático 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolics, 1 Dashpot) desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003) afim de modelar as propriedades viscoelásticas. No ensaio de Dano por Umidade induzida (DUI) todas as misturas apresentaram valores que indicam perda de resistência por umidade induzida. Porém todas elas atendem os limites estabelecidos indicando não haver grandes problemas nas misturas produzidas no RS em termos de efeito deletério da água. Após os ciclos de danificação por umidade induzida observa-se um aumento do ângulo de fase e diminuição nos valores de módulo indicando queda na rigidez, ou seja, perda da viscoelasticidade, alertando para a diminuição da capacidade do ligante dentro da mistura causada pela perda de ligação entre os componentes, modificando completamente a distribuição de esforços dentro da estrutura. Por meio do ensaio de módulo complexo notaram-se diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante após a ciclagem. Observa-se ainda, após a ciclagem, um aumento do ângulo de fase e diminuição nos valores de módulo indicando queda na rigidez. Notou-se também um maior afastamento de todas as curvas após os ciclos de dano, sendo mais expressivo nas misturas que utilizaram CAP 50/70, indicando que misturas com ligante convencional são mais suscetíveis à ação deletéria da água do que as com ligante modificado.

**Palavras-chave:** Misturas Asfálticas. Dano por umidade induzida. Viscoelasticidade.



## ABSTRACT

### ESTUDY OF DELETERIOUS EFFECT OF WATER IN HOT MIX ASPHALT USED IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Chaveli Brondani  
ADVISOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Asphalt pavements should provide users with safe and reliable transportation, however, agents such as traffic actions, weather conditions and inadequate maintenance result in the process of road deterioration. The water is a propellant that is coupled to this problem, being able to change the distribution of stresses, the damaging properties and the stiffness parameters, changing the strain / deformation relationship and all the mechanical behavior of the asphalt mixtures. Thus, studies that address the influence of humidity on the aspects of stiffness and damage of asphalt mixtures are necessary, in this sense this research is complementary to the studies of Faccin (2018) and Schuster (2018) that analyzed the resistance to deformation and fatigue behavior in the same mixtures. The present research contributes to the construction of a database with the characteristics of 24 mixtures prepared and used in RS. In this work, the scope is to verify the susceptibility to induced moisture damage of dense asphalt mixtures produced and applied on highways in Rio Grande do Sul on viscoelastic approach. For this, the collected aggregates were submitted to the tests of petrographic analysis, fluorescence of X-rays and of adhesiveness to the bituminous binder. Induced moisture damage and complex modulus with application of the protocol of damage by induced humidity in two cycles. The 2S2P1D mathematical model (2 Springs, 2 Parabolics, 1 Dashpot) developed by Olard and Di Benedetto (2003) was used to analyze the performance of the viscoelastic properties. The 12 rock samples were evaluated and classified with the use of petrographic scale tests, X-ray fluorescence and adhesiveness to bituminous binder. A comparative analysis was then carried out between all the results, resulting in a ranking for classification in terms of visual adhesiveness ranging from excellent to poor. In the Induced Moisture Damage test, the mixtures showed values that indicate loss of resistance due to induced humidity. However, they all meet the established limits, indicating that there are no major problems in the mixtures produced in RS in terms of the deleterious effect of water. After damaging cycles induced humidity, an increase of the phase angle and decrease in the modulus values are observed indicating a decrease in stiffness, that is, loss of viscoelasticity, prompting for the decrease of the capacity of the binder inside the mixture caused by the loss of between the components, completely modifying the distribution of forces within the structure. Through the complex modulus test significant differences in rheological behavior were observed, even for mixtures with the same type of binder after cycling. It is also observed, after the cycling, an increase of the phase angle and decrease in the values of modulus indicating drop in stiffness. It was also noted a greater spacing of all curves after the cycles of damage, being more expressive in the blends utilizing CAP 50/70, indicating that blends with conventional binder are more susceptible to water-depleting action than those with modified binder.

**Keyword:** Hot Mix Asphalt. Moisture Damage. Viscoelasticity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul....	35
Figura 2 - Escala típica de teor de Sílica para rochas comuns.....	37
Figura 3 - Carga elétrica inerente ao tipo da rocha matriz .....	41
Figura 4 - Molhagem de um sólido por um líquido .....	44
Figura 5 - Estágio de molhagem de um sólido por um líquido.....	45
Figura 6- Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura.....	47
Figura 7 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos .....	48
Figura 8 - Limites de deformação conforme o comportamento das misturas asfálticas para temperatura fixa .....	48
Figura 9 - Comportamento elástico linear .....	52
Figura 10 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada.....	54
Figura 11 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo .....	57
Figura 12 - Princípio de superposição tempo – temperatura.....	60
Figura 13 - Representação física de Modelos reológicos.....	61
Figura 14 - Representação do Modelo 2S2P1D.....	64
Figura 15 - Dano no concreto asfáltico.....	65
Figura 16 – Fluxograma da pesquisa .....	71
Figura 17 - Resumo dos materiais coletados .....	72
Figura 18 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas.....	73
Figura 19 - Mapa localização das usinas amostradas.....	75
Figura 20 - Localização das pedreiras com coleta de material.....	76
Figura 21- Análise petrográfica (a) Amostra de mão coletada para posterior redução; (b) Redução da amostra com o auxílio da serra diamantada; (c) Politriz utilizada para desgastar a lâmina delgada; (d) Microscópio petrográfico. ....	80
Figura 22 - Produção de raios X.....	81
Figura 23 - Espectro característico de um padrão multielementar .....	82
Figura 24 - Espectrômetro de FRX S2 Ranger Bruker, utilizado para determinação da composição química.....	83
Figura 25 - Amostra de mistura asfáltica após ensaio de adesividade do agregado graúdo .....	85
Figura 26 - Cuba onde é realizada a saturação dos corpos de prova.....	87
Figura 27 - Ciclos de congelamento e imersão em água. (a) Congelamento de 16 hrs à -18 °C. (b) Imersão por 24 hrs à 60 °C (c) Condicionamento por 2 hrs 25 °C .....	87
Figura 28 - Colagem dos pinos nos corpos de prova de ensaio de Módulo Complexo .....	90
Figura 29 - Software UTS006 e registro de dados e resultados do Ensaio de Módulo Complexo .....	91
Figura 30 - Condicionamento e Ensaio dos Corpos de prova .....	92
Figura 31 - Influência dos parâmetros associados aos elementos físicos do modelo 2S2P1D.....	95

Figura 32 - Fluxograma dos fatores influenciadores da adesividade em agregados .....	100
Figura 33 - Resultado do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso .....	102
Figura 34 - Resultado do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso .....	103
Figura 35 - Relação entre composição FRX, acidez das rochas e a classificação da adesividade visual CAP 50/70 .....	108
Figura 36 - Comparação entre resultados de RT entre corpos de prova com condicionamento e sem condicionamento .....	110
Figura 37 - Resultados RRT entre corpos de prova de 21 misturas .....	111
Figura 38 - Comparativo dos resultados de RRT (@25°C) de misturas com ligante convencional (CAP 50/70) desta pesquisa com misturas de referência de Boeira (2014), Bohn (2017) e Barboza Jr (2018) .....	114
Figura 39 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade .....	119
Figura 40 - Diagrama Black, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade .....	121
Figura 41 - Curvas mestras de módulo dinâmico, para todas as misturas, obtidas com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade (@21°C) .....	124
Figura 42 - Curvas mestras de ângulo de fase, para todas as misturas, obtidas com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade (@21°C) .....	126
Figura 43 - Propriedades viscoelásticas da mistura U1-DAER-FXA-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	128
Figura 44 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DAER-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	128
Figura 45 - Propriedades viscoelásticas da mistura U4-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	130
Figura 46 - Propriedades viscoelásticas da mistura U4-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	131
Figura 47 - Propriedades viscoelásticas da mistura U8-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	132
Figura 48 - Propriedades viscoelásticas da mistura U8-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	133
Figura 49 - Propriedades viscoelásticas da mistura U10-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	134
Figura 50 - Propriedades viscoelásticas da mistura U11-DAER-FXA-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	135
Figura 51 - Propriedades viscoelásticas da mistura U13-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	136
Figura 52 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	137
Figura 53 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água .....	138

Figura 54 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	141
Figura 55 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DNIT-FXB-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	142
Figura 56 - Propriedades viscoelásticas da mistura U6-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	143
Figura 57 - Propriedades viscoelásticas da mistura U7-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	144
Figura 58 - Propriedades viscoelásticas da mistura U9-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	145
Figura 59 - Propriedades viscoelásticas da mistura U12-DAER-FXB-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	146
Figura 60 - Propriedades viscoelásticas da mistura U12-DAER-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	147
Figura 61 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água .....	148
Figura 62 - Propriedades viscoelásticas da mistura U3-DAER-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água .....	150
Figura 63 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DAER-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água .....	151
Figura 64 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DNIT-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água .....	152
Figura 65 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DNIT-FXC-65/90 frente ao efeito deletério da água .....	154
Figura 66 - Propriedades viscoelásticas da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF frente ao efeito deletério da água .....	155
Figura 67 - Gráfico do RRT pelo $E^*r$ a 10 Hz .....	157
Figura 68 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P1 .....	177
Figura 69 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P2 .....	178
Figura 70 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P9 .....	179
Figura 71 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P4 .....	180
Figura 72 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P13 .....	181
Figura 73 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P15 .....	182
Figura 74 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P14 .....	183
Figura 75 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P6/P7/P8.....	184
Figura 76 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P3 .....	185
Figura 77 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P10 .....	186
Figura 78 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P5 .....	187
Figura 79 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P11/P12 .....	188



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das principais rochas para pavimentação .....	32
Tabela 2 - Valores especificações agregados.....	33
Tabela 3 - Fatores que interferem nas características de adesividade .....	42
Tabela 4 - Relação de misturas estudadas e nomenclatura utilizada .....	74
Tabela 5 - Ligantes asfálticos utilizados nas misturas.....	77
Tabela 6 - Tempo mínimo recomendado de estabilização da temperatura das amostras a serem ensaiadas .....	91
Tabela 7- Classificação Petrográfica das 12 amostras de rocha e porcentagens de minerais encontradas .....	98
Tabela 8 - Resultado do ensaio de Fluorescência de Raios-X.....	99
Tabela 9 - Ranking de adesividade visual CAP 50/70.....	101
Tabela 10 - Classificação das rochas quanto a acidez e ranking de adesividade quando comparados parâmetros dos ensaios tecnológicos dos agregados minerais .....	105
Tabela 11 - Valores de Resistência Retida à Tração para o ensaio de dano por umidade induzida .....	110
Tabela 12 - Resultados de RRT apresentados em ordem crescente com ranqueamento da adesividade visual e existência de aditivos na mistura .....	113
Tabela 13 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura obtidos por Faccin (2018).....	115
Tabela 14 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura após ciclo 1 .....	116
Tabela 15 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura após ciclo 2 .....	117
Tabela 16 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P1.....	177
Tabela 17 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P2.....	178
Tabela 18 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P9.....	179
Tabela 19 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P4.....	180
Tabela 20 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P13.....	181
Tabela 21 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P15.....	182
Tabela 22 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P14.....	183
Tabela 23 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P6/P7/P8.....	184
Tabela 24 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P3.....	185
Tabela 25 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P10.....	186
Tabela 26 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P5.....	187
Tabela 27 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P11/P12 .....	188



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	<i>Aggregate Imaging Measurement System</i>
AMP	Asfalto modificado por polímero
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório <i>Superpave</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
CREMA	Programa do DNIT para recuperação e conservação de rodovias
CV	Coeficiente de Variação
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DMM	Densidade Máxima Medida
DNIT	Departamento Nacional e Infraestrutura e Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DUI	Dano por Umidade Induzida
E*	Módulo Complexo
E1	Parcela Real do Módulo Complexo
E*	Valor Absoluto do Módulo Complexo
ECOFLEX	Asfalto borracha
FRX	Fluorescência de Raio-X
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
Hz	Hertz
LACHEM	Laboratório de Análises Química
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
MR	Módulo de Resiliência
PSTT	Princípio da Superposição Tempo-Temperatura
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à tração
RRT	Resistência à Tração Retida
T	Temperatura
TLA FLEX	<i>Trinidad Lake Asphalt</i> – Ligante modificado
TTSP	<i>Time-Temperature Superposition Principle</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
VV	Volume de Vazios
2S2P1D	<i>Two Strings, Two Parabolics, One DashPot</i>
$\varphi$	Ângulo de Fase



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	26
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>29</b>
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS .....	29
<b>2.1.2 Materiais de composição das misturas asfálticas</b> .....	<b>31</b>
2.1.2.1 Agregados minerais .....	31
2.1.2.2 Ligantes asfálticos .....	38
2.2 ADESIVIDADE E O EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA .....	40
<b>2.2.1 Mecanismos de ruptura da adesão</b> .....	<b>45</b>
<b>2.2.2 Dano por umidade induzida</b> .....	<b>45</b>
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	47
<b>2.3.1 Rigidez</b> .....	<b>50</b>
2.3.1.1 Abordagem elástica .....	52
2.3.1.2 Abordagem viscoelástica .....	53
2.3.1.3 Análogos Mecânicos .....	60
2.3.1.4 Modelo 2S2P1D .....	62
<b>2.3.2 Danificação</b> .....	<b>64</b>
2.3.2.1 Fadiga .....	66
2.3.2.2 Deformação permanente .....	68
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>71</b>
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	71
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	74
<b>3.2.1 Misturas asfálticas densas</b> .....	<b>74</b>
3.2.1.1 Agregados minerais .....	76
3.2.1.2 Ligantes asfálticos .....	76
3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	77
<b>3.3.1 Ensaios tecnológicos dos agregados</b> .....	<b>78</b>
3.3.1.1 Análise Petrográfica .....	78
3.3.1.1 Fluorescência de Raio-x .....	80
3.3.1.3 Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso .....	84
<b>3.3.2 Ensaios tecnológicos das misturas asfálticas</b> .....	<b>85</b>
3.3.2.2 Dano por umidade induzida .....	85
3.3.2.3 Módulo Complexo com protocolo de efeito deletério da água em dois ciclos .....	88
<b>3.3.3 Modelagem físico matemática – 2S2P1D</b> .....	<b>93</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>97</b>
4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA .....	97
4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X .....	99
4.3 ADESIVIDADE AO LIGANTE BETUMINOSO .....	99
<b>4.3.1 Análise comparativa a partir dos resultados dos ensaios de lâmina petrográfica, FRX e adesividade</b> .....	<b>104</b>
4.4 DANO POR UMIDADE INDUZIDA - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA (RRT) .....	109
4.5 MÓDULO COMPLEXO .....	114
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>158</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	159
5.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	162
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>163</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>177</b>

<b>APÊNDICE A – IMAGENS DAS 12 AMOSTRAS ANALISADAS E RESULTADOS COMPLETOS REFERENTES AO ENSAIO DE LÂMINA PETROGRÁFICA.....</b>	<b>177</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS COMPLETOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS.....</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO B - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MORFOLOGIA DOS AGREGADOS MINERAIS .....</b>	<b>202</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de serviço, um pavimento deve fornecer aos usuários um transporte seguro e confiável. Entretanto, devido as ações do tráfego pesado e das condições climáticas ao qual está exposto ao longo do tempo, os pavimentos sofrem com o processo de deterioração. A manutenção inadequada é um agravante que contribui para essa degradação. O estado do nível de serviço dos pavimentos está diretamente relacionado às condições de segurança, conforto e tempo de viagem dos usuários, o que eleva de maneira significativa os custos operacionais veiculares influenciando sobremaneira a economia de um país (YODER & WITCZAC, 1975; MEDINA & MOTTA, 2005; BERNUCCI et al., 2006; PAPAGIANNAKIS & MASSAD, 2008).

A degradação de um pavimento e a perda de serventia tem como causas principais as variações climáticas e cargas de tráfego às quais estão expostas (CORTIZO, 2004). Diante disso, é muito importante que o profissional de engenharia, para formular as misturas asfálticas e compor a estrutura dos pavimentos, mais do que apenas interpretar dados laboratoriais, tome conhecimento das solicitações e intemperização às quais a estrutura está exposta em campo. Portanto, avaliar acertadamente o comportamento mecânico é primordial para uma melhor concepção e execução de pavimentos na prática.

A mistura asfáltica em campo está submetida à esforços que causam em sua estrutura algum tipo de degradação, os danos mais frequentes são fadiga e deformação permanente. Todavia a água está acoplada a este problema, podendo mudar a distribuição de esforços, as propriedades de danificação e os parâmetros de rigidez, alterando a relação tensão/deformação e todo o comportamento mecânico da mistura.

Os principais mecanismos de ação da água no revestimento asfáltico, segundo Lottman (1978), que acarretam a perda de ligação adesiva ou descolamento da película de asfalto do agregado, são causados pela expansão devida a altas temperaturas, pela expansão e contração diferenciais dos materiais, pela pressão provocada pela passagem dos veículos e pelos ciclos de gelo/degelo.

De acordo com Kennedy et al. (1983), a presença de umidade na mistura asfáltica pode provocar uma série de danos que acabam por refletir na vida de serviço

do revestimento asfáltico, causando maiores necessidades de intervenções e manutenções. A coesão da mistura é modificada pelo descolamento do ligante asfáltico do agregado, isto acarreta mudanças de propriedades importantes como a flexibilidade, resistência à tração e rigidez.

A adesividade entre o asfalto e o agregado pode ser avaliada através de métodos de análise visual ou de análise do comportamento mecânico das misturas asfálticas. Serão estudados aspectos mineralógicos e químicos dos agregados valendo-se dos ensaios de análise petrográfica e fluorescência de raios-X. A adesividade será avaliada por meio da realização do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso. Esta pesquisa propõe estudar o efeito deletério da água nas misturas asfálticas densas a partir da realização do ensaio de dano por umidade induzida. Também será aplicado esse mesmo protocolo de danificação para realizar a análise de parâmetros de rigidez utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo, utilizando-se a modelagem 2S2P1D.

Concomitante a este estudo, Faccin (2018) analisou a resistência a deformação permanente enquanto Schuster (2018) o comportamento à fadiga fazendo uso das mesmas 24 misturas, de forma a criar um espectro completo para sua avaliação. Os autores buscaram avaliar em seus trabalhos o comportamento mecânico de distintas misturas asfálticas produzidas no Rio Grande do Sul e que são de fato utilizadas nas rodovias do estado, gerando com isso um banco de dados com as características das misturas e o estado da prática atual. Isto posto, busca-se através desta pesquisa contribuir com a construção deste banco de dados através do estudo do efeito deletério da água no que diz respeito à rigidez das misturas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a suscetibilidade ao dano por umidade induzida de misturas asfálticas densas produzidas e aplicadas em rodovias no Rio Grande do Sul sobre abordagem viscoelástica.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como forma de complementação do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar as propriedades tecnológicas dos diferentes agregados através dos ensaios laboratoriais de caracterização;
- b) Avaliar a adesividade das misturas através de protocolos com agregados e protocolos com misturas completas;
- c) Analisar o comportamento viscoelástico das misturas quando expostas à danificação por umidade induzida em laboratório;
- d) Correlacionar os resultados e parâmetros obtidos através dos ensaios laboratoriais, verificando a existência de tendências entre os mesmos para possível criação de um padrão de previsão do comportamento e desempenho das misturas asfálticas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda os assuntos necessários à compreensão sobre as misturas asfálticas, destacando-se às utilizadas no Rio Grande do Sul (RS), os materiais que a compõe, e a interação entre eles e o dano induzido pela água. Buscou-se compreender também o comportamento mecânico das misturas, com foco central no estudo dos parâmetros de rigidez das misturas asfálticas, principalmente sobre abordagem viscoelástica, objeto deste estudo. Também serão apresentados os conceitos relativos à adesividade e efeito deletério da água.

### 2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas não somente devem ser projetadas pensando no dano produzido pelas cargas impostas pelo tráfego de veículos, mas também se deve considerar a ação da natureza. Atualmente para analisar a influência dos fenômenos naturais se estuda separadamente cada um dos fatores que os compõe (sendo eles: a água, o ar, a variação de temperatura e os raios ultravioletas), avalia-se então o comportamento mecânico e químico do ligante, do agregado e da mistura de maneira separada.

Normalmente para realizar os ensaios são utilizados equipamentos que não podem reproduzir por completo as ações da natureza nas propriedades mecânicas e reológicas dos ligantes e das misturas asfálticas. A maior parte das pesquisas procura combinar os diferentes ensaios e equipamentos para buscar uma forma de avaliar como são alteradas as propriedades destes materiais submetidos a condições as quais normalmente estão expostos.

Segundo Anitelli (2013) a água da chuva, por exemplo, pode infiltrar pelos vazios da mistura asfáltica, e/ou ficar confinada em sua estrutura e, somada à ação do tráfego, provocar danos à mistura asfáltica por excesso de pressão nos poros ou lavagem hidráulica, levando ao desprendimento ou deslocamento da película de asfalto do agregado. Esse processo intensifica os mecanismos de deterioração da deformação permanente e da trinca por fadiga. Logo, os efeitos causados pela água no revestimento asfáltico podem ser potencializados pela variação de temperatura e pelo ciclo hidrológico.

Um dos principais modos de dano das misturas asfálticas é o efeito de separação do ligante asfáltico com o agregado pétreo. Esse fenômeno foi descoberto na década de trinta e se denomina "*stripping*". O *stripping* ocorre por um efeito físico-químico entre o asfalto e o agregado pétreo, por isso a qualidade deste último e sua composição mineralógica são fatores que afetam a magnitude deste fenômeno. A aderência entre o asfalto e o agregado pétreo depende fortemente da mineralogia do agregado segundo Kanitpong e Bahia (2008).

O *stripping* é geralmente definido como: desprendimento da película asfáltica que recobre o agregado pétreo devido a penetração da água entre a superfície do agregado e a película de asfalto, já que dada a maior afinidade da água com o agregado a união entre os materiais que compõe a mistura asfáltica se rompe.

O fenômeno de *stripping* envolve aspectos físicos, químicos, mecânicos e termodinâmicos, o que torna complexo seu estudo detalhado (ABO-QUDAIS, 2007 & CUI, 2015). Apesar do grande número de pesquisas realizados sobre o tema, tanto este fenômeno como suas causas ainda não são totalmente identificadas nem entendidas (MOHAMED, 1993; BAGAMPADDE et al., 2005).

De acordo com Anitelli (2013), trincas por fadiga e deformação permanente são os defeitos mais comuns que se desenvolvem na camada asfáltica. Quando as trincas não são restauradas no pavimento em serviço acabam por facilitar a entrada de água no pavimento. Tal umidade, com o passar do tempo e das solicitações do tráfego, pode levar ao descolamento e o arrancamento da película de asfalto da mistura e, futuramente, pode atingir e danificar as camadas mais profundas do pavimento.

Os trabalhos de Faccin (2018) e Schuster (2018) avaliaram as misturas asfálticas densas, pois são as mais utilizadas no Rio Grande do Sul, buscando compreender por meio do estudo dos materiais utilizados em sua composição e também pelos métodos de dosagem o comportamento dessas misturas frente à deformação permanente e à fadiga, respectivamente. Para complementar tais pesquisas, procura-se compreender agora aspectos relacionados à adesividade das misturas, o efeito a danificação por umidade induzida e o comportamento mecânico no que tange a análise de rigidez das misturas.

## **2.1.2 Materiais de composição das misturas asfálticas**

Construída por meio da combinação de agregados minerais e ligante asfáltico, a mistura asfáltica tem seu desempenho e características dependentes de forma direta com tais componentes, os quais serão apresentados a seguir, procurando focar nos aspectos relacionados à adesividade e danificação por umidade induzida, objetos de estudo desta pesquisa.

### *2.1.2.1 Agregados minerais*

De acordo com o Bernucci et al. (2010) as misturas asfálticas são compostas de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume de agregados. Pedregulho, pedra britada, areia são exemplos de agregados minerais, definidos como material granular de composição mineral. Esses materiais podem ser utilizados em camadas de base, lastros ferroviários, ou ainda, quando misturados com um material cimentante, em argamassas ou concretos.

Para a seleção dos agregados na construção dos pavimentos asfálticos deve ser levada em consideração a disponibilidade, a qualidade do material, o custo e o tipo de construção almejada. Para que o agregado seja adequado à sua finalidade na construção asfáltica é necessário avaliá-lo quanto a: forma da partícula, tamanho, graduação, rigidez, durabilidade, textura superficial, absorção, sanidade, composição mineralógica e afinidade com asfalto.

Isto posto, Balbo (2007) aponta algumas características de relevância tecnológica das rochas comumente utilizadas na pavimentação (Tabela 1).

Tabela 1 - Características das principais rochas para pavimentação

<b>Denominação</b>	<b>Origem</b>	<b>Variedades e associações</b>	<b>Observações quanto aos agregados resultantes</b>
Granito	Magmática plutônica	Família: granitos, adamelitos, granodiorito. Variedades: aplito, pegmatito, sienitos, tonalito.	Podem apresentar elevada acidez, prejudicial à adesividade com o asfalto; seus fragmentos são pouco lamelares, apresentando boa quantidade de finos após a britagem.
Basalto e diabásio	Magmática eruptiva	Família: grabo. Variedades: maciços e veiculares. Basalto: extrusivo. Diabásio: intrusivo.	Apresentam pH básico. Seus fragmentos tendem a apresentar lamelaridade, resultando também poucos finos de sua britagem. As variedades vesiculares são muito porosas, exigindo cuidados na dosagem de misturas com ligantes asfálticos. Apresentam maior dificuldade de britagem.
Calcário	Sedimentar ou metamórfica	Variedades: calcífero, dolomítico, dolomita, magnesiano. Sedimentares: de origem orgânica ou clástica. Metamórficos: mármore e giz.	Resultam em britas de boa forma, com boa adesividade e finos de boa qualidade. Apresentam facilidade de britagem. Uma desvantagem do emprego de agregado calcário, em revestimentos de pavimentos, é o rápido polimento, ao qual a superfície fica sujeita pela ação do tráfego.

Fonte: adaptado de Balbo (2007).

Visto isto, sabe-se que alguns agregados podem conter substâncias incomuns e que estas podem ser prejudiciais às misturas asfálticas. Outro aspecto relevante é a determinação do grau de resistência à abrasão dos agregados quando sob a ação de determinadas cargas de tráfego, que juntamente com a textura superficial do agregado, influencia na trabalhabilidade e resistência da mistura. Por exemplo, quando se trabalha com agregados mais rugosos a resistência da mistura tende a aumentar, porém com a perda da trabalhabilidade é necessário adicionar mais ligante para compensar.

Outro fator que influencia a trabalhabilidade da mistura é a forma das partículas, modificando também o esforço de compactação necessário para a obtenção da densidade especificada, bem como a resistência da mistura. De acordo com o

Bernucci et al (2010) as pedras britadas conduzem a um maior intertravamento e, portanto, maior resistência ao deslocamento. Outro aspecto ainda, capaz de onerar o pavimento, é o agregado poroso, que tem por consequência fazer uso de uma quantidade adicional de ligante asfáltico.

Os agregados fornecem pontos de atrito nos revestimentos aumentando sua resistência e melhorando a distribuição de cargas para as camadas subjacentes, evidenciando que, quando a faixa granulométrica é adequadamente projetada ela influencia de forma direta as propriedades mecânicas, hidráulicas e de durabilidade das misturas asfálticas. (ROBERTS et al., 1991).

De forma resumida, para definição dos agregados a serem utilizados em concretos asfálticos, além da granulometria, as especificações do Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens, DAER ES-P 16/91, e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT ES-031/06, recomendam que sejam avaliadas também as seguintes características, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Valores especificações agregados

Características	DNIT <sup>1</sup>		DAER/RS <sup>2</sup>	
	Requisito	Método de ensaio N°	Requisito	Método de ensaio N°
Desgaste Los Angeles (%)	≤50	DNER-ME 035	≤40	DAER-ME 211
Índice de forma	>0,50	DNER-ME 086	-	-
Durabilidade/Sanidade (%)	<12	DNER-ME 089	≤10	DAER-ME 214
Equivalente de areia (%)	≥55	DNER-ME 054	≥50	DAER-ME 217
Lamelaridade	-	-	≤50	DAER-ME 231

Fonte: <sup>1</sup>DNIT 031/2006 -ES; <sup>2</sup>DAER ES-P-16/91.

A análise dessas características dos agregados, mencionadas anteriormente, podem afetar significativamente a ligação entre o asfalto e o agregado, ou seja, a adesão desenvolvida entre os materiais é ligada às características particulares do agregado e do asfalto. Por isso, a escolha correta dos materiais é imprescindível para o desenvolvimento da boa ligação adesiva.

As rochas naturais são classificadas pelos geólogos em três grandes grupos: ígneas (ou magmáticas), sedimentares e metamórficas, sendo o comportamento

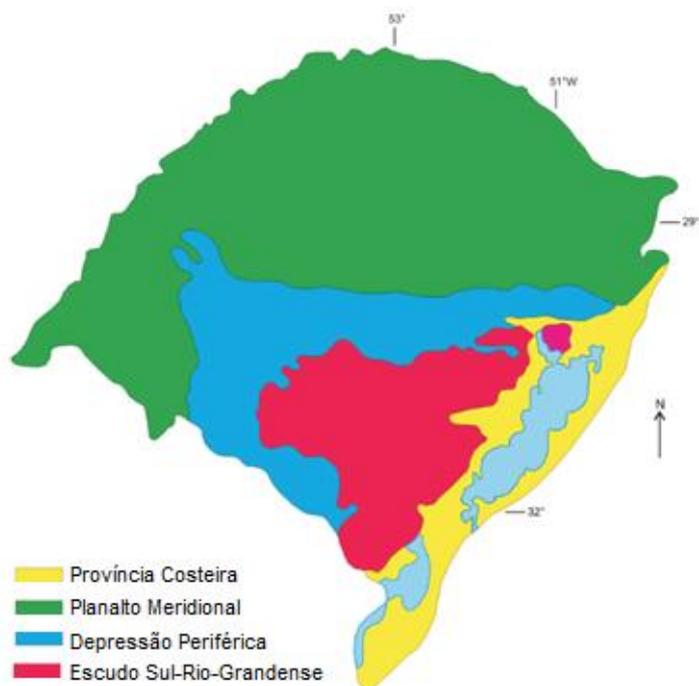
mecânico delas definido pela sua mineralogia, arranjo estrutural e granulometria, cada qual com maior importância relativa conforme o tipo de rocha (OLIVEIRA; DE BRITO, 1998).

O estado do Rio Grande do Sul pode ser dividido em quatro grandes províncias geológicas, segundo Menegat et al. (1998) as mesmas podem ser identificadas a partir das características geológicas e estruturais das rochas e modelados da superfície, conforme Figura 1. Os agregados produzidos no estado acabam tendo diferentes características justamente por serem obtidos de distintas formações geológicas.

Ao observar a Figura 1, identifica-se o domínio da Província Costeira, que está localizado na costa leste do estado, e é constituído por um rosário de pequenas lagoas isoladas e encravadas em depósitos arenosos, de idade quaternária. Já ao norte, identifica-se o Planalto Meridional, formado por extenso platô de rochas basálticas e riodacíticas. As terras baixas, localizada no entorno da falda do platô, compõe-se de coxilhas suaves e planícies fluviais, que formam a Depressão Periférica, domínio constituído por rochas sedimentares paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná.

Na porção sudeste do estado, evidencia-se o Escudo Sul-Rio-Grandense, planalto constituído por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Segundo Viero (2010), esse domínio está formado por associações de rochas ígneas de composição predominantemente granítica, as quais, normalmente, são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, representadas por extenso complexo de gnaisses ortoderivados, rochas máfico-ultramáficas de assoalho oceânico, xistos e mármore de composição metapelítica. Estes, por sua vez, estão recobertos por um pacote com cerca de 5.000m de espessura de rochas sedimentares, intercaladas a rochas vulcânicas, cujas afinidades variam entre magmas básicos a ácidos na forma de lavas e rochas piroclásticas, que compõem a Bacia do Camaquã.

Figura 1 - Províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Porscher e Lopes (2000) adaptado por Faccin (2018).

Os agregados são responsáveis por resistir a boa parte da carga imposta ao revestimento, sendo, então, fundamentais ao desempenho do pavimento. Segundo Mendes (2011), os agregados em um concreto asfáltico cumprem o papel de esqueleto da mistura e as características que lhes conferem resistência são dureza, textura superficial, angularidade, forma e sua distribuição granulométrica.

Corroborando, Salgado (2005) explica que para produzir as misturas asfálticas a seleção dos materiais granulares deve ser feita pela identificação da graduação, da dureza, da aspereza da superfície, do tamanho, da sanidade, da afinidade ao CAP (adesividade) e da absorção de água pelas partículas.

Araújo (2007) relata que a ligação entre ligante/agregado pode ser afetada por fatores como a textura superficial do agregado, a presença de pó e, em menor extensão, o pH da água em contato com a interface. O autor complementa que é de senso comum que agregados mais rugosos apresentam maior adesão. Porém, necessita-se de um equilíbrio entre a molhabilidade do agregado (materiais mais lisos apresentam maior molhabilidade) e superfícies rugosas que seguram o betume mais fortemente uma vez molhado.

Um dos aspectos a ser observado nos agregados que recebe especial atenção segundo Hicks (1991), Kim et al. (1992) e Kennedy et al. (1983) é a absorção. Este fenômeno diminui a espessura da película do asfalto uma vez que o betume é absorvido pelo agregado, sendo desfavorável ao comportamento das misturas asfálticas, tornando-as vulneráveis ao intemperismo, às tensões e em especial à ação da água.

No estudo de Gouveia et al. (2004), verificou-se que diferentes taxas de absorção de asfalto pelo agregado podem ser resultado dos distintos modos de preparo de misturas asfálticas. Relata ainda que os maiores valores de módulo de resiliência ocorreram para misturas asfálticas cujos agregados apresentaram maiores taxas de absorção de asfalto. Considerando que a absorção reduz a espessura da película de asfalto tornando o comportamento da mistura asfáltica mais frágil e também mais sensível a reações oxidativas, ocorrendo então o aumento de rigidez.

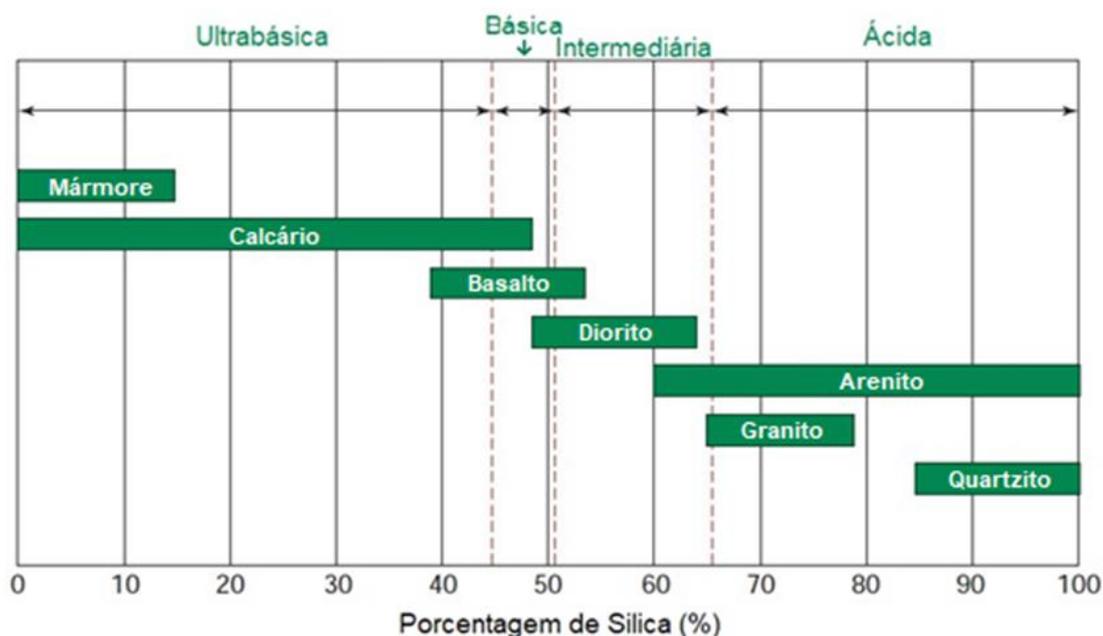
Dispondo-se dos valores de porosidade dos agregados, pode-se compreender a tendência de absorção desses materiais, sendo que, para maiores porosidades maior será a absorção do ligante. As ligações adesivas tornam-se mais resistentes à medida que se aumenta a área superficial disponível, isto ocorre quando o ligante, à uma viscosidade adequada, consegue fluir para dentro das irregularidades e poros dos agregados (TAYLOR e KHOSLA, 1983).

Neste sentido Boeira (2014) avaliou as propriedades de agregados minerais de sete britagens de diferentes formações geológicas utilizados em misturas asfálticas no RS. Todas as britagens amostradas, de acordo com os resultados encontrados, atendem os parâmetros normativos recomendados pelo DAER e DNIT. De maneira geral o autor ainda concluiu que os agregados de origem granítica/metamórfica apresentam aumento do teor de ligante quando comparados aos de origem vulcânica e que, conforme a área de exploração da rocha, ocorrem elevadas variações de absorção dos agregados com valores que vão de 0,45% até 2,77%.

Observa-se na Figura 2 que os agregados podem ser classificados, do ponto de vista químico, em quatro grupos em função do teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ): ultrabásicos, básicos, intermediários e ácidos. Agregados com alto teor de sílica, como os granitos, são chamados de hidrofílicos, pois apresentam grande afinidade com a água, e agregados com baixos teores de sílica, como os basaltos e os calcários, são chamados de hidrofóbicos (ANITELLI, 2013). O balanceamento de cargas elétricas

com os componentes do asfalto é prejudicado por teores mais altos de sílica, teores esses que tornam mais ácida a superfície do agregado, influenciando na qualidade da ligação adesiva (YOON e TARRER, 1988). Agregados ácidos possuem, normalmente, fraca interação química com ligantes e conseqüentemente má adesividade (LIBERATORI et al., 2006).

Figura 2 - Escala típica de teor de Sílica para rochas comuns



Fonte: Adaptado de Hunter, Self & Read (2015)

Segundo Araújo (2007), do ponto de vista químico, agregados silicosos, como quartzito e alguns granitos podem ser impróprios para o uso em uma mistura asfáltica, visto que pode ocorrer o descolamento da película do asfalto do agregado pela água. Já os agregados hidrofóbicos tais como o calcário, a dolomita e o basalto são usualmente resistentes ao descolamento da película de asfalto.

Podem ainda ser utilizados aditivos que melhoram a adesão do agregado ao ligante e, conseqüentemente, a resistência do agregado à água. Segundo Anitelli (2013) a função destes aditivos é: “modificar a composição química e elétrica da superfície do agregado ou do ligante asfáltico, e reduzir a tensão superficial entre o ligante asfáltico e o agregado, melhorando o recobrimento do ligante asfáltico na

superfície do agregado”. Um desses aditivos é a cal hidratada que é comumente utilizada por seu baixo custo e abundância em determinadas regiões.

A utilização da cal no estado do RS é frequente, ela busca atender à exigência do DNIT, que a partir de 2009 indicou para os projetos CREMA a incorporação de cal em misturas densas sem especificar a natureza mineral deste componente, também para melhorar as propriedades mecânicas e a adesividade (BOEIRA, 2014; FACCIN, 2018).

#### 2.1.2.2 *Ligantes asfálticos*

Conforme Bernucci et al. (2010), em nosso país o termo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é usado para designar o asfalto utilizado em pavimentação, sendo este um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo, o mesmo apresenta características de um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. Ademais, cabe ressaltar que, o CAP é semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas.

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo são substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, caracteriza-se por ser um material semi-sólido, de cor marrom escura a preta, impermeável à água, viscoelástico, pouco reativo, com propriedades adesivas, termoplásticas e inflamáveis. Segundo Balbo (2007), por ser um material termoplástico o CAP tem um comportamento reológico complexo e que depende diretamente da temperatura, esta que se altera com o intemperismo modificando as propriedades originais do ligante.

De acordo com Anitelli (2013) as características físicas dos ligantes asfálticos, como a viscosidade, são influenciadas pela variação da temperatura, este fato interfere diretamente na eficiência das operações de usinagem e compactação. Para que o ligante consiga escoar e recobrir com facilidade a superfície do agregado é preciso controlar a temperatura de usinagem da mistura, ou seja, fazer com o que o CAP atinja valores ideais de viscosidade.

Em seus estudos Monismith et al. (1985) recomendam o uso de ligantes menos suscetíveis as temperaturas mais altas para que a perda de rigidez não seja elevada. De forma análoga, Mahboub & Little (1998) observaram que asfaltos menos viscosos

tornam as misturas betuminosas menos rígidas e mais suscetíveis às deformações irreversíveis.

De mesma forma Airey & Brown (1998) destacam a importância da variável tempo de carregamento e temperatura na análise do desempenho de um ligante asfáltico, sendo estudada através de ensaios reológicos, quer dizer, qual a resposta interna dos materiais quando submetidos a diferentes forças externas.

O ligante asfáltico apresenta características aglutinantes que tem a função de unir as partículas dos agregados e as manter na posição adequada para transmitir os esforços aplicados pelas cargas atuantes às camadas inferiores. O CAP permite também obter uma flexibilidade controlável da mistura, é um material impermeabilizante e, quando em condições controladas, torna-se durável resistindo às ações do clima e da água.

A sensibilidade à ação da água do sistema granular-betume é influenciada pelas características físico-químicas dos seus componentes. As principais características identificadas no caso dos ligantes betuminosos são a composição química e a viscosidade (ALIMANI, 1987; MOMM, 1998; CASTAÑEDA, 2004).

Diretamente ligada aos fenômenos de absorção e adesão, a viscosidade do asfalto é influenciada pelas variações da temperatura, esta característica dos ligantes pode ser entendida como uma medida de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas em líquidos. O aumento do poder de molhagem ocorre quando em temperaturas mais altas as forças intermoleculares diminuem, permitindo desta forma que o asfalto cubra uma área maior da superfície do agregado. (MAZIDJADEH E BROVOLD, 1968).

No estudo de Taira et al. (2003), conclui-se, por meio do estudo de misturas asfálticas densas com ligantes convencionais e modificados com polímero, que a temperatura exerce grande influência nos valores de módulo de resiliência e também na interação com teor de ligante asfáltico da mistura.

O processo de envelhecimento em revestimentos asfálticos, segundo Anitelli (2013), dá-se em duas fases: em curto e em longo prazo. Durante o processo de usinagem ocorre o envelhecimento em curto prazo, a queima de componentes orgânicos do asfalto e perda de voláteis acontece devido à exposição a altas temperaturas. Em alguns casos é possível entender que este envelhecimento possa beneficiar a mistura, pois o asfalto ganha consistência e a mistura se torna mais rígida,

podendo aumentar sua resistência à deformação permanente e à ação da água. Já no caso de a mistura asfáltica ficar exposta a ação da luz, às condições climáticas locais ou reagir com oxigênio da atmosfera passa a ocorrer então o envelhecimento em longo prazo.

Quintana e Anselmi (2010) realizaram um estudo experimental para avaliar a influência do ligante asfáltico no fenômeno de *stripping* em misturas asfálticas devido somente ao efeito da água. Apesar do cimento asfáltico ser um material impermeável e de baixa interação química com agentes externos, a conclusão geral que os autores chegaram é de que o ligante em presença de água modifica sua consistência e aumenta sua rigidez. Isto evidencia que a interface ligante-agregado é afetada por esta mudança de consistência. O aumento da rigidez causa contração do ligante asfáltico sem haver modificação do volume, o que poderia ser uma das causas que geram a separação do ligante e do agregado.

A resistência ao deslocamento da película na presença de água é maior para asfaltos mais viscosos, como já evidenciado por Taylor & Khosla (1983) e Hicks (1991). Desta maneira, o que se espera é que, quando adicionado polímero ao ligante, haja um aumento da viscosidade do betume melhorando assim suas características originais, tais como rigidez e flexibilidade.

Foram constatadas, na pesquisa de Azevedo e Filho (2009), a redução da suscetibilidade térmica, a elevação do ponto de amolecimento, o aumento da resistência à deformação permanente, aumento na resistência ao desgaste e envelhecimento e melhora nas características adesivas e coesivas das misturas asfálticas modificadas com polímeros.

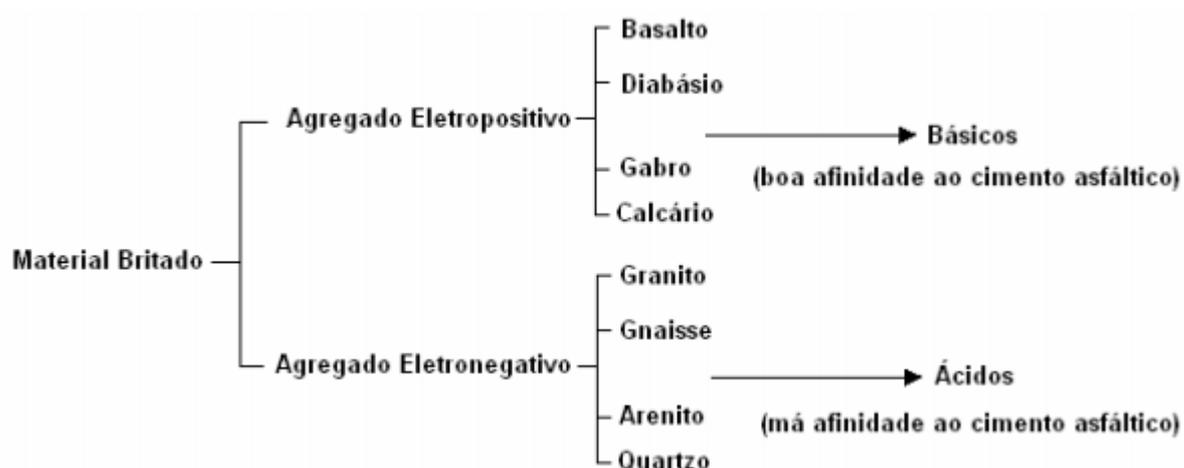
## 2.2 ADESIVIDADE E O EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA

Ao selecionar os materiais e dosar as misturas asfálticas é muito importante que seja feita a identificação da sensibilidade desta mistura à ação deletéria da água. Defeitos prematuros podem surgir no pavimento quando a seleção dos materiais é feita de forma inadequada ou ocorre falha na determinação da sensibilidade à umidade, elevando com isso os custos de manutenção e reabilitação da estrutura.

De acordo com Kanitpong e Bahia (2003), a adesividade pode ser usada para referir a quantidade de energia que é necessária para quebrar a ligação entre o

betume e o agregado, ou seja, é a propriedade que garante a união entre eles quando sob ação do tráfego e da água. Tal propriedade pode ser verificada tanto pelo ensaio de adesividade visual (DNER-ME 78/94, 1994), como pelo ensaio Lottman Test ou Lottman modificado AASHTO T 283-14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage* e pelo ensaio já normatizado no Brasil pela norma DNIT 180/2018 – ME - Determinação do dano por umidade induzida. Segundo Santana (1992), outro fator que afeta a afinidade (adesividade) do ligante ao agregado é a carga elétrica (Figura 3), inerente ao tipo da rocha matriz que dá origem aos granulares. Ou seja, a adesão é consequência da interação físico-química entre o ligante asfáltico e os minerais da superfície do agregado.

Figura 3 - Carga elétrica inerente ao tipo da rocha matriz



Fonte: Santana, 1992.

Anitelli (2013) explica um aspecto similar, onde a interação química entre agregado e asfalto pode ser melhorada ao passo que o agregado possua uma textura mais rugosa, tendo como reflexo uma maior adesão. Ainda segundo o mesmo autor, a ação da água pode modificar a adesão, que ocorre entre os dois materiais diferentes (agregado e asfalto) e também interferir na coesão que é uma característica da mistura asfáltica.

Diante do exposto, a ruptura coesiva é caracterizada pela ocorrência da ruptura do ligante. Já a ruptura da película adesiva, que pode ocorrer por presença de

umidade no agregado ou por falha no recobrimento deste, é caracterizada por ocorrer em um plano de ruptura, completo ou parcial, na ligação entre o agregado e o asfalto. De acordo com Anitelli (2013), a coesão e a adesão estão estreitamente ligadas ao desempenho do revestimento asfáltico na vida de serviço. A difusão de água no cimento asfáltico, devido a umidade presente na mistura asfáltica, pode causar perda de coesão, o que induz ao descolamento do ligante asfáltico do agregado e leva à queda nos valores de rigidez.

Hicks (1991) sumarizou e classificou os fatores que influenciam a adesividade ou o dano induzido pela umidade, os mesmos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores que interferem nas características de adesividade

<b>Fator</b>	<b>Característica Desejável</b>
<b>1. Agregados</b>	
a) textura	Áspero
b) porosidade	depende do tamanho do poro
c) mineralogia	agregados básicos são mais resistentes
d) cobertura do agregado por pó	Limpo
e) umidade superficial	Seco
f) composição química superficial	capaz de formar pontes de hidrogênio
g) fíler mineral	aumenta a viscosidade do ligante
<b>2. Cimento Asfáltico</b>	
a) viscosidade	Alta
b) química	nitrogênio e fenóis
c) espessura do filme	Alta
<b>3. Tipo de mistura</b>	
a) vazios	muito baixo ou muito alto
b) granulometria	muito aberta ou muito densa
c) teor de ligante	Alto
<b>4. Condições Climáticas</b>	
a) temperatura	Quente
b) precipitações durante a construção	Nenhuma
c) precipitações após construção	Mínima
d) ciclos de gelo/degelo	Mínimo
<b>5. Tráfego</b>	
a) volume de tráfego	baixo tráfego

Fonte: Adaptado de Hicks, 1991.

Segundo Mallick et al. (2003), pode-se diferenciar duas etapas no processo de adesão do sistema granular-betume, sendo elas denominadas adesividade ativa e passiva. A primeira ocorre ainda no processo de mistura quando o agregado molha e cobre a superfície do granular formando uma película. Já a segunda, que tem um papel preponderante na duração da vida útil do material, diz respeito à resistência ao descolamento da película formada na etapa ativa e que agora sofre interferência em sua interface granular-betume pela presença de água associada às cargas de tráfego.

Como observa Neves Filho (2007), na literatura internacional é comum se encontrar termos como *moisture sensitivity* (sensibilidade à umidade), *moisture damage* (dano devido à umidade) e *stripping* (descolamento do ligante da superfície do agregado em presença de água) em textos ligados à adesividade em misturas asfálticas. Fica evidente em toda literatura consultada que o desempenho de um revestimento betuminoso, no que se refere à adesividade, é diretamente afetado pela presença e ação da água.

A água pode entrar na estrutura do pavimento de diversas maneiras: pela falta de secagem dos agregados, por fissuras no revestimento, por um sistema ineficiente de drenagem e por capilaridade devido a presença de águas subterrâneas. Para prevenir a ocorrência de “*stripping*”, deve-se: evitar agregados pétreos recém triturados devido à demora na reorientação de suas moléculas, aquecer o agregado nas usinas de misturas asfálticas para remover o filme de água, eliminar pó e argila sobre a superfície do material e evitar colocar as misturas sobre camadas granulares úmidas.

De acordo com Araújo (2007) é pequeno o risco de haver “*stripping*” em misturas com baixo índice de vazios. Materiais permeáveis à água tem maior possibilidade de estarem submetidos à ocorrência de “*stripping*”, mesmo àqueles relativamente mais densos, o que pode levar a uma queda na coesão interna e possível desintegração da superfície. A afinidade entre o agregado e o betume são fatores determinantes no risco de ocorrência do descolamento e na habilidade da mistura em resistir ao efeito desagregador da água.

Não há uma molhagem completa da superfície de um sólido quando se derrama um líquido, como explica Kinloch (1990), o que ocorre é uma conformação sobre a estrutura em que ele atua até que atinja um estado de equilíbrio sobre a superfície. Em função das tensões de superfície dos materiais existentes, em 1805, Young

descreve este estado de equilíbrio e o caracterizado pelo ângulo de contato líquido-sólido, conforme demonstra a Equação 1 e pode ser observado na Figura 4.

$$\gamma_{LG} - \gamma_{GA} + \gamma_{LA} \cdot \cos \theta = 0 \quad (1)$$

onde:

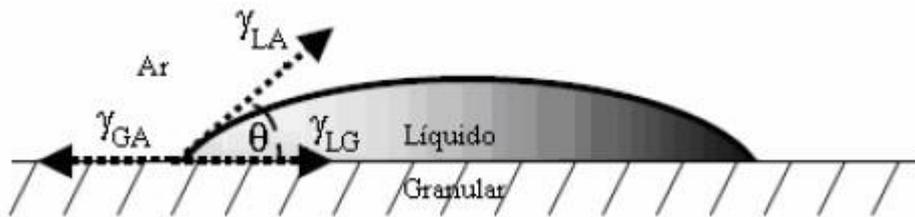
$\gamma_{LG}$  = tensão interfacial líquido-granular;

$\gamma_{GA}$  = tensão superficial do granular;

$\gamma_{LA}$  = tensão superficial do líquido;

$\theta$  = ângulo formado entre os vetores da  $\gamma_{LG}$  e  $\gamma_{LA}$ .

Figura 4 - Molhagem de um sólido por um líquido



Fonte: Castañeda, 2004 *apud* BARRA, 2009

A tensão interfacial é, de acordo com Castañeda (2004) *apud* Barra (2009), a força resultante do equilíbrio de dois corpos existentes e que geram interface e a tensão superficial é o conjunto de forças moleculares que permite ao líquido ou ao sólido conservar seu estado (coesão). A tensão superficial determina a força de adesão. Um ângulo de  $0^\circ$  se forma quando o líquido molha completamente a superfície do sólido. Quando o ângulo de contato é superior a  $90^\circ$ , o líquido não molha o sólido. A molhagem se produz quando existem fracas tensões de superfície no sólido e no líquido ( $\gamma_{GA}$  e  $\gamma_{LA}$ ) e uma tensão interfacial ( $\gamma_{LG}$ ) relativamente elevada. (Figura 5).

Figura 5 - Estágio de molhagem de um sólido por um líquido



Fonte: Castañeda, 2004 apud BARRA, 2009

### 2.2.1 Mecanismos de ruptura da adesão

Existem, no mínimo, cinco mecanismos diferentes que podem agir individualmente ou em conjunto e que levam ao dano por umidade: deslocamento, desprendimento, emulsificação espontânea, ação da pressão neutra e lavagem hidráulica (Kiggundu e Roberts, 1988; Tarrer e Wagh, 1991; Moura, 2001; Johnson e Freeman, 2002; Solaimanian et al., 2003; Zaniewski e Viswanathan, 2006; Arambula, 2007). Furlan (2006) explica sucintamente cada um deles:

- Deslocamento: a água desloca a película de asfalto da superfície do agregado;
- Desprendimento: a umidade do agregado antes da mistura separa-o do asfalto;
- Emulsificação espontânea: a água é incorporada pelo asfalto e emulsifica-o;
- Pressão neutra: a água aprisionada nos vazios da mistura saturada, aliada às cargas do tráfego, percola sob pressão, descolando a película de asfalto;
- Lavagem hidráulica: em condições úmidas as repetições do tráfego pesado proporcionam ciclos de compressão, que expõem o ar dos vazios da mistura, e relaxação, que absorve água pela criação de um vácuo parcial.

### 2.2.2 Dano por umidade induzida

O termo umidade induzida diz respeito a qualquer técnica utilizada para causar dano acelerado por umidade em amostras de misturas asfálticas. De acordo com Epps et al. (2000), no que diz respeito ao efeito deletério da água nas misturas asfálticas, tem sido difícil associar os resultados de ensaios de laboratório com o desempenho das misturas em campo. Segundo os autores Airey (2008) e Mehrara (2013), o estado da arte, apesar do alto número de pesquisas realizadas na área, evidencia que o

fenômeno de dano por umidade e as causas que o geram ainda não foram totalmente identificadas e entendidas.

De acordo com Anitelli (2013) a análise da suscetibilidade ao dano por umidade aponta se a mistura pode apresentar problemas de descolamento devido à ação da água em algum tempo. Tal análise consiste na avaliação laboratorial do comportamento da mistura asfáltica compactada frente a ensaios combinados que simulam: envelhecimento em curto ou em longo prazo da mistura asfáltica, saturação parcial de vazios da mistura por meio de vácuo, esforço de arrancamento da película de asfalto a partir de ciclos térmicos; e, a verificação da mudança do comportamento mecânico da mistura, que normalmente, nos ensaios normatizados, privilegiam a avaliação de propriedades de tração direta ou indireta.

Diante do exposto e tendo como exemplo, Lee (2011) relata que ligantes mais viscosos são menos propensos ao dano por umidade e também afirma que adições de cal melhoram a resitência à esse mecanismo de dano. Para tentar entender com maior clareza o fenômeno, alguns pesquisadores, como Das e Kringos (2015), propõe que o dano por umidade seja associado a um modelo de envelhecimento de misturas asfálticas ou também, como sugere Tarefder (2015), um modelo que leve em conta a passagem de ar e água no interior das misturas asfálticas.

Já para Rondón (2015), o dano por umidade deve ser associado a modelos onde seja levado em conta a influência da água junto a outros elementos que representem as ações naturais, como por exemplo o ar, a temperatura, os raios ultravioletas, entre outros, para que assim se possa avaliar a influência de cada um deles, do ponto de vista mecânico e químico, de maneira separada sobre o ligante e a mistura.

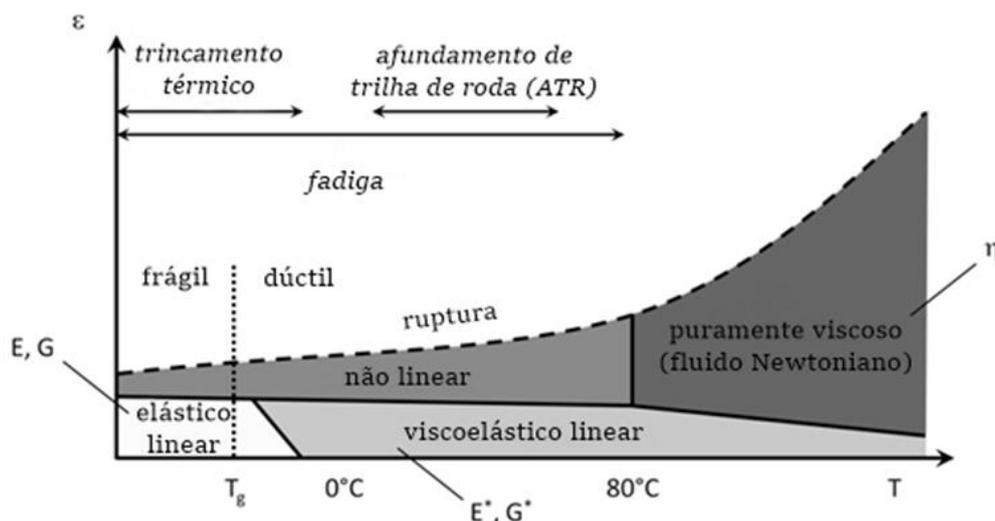
De acordo com Diab (2013), a conclusão geral à que se chega ao estudar as distintas metodologias de ensaio, é a de que estes experimentos tem como limitação principal o fato de ainda não serem capazes de simular por completo e com exatidão o mecanismo de dano por umidade nas misturas asfálticas. Para compreender tal mecanismo de dano se faz necessário seguir decompondo as variáveis que influenciam na sua ocorrência.

## 2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O comportamento mecânico das misturas asfálticas está sujeito a uma gama de fatores externos e as suas propriedades intrínsecas, o que o torna extremamente complexo. Mangiafico (2014) demonstra em seus estudos que o concreto asfáltico, em um nível macroscópico, é um material contínuo, homogêneo e isotrópico, e que temperatura, amplitude das deformações, e ao número de ciclos de carga solicitados são fatores que influenciam em seu comportamento.

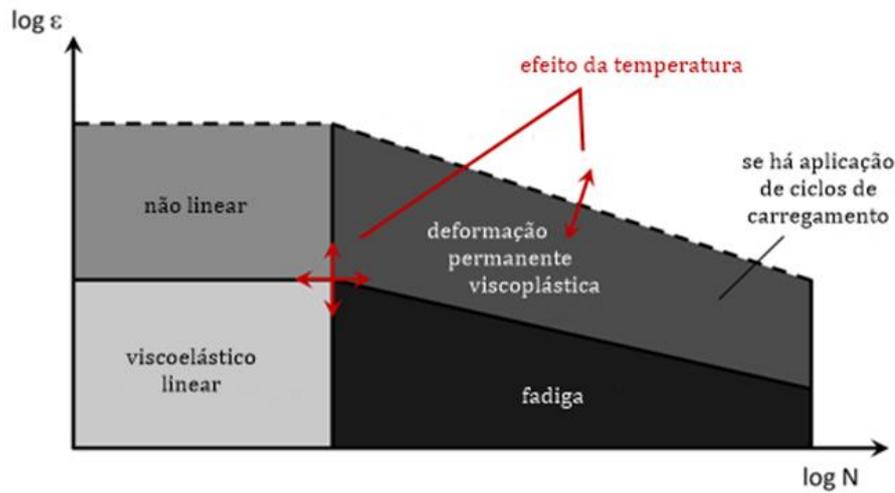
Olard (2005) relata que o comportamento mecânico de uma mistura pode assumir diferentes domínios, de acordo com os valores assumidos para cada um destes fatores. A Figura 6 demonstra o comportamento para diferentes intervalos de deformação ( $\epsilon$ ) e temperatura (T), já a Figura 7 constata os diferentes domínios de comportamento para relações de deformação ( $\epsilon$ ) e número de ciclos (N) para materiais asfálticos.

Figura 6- Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura



Fonte: Mangiafico (2014).

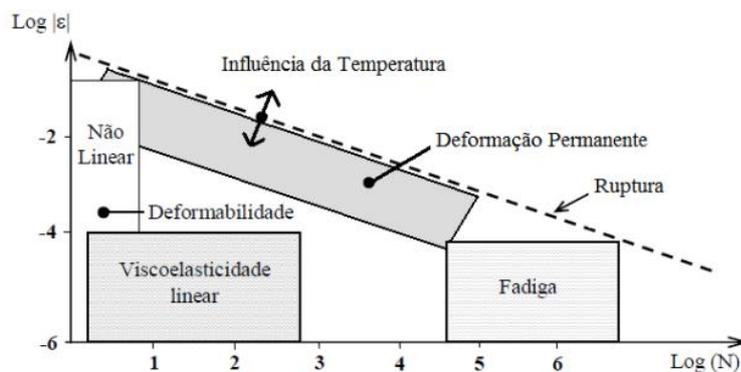
Figura 7 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos



Fonte: Mangiafico (2014).

Na Figura 8 Di Benedetto e Corté (2005) apresentam os distintos tipos de comportamento das misturas asfálticas de acordo com a deformação e a quantidade de ciclo de carga. Conforme os autores, dentro dos comportamentos extremos entre viscoso e elástico, e nos limites de temperatura em que o revestimento asfáltico é exposto, para um número limitado de ciclos e um domínio de pequenas deformações ( $\epsilon < 100 \mu\text{m/m}$ ) a mistura asfáltica apresenta um comportamento viscoelástico linear, sem apresentar algum tipo de dano.

Figura 8 - Limites de deformação conforme o comportamento das misturas asfálticas para temperatura fixa



Fonte: Adaptado de Di Benedetto et al. (2013)

Da mesma maneira que os autores anteriormente citados, Renaud (1996) corrobora afirmando que o revestimento asfáltico herda as propriedades viscoelásticas contidas no ligante, o qual é um material viscoelástico termosuscetível. Assim, quando são aplicadas cargas com maiores velocidades, apresenta um comportamento quase elástico, já, quando as cargas aplicadas apresentam velocidades reduzidas, apresenta um comportamento predominantemente viscoso.

Em outras palavras, os concretos asfálticos apresentam comportamento próximo do viscoso quando a carga é aplicada por um longo período, baixas frequências e tempo de duração alto; por outro lado apresentam comportamento próximo ao elástico quando submetidos a uma aplicação rápida de carga, altas frequências e tempo de duração pequeno. Tudo isso ratifica os conceitos explicados por Balbo (2007), de que os concretos asfálticos herdam o comportamento viscoelástico dos ligantes, ou seja, são susceptíveis a variação de temperatura e frequência de aplicação da carga.

Sobre isso ainda, Bock (2012) explica que devido ao seu comportamento viscoelástico, as misturas asfálticas têm suas propriedades mecânicas vinculadas ao tempo de carregamento e variações na temperatura, por consequência, o módulo é dependente também destas duas variáveis. Por reger a distribuição de tensões dentro de cada camada do pavimento o módulo é de grande relevância quando se desenvolve o projeto.

De acordo com Furlan (2006) para avaliar os danos por umidade em misturas asfálticas os ensaios utilizados recentemente, que envolvem propriedades mecânicas, costumam realizar alguma modificação no valor de tal propriedade tomada como referência. Buscando simular às condições de campo as misturas têm sido submetidas a algum tipo de condicionamento de tráfego e/ou ambiental, para então serem comparadas com misturas não-condicionadas. A saturação parcial, os ciclos de congelamento e descongelamento, a exposição a diferentes temperaturas e o envelhecimento constituem uma rotina de simulação do meio ao qual da mistura asfáltica é exposta ao longo do tempo. Tais simulações tem como resultado alterações nas propriedades das misturas asfálticas, que são então avaliados por um ensaio de propriedade mecânica. As comparações são então apresentadas em forma de porcentagem da perda da propriedade, pois geralmente os resultados obtidos nas amostras sem condicionamento são maiores.

A análise de parâmetros de rigidez e danificação é relevante visto que elas afetam diretamente o comportamento das misturas quando submetidas a variações de temperatura, níveis de deformações e taxas de carregamento. Acoplado aos parâmetros de rigidez e danificação temos o efeito da umidade que também influencia no comportamento das misturas e conseqüentemente na estrutura do pavimento. Todos estes aspectos estão diretamente associados e afetam as propriedades viscoelásticas das misturas, objeto de estudo desta pesquisa.

### **2.3.1 Rigidez**

De acordo com Kim (2009), a rigidez é uma propriedade afetada por distintos fatores, tais como: temperatura, a taxa de deformação, estado de tensão, o tipo de ligante, as partículas dos agregados, a idade da mistura asfáltica, os vazios na mistura, a água em forma líquida ou vapor e sua localização na mistura, os finos no mástique, entre outros. Medina e Motta (2015) definem a rigidez das misturas betuminosas como a capacidade de resistir à deformações e é representada graficamente pela inclinação da curva na relação tensão-deformação.

Dois tipos de ensaio podem ser utilizados para verificar o parâmetro de rigidez de uma mistura asfáltica, são eles: o módulo de resiliência e o módulo complexo ( $E^*$ ). Segundo Almeida Júnior (2016) e Boeira (2016), para análise de rigidez de misturas asfálticas em projetos de rodovias no Brasil é empregado apenas o ensaio de módulo de resiliência. Já o ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo é tendência nos países desenvolvidos, mas, no cenário brasileiro, ainda se encontra restringido ao ambiente acadêmico. Por fazer parte da metodologia deste estudo, optou-se por restringir a revisão bibliográfica ao estudo do módulo complexo.

Costuma-se entender o módulo complexo como um ensaio que apresenta resultados mais próximos das reais propriedades do material. A importância de se considerar a influência da temperatura e de diferentes frequências de carregamento faz com que o módulo complexo venha a ser o principal ensaio para a melhor compreensão acerca da rigidez das misturas asfálticas.

Por ser vulnerável aos danos causados pela umidade um concreto asfáltico pode vir a ser afetado por algum dos principais mecanismos de degradação, como: a deformação permanente, o trincamento térmico, a fadiga e o desgaste excessivo.

Bock (2012) explica que a presença de umidade pode causar danos que se manifestam através da redução na resistência ou rigidez da mistura.

Furlan (2006) relata que não é frequente considerar ruim para o comportamento das misturas asfálticas algum ganho de rigidez, visto que tal característica é desejável quando se quer combater as deformações permanentes. Em compensação este ganho de rigidez pode resultar na tendência de ocorrer dano por fadiga.

Bock (2012) complementa que tal incompatibilidade nestes aumentos e diminuições de rigidez e resistência são prejudiciais, uma vez que, por exemplo, misturas asfálticas mais rígidas e sem aumento da resistência acabam por gerar na mistura um comportamento frágil e conseqüentemente mais suscetível ao trincamento, diminuindo assim vida útil da estrutura.

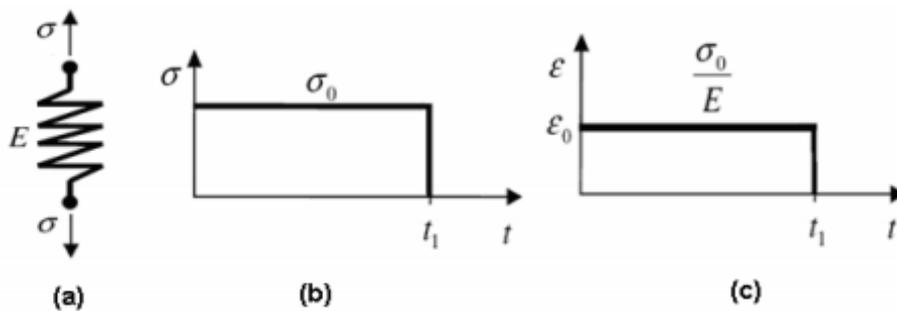
Os métodos de dimensionamento de pavimentos, segundo Balbo (2007), foram entendidos de duas maneiras diferentes: modelos empíricos com base no desempenho observado ao longo do tempo ou dos últimos resultados obtidos na experiência em campo, ou a partir da teoria elástica (modelos semiempíricos e empírico-mecanicistas) considerada mais apropriada para interpretação de fenômenos físicos quantificados em campo. Desta forma, para utilização do procedimento mecanístico, é possível levar em consideração um simples modelo de comportamento elástico do material, onde não haja variação do valor modular com temperatura, como também um modelo visco-elasto-plástico dos materiais asfálticos, com variação horária de suas propriedades, em função das condições climáticas locais.

Melo (2014) explica ainda que a teoria da elasticidade fornece à análise mecânica uma equação com parâmetros materiais determinados de forma simples e independentes do tempo, sendo regida pela lei de Hooke e com resultados satisfatórios apenas em um domínio limitado de aplicações. Por não ser capaz de interpretar precisamente fenômenos presentes em uma variedade de materiais em determinadas temperaturas, a lei de Hooke acaba por servir apenas para avaliar de forma introdutória alguns fenômenos. Apresenta-se então como uma teoria mais completa, a viscoelasticidade, que representa, além dos fenômenos modelados pela elasticidade, uma relação no tempo entre o histórico de tensões e deformações dos corpos deformáveis, tal característica confere a eles o título de materiais com memória.

### 2.3.1.1 Abordagem elástica

Materiais elásticos apresentam deformação reversível, o que quer dizer que conservam sua energia interna quando cessado o carregamento retornando a sua forma original. Esses materiais podem ser representados por uma mola, conforme Figura 9 (a). Aplicando-se uma tensão constante, Figura 9 (b), o corpo apresenta comportamento elástico linear, caso se observe uma deformação constante e proporcional à tensão aplicada, Figura 9 (c), obedecendo, assim, a Lei de Hooke, uma vez que a constante de proporcionalidade  $E$  é uma característica intrínseca do material, conhecida como módulo de elasticidade.

Figura 9 - Comportamento elástico linear



Fonte: Santos (2008).

Para os materiais elásticos, a relação tensão deformação pode ser descrita usando a lei de Hooke (Equação 2), isto é, tensão e deformação são linearmente proporcionais e o material é afetado apenas pela tensão ou deformação imposta no momento atual.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

Onde  $\epsilon$  e  $\sigma$  são respectivamente as deformações e tensões uniaxiais, e  $E$  o módulo de elasticidade.

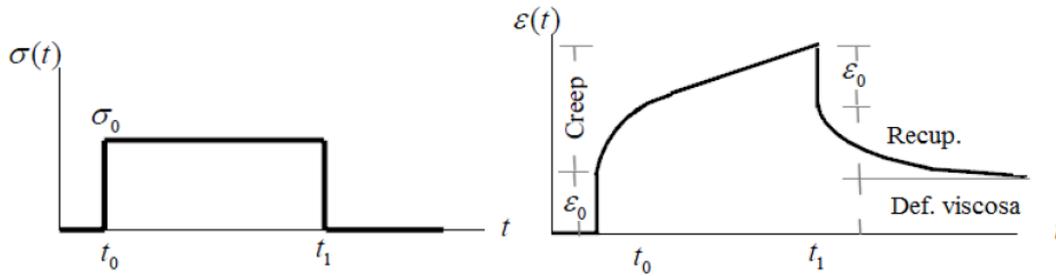
Como explica Bernucci et al. (2010) o ensaio de Módulo de Resiliência (MR), utilizado para determinar a rigidez das misturas asfálticas, leva em consideração o comportamento elástico linear das mesmas quando os deslocamentos em análise são recuperáveis (resilientes), obedecendo a lei de Hooke. Por ter associado ao seu cálculo um dado pulso de carregamento onde ocorrem deformações viscoelásticas parcialmente contabilizadas como deformação elástica, o MR acaba por não representar um parâmetro puramente elástico das misturas asfálticas.

### *2.3.1.2 Abordagem viscoelástica*

Visando alcançar um melhor entendimento das propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas vislumbrando o espectro contínuo das características de rigidez gerado pelo ensaio de módulo complexo, através da variação dentro de um intervalo pré-determinado, de temperaturas habituais e de frequências, usuais e extrapoladas, buscou-se estudar a viscoelasticidade linear.

Segundo Woldekidan (2011), materiais que possuem tanto características elásticas como viscosas são chamados de materiais viscoelásticos e, portanto, têm seu comportamento de deformação dependente do tempo que se manifesta através da fluência e relaxação. Quando é aplicado sobre um material viscoelástico uma tensão constante, o mesmo responde com uma deformação instantânea, que é logo seguida de um aumento de deformação (creep). Quando o carregamento é removido ocorre o processo inverso, há uma recuperação instantânea seguida por recuperação da deformação com o tempo. Quando o carregamento é retirado a deformação viscosa do material acaba por resultar em uma deformação irreversível, como se por observar na Figura 10.

Figura 10 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada



Fonte: Woldekidan (2011).

Os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico linear quando submetidos a pequenas deformações. A linearidade ocorre quando se desconsideram os efeitos do tempo e então a relação tensão-deformação dos materiais proporcional (BAHIA et al., 1999).

Conforme Huang (1967) para pequenas deformações as misturas asfálticas apresentam comportamento viscoelástico linear, observação essa recorrente na literatura. Nesse sentido, novas pesquisas no país, seguindo a tendência de outros países, têm buscado obter a rigidez do concreto asfáltico pelo ensaio de Módulo Complexo, que melhor representa o comportamento viscoelástico linear na camada asfáltica, que diferentemente da teoria da elasticidade, têm aproximado o pesquisador do real comportamento das misturas asfálticas em campo.

De acordo com Fritzen (2016, p. 80) o Módulo Complexo ( $E^*$ ) é definido como um número complexo que relaciona tensões e deformações para materiais viscoelásticos sujeitos a um carregamento senoidal. Segundo Medina e Motta (2015) a parte real deste número complexo representa a componente elástica e a imaginária representa a componente viscosa.

Christensen (1982) destaca que, devido à importância de se considerar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento no comportamento de revestimentos asfálticos, o módulo complexo vem sendo estudado como uma alternativa ao módulo de resiliência na caracterização de misturas asfálticas. Dessa forma, é possível determinar as características elásticas e propriedades viscoelásticas lineares do material.

O ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo é realizado em diferentes condições de frequência e de temperatura, buscando

compreender o comportamento viscoelástico do material. O ensaio para a determinação do módulo complexo ( $E^*$ ) segue as prescrições da AASHTO T 342 – 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hotmix Asphalt Concrete Mixtures*, onde são utilizadas amostras com as seguintes dimensões de tamanho do corpo de prova: diâmetro entre 100 e 104 mm, altura entre 147,5 e 152,5 mm e tamanho máximo nominal de 37,5 mm, moldados no compactador giratório, ensaiados e condicionados na prensa hidráulica. O módulo complexo é determinado após aplicação de carga nas frequências de 25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01Hz, e nas temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C.

Os ligantes asfálticos, de maneira geral, são materiais termo-reologicamente simples (ANDERSON et al., 1992), o que permite assumir que o princípio de superposição tempo-temperatura é válido (STASTNA et al., 1994; ZANZOTTO et al., 1996). Conforme Di Benedetto & Corté (2005) materiais nos quais se podem utilizar os princípios de superposição tempo-temperatura são conhecidos como 'termoreológicos simples', assim para ensaios realizados em intervalos limitados de frequência e temperatura é possível expandir os resultados para domínios inacessíveis em laboratório.

O princípio de superposição tempo-temperatura (PSTT) usa a equivalência entre frequência e temperatura, para o comportamento viscoelástico linear de ligantes asfálticos, sobre a propriedade reológica, ou seja, pode-se afirmar que o efeito na redução da frequência nas propriedades mecânicas do material é equivalente ao aumento da temperatura. (COSME, 2015, p. 46)

O ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo é, de acordo com Di Benedetto & Corté (2005), um ensaio homogêneo, que não requer nenhuma solução estrutural, não demandando assim nenhuma hipótese complementar, de modo que apresenta resultados mais similares a real propriedade dos materiais testados.

A determinação do módulo complexo é uma boa forma de caracterização da viscoelasticidade do material. Atualmente, esse tipo de módulo de elasticidade é exigido para a caracterização de alguns materiais para finalidade de projeto (AASHTO, 2002).

O valor do módulo complexo varia em função dos parâmetros de ensaio, temperatura e velocidade de carregamento, e os parâmetros da formulação do

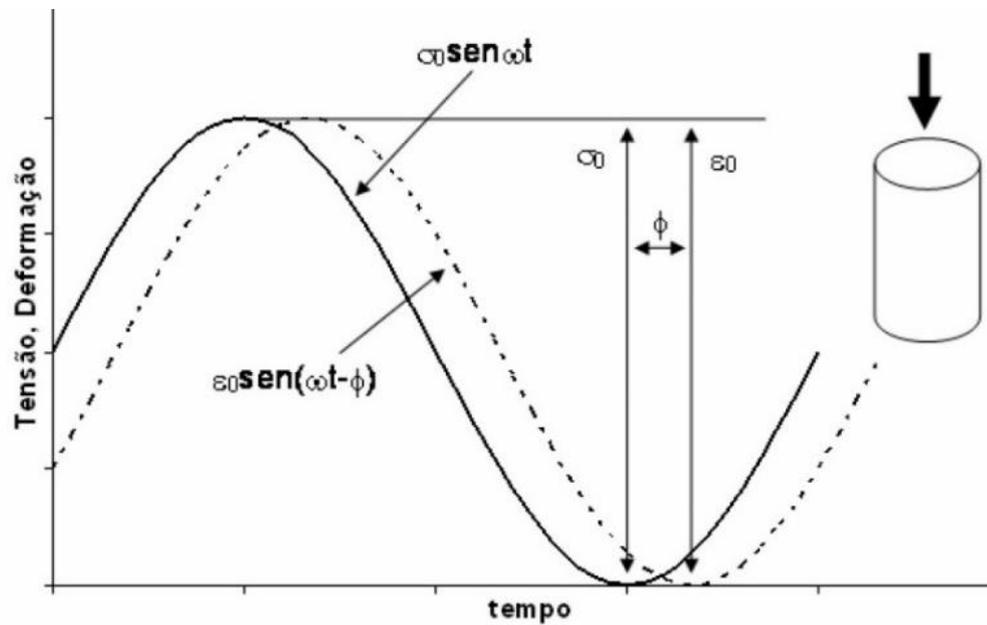
material betuminoso, natureza e teor do ligante, porcentual granular e de finos e a forma de compactação.

No ensaio de módulo complexo é aplicada a um corpo cilíndrico, esteja ele confinado ou não, uma carga uniaxial compressiva senoidal. Conforme Nascimento (2008) a relação tensão-deformação durante o carregamento senoidal contínuo é definida por um número complexo chamado de Módulo Complexo ( $E^*$ ) e o seu valor absoluto  $|E^*|$  é definido como módulo dinâmico. Se os níveis de deslocamentos medidos ficarem no domínio das pequenas deformações, espera-se um comportamento viscoelástico linear da mistura asfáltica.

Além do módulo complexo, pode-se inferir também sobre outro valor, conhecido por ângulo de fase ( $\varphi$ ), este parâmetro está diretamente ligado as parcelas viscoelásticas solicitadas, e pode ser verificado através da defasagem entre o pico de tensão e o pico de deformação. Segundo Balbo (2007) supondo um material puramente viscoso a tensão e deformação ficariam defasadas e o ângulo de fase igual a  $90^\circ$ , já um material elástico ideal apresenta a tensão e a deformação correspondentes em fase, ou seja, com ângulo de fase nulo. Materiais de pavimentação, em geral, apresentam comportamento intermediário, ou seja, alguma defasagem que não chega a  $90^\circ$ .

O ângulo de fase está diretamente ligado as parcelas viscoelásticas solicitadas, e pode ser verificado através da defasagem entre o pico de tensão e o pico de deformação, conforme Figura 11. Para um material puramente elástico  $\varphi = 0^\circ$ , e a amostra não desenvolve atraso entre as ondas de tensão e deformação. Já para materiais puramente viscosos  $\varphi = 90^\circ$ , e a defasagem entre as duas ondas seria de pelo menos um período completo, não havendo a completa recuperação da deformação do material no momento da aplicação da carga subsequente. Materiais viscoelásticos apresentam ângulo de fase  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ .

Figura 11 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação do pulso de carregamento no ensaio de módulo complexo



Fonte: Nascimento, (2008).

No que diz respeito ao ensaio, ao aplicar um carregamento contínuo senoidal com função de onda *haversine* de maneira a causar compressão axial ao corpo de prova, desenvolve-se um plano no qual se tem as variações de tensão e de deformação sofridas pela amostra. Matematicamente o valor de ( $E^*$ ) pode ser encontrado através da relação entre o valor do pico de amplitude de tensão e o valor do pico de amplitude da deformação.

O módulo complexo é definido matematicamente pela equação:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\epsilon^*(t)} \quad (3)$$

Onde seu valor absoluto é dado pela expressão:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (4)$$

O ângulo de fase pode ser obtido através da seguinte relação expressa na equação:

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (5)$$

Onde:

$t_i$  = fração de tempo entre os picos de tensão e deformação;

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga.

Como  $E^*$  é um número complexo, sua parte real e sua parte imaginária podem ser isoladas, respectivamente como  $E_1$  e  $E_2$ , como segue na equação:

$$E^* = E_1 + E_2 = |E^*| \cos\phi + i|E^*| \sin\phi \quad (6)$$

Conforme Renaud (1996), os diferentes componentes do módulo complexo variam de acordo com a temperatura e a frequência de sollicitação, fixadas para cada teste elementar. Os dados obtidos através do ensaio de módulo complexo podem ser apresentados em diferentes tipos de gráficos, sendo os principais deles: o plano Cole-Cole, o diagrama de Black, isócronas, isotermas e as curvas mestras.

A representação do plano cole-cole, formado pela parte real  $E_1$  do módulo complexo no eixo das abscissas em função da parte imaginária  $E_2$  no eixo das ordenadas, exprime a curva característica do material estudado. Através desta é possível calibrar um modelo de comportamento reológico, no entanto, não muito preciso para valores de módulo baixos. Seu uso é indicado para analisar o comportamento do material asfáltico para baixas temperaturas e/ou altas frequências.

Para a realização da calibração com valores baixos de módulo, é utilizada a representação do espaço Black. No diagrama de Black apresenta-se a plotagem da relação do valor absoluto do módulo complexo  $|E^*|$  em escala logarítmica pelo ângulo de fase ( $\phi$ ) plotado em escala aritmética. O diagrama de Black é indicado para o estudo do comportamento do material para altas temperaturas e/ou baixas frequências.

Para cada temperatura de ensaio é obtida também uma isoterma na qual estão associadas todas as frequências ensaiadas nesta temperatura. Com as curvas isotérmicas, é possível estimar a susceptibilidade à temperatura do asfalto, através da variação do módulo em função da variação da temperatura. De maneira análoga, para dada frequência se obtém uma isócrona, na qual se associam todas as temperaturas ensaiadas para esta frequência específica.

As curvas mestras permitem que comparações sejam feitas para uma mesma faixa de frequências ou temperaturas, facilitando a leitura dos dados devido a seu formato contínuo e suave. As curvas mestras então podem ser construídas através do

princípio de superposição tempo-temperatura, partindo da constatação da unicidade das curvas do plano Cole-Cole e do diagrama de Black.

As curvas mestras são utilizadas para avaliar uma propriedade reológica, como, por exemplo, o ângulo de fase ( $\varphi$ ), elas permitem que sejam feitas comparações para uma mesma faixa de frequências ou temperaturas, facilitando a leitura dos dados devido ao seu formato contínuo e suave.

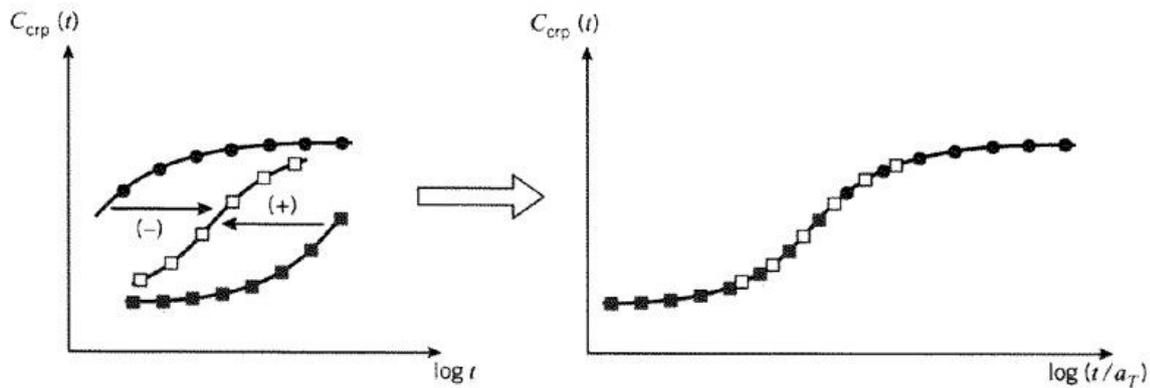
Curvas mestras descrevem o comportamento reológico dos materiais para uma única temperatura em função da frequência/tempo de aplicação do carregamento. Esta temperatura única é denominada temperatura de referência, em uma ampla faixa de frequências ou tempos de carregamento. Segundo Klompen e Govaert (1999), pode-se fazer uso do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT), o PSTT afirma que dados de viscoelasticidade obtidos para diferentes temperaturas podem ser superpostos em uma curva mestra. Isto é feito através de deslocamentos horizontais ao longo do eixo logarítmico da frequência ou do tempo.

Existe um grupo entre os polímeros amorfos, que satisfazem as relações de viscoelasticidade linear a uma temperatura uniforme, que com a variação de temperatura desenvolvem uma propriedade particular. Pagliosa (2004) explica que em diferentes condições de temperatura uniforme, o módulo de relaxação assim como o módulo de fluência são funções que não mudam de forma, sofrendo apenas translação no eixo do tempo, isso leva a uma relação de equivalência entre tempo e temperatura. Materiais que exibem esta propriedade são denominados termoreologicamente simples, tal propriedade é usada para estender a escala de tempo dos dados experimentais, sendo a base do princípio da superposição tempo-temperatura.

Lançando mão do PSTT para a construção da curva-mestra, realiza-se uma varredura de dados da função reológica, obtidos em ensaios dinâmicos, em função de diferentes temperaturas e faixas curtas de frequência. Os dados de ensaios realizados em todas as outras temperaturas são deslocados horizontalmente em relação ao tempo até que as curvas se fundam à uma temperatura de referência que deve ser selecionada e fixada inicialmente, conforme ilustra a Figura 12, compondo uma função suavizada do comportamento reológico do material ao longo de uma faixa extensa de frequências de carregamento. De acordo com Witczak (2002) a quantidade de

deslocamento em cada temperatura, necessária para formar a curva mestra, descreve a dependência da temperatura do material.

Figura 12 - Princípio de superposição tempo – temperatura



Fonte: Roylance (2001)

Otto (2009) também explica a curva mestra como a união de curvas através de pontos com mesmo valor de módulo do material, para uma temperatura de referência, escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até a superposição de pontos de mesma ordenada.

Cosme (2015) explica que o comportamento termo-reológico viscoelástico linear pode ser determinado através das curvas mestras. Toda a faixa de serviço do material é englobada pela curva mestra a partir do ponto em que é possível interpretar que frequências elevadas representam baixas temperaturas e velocidades altas, já as baixas frequências representam o comportamento à altas temperaturas e baixas velocidades de carregamento. Para Almeida Júnior (2016), a curva mestra é um importante instrumento de caracterização da rigidez da mistura para dimensionamento de pavimentos.

### 2.3.1.3 Análogos Mecânicos

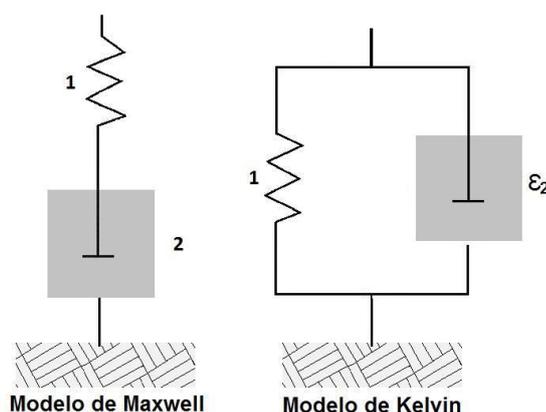
De acordo com Pagliosa (2004), modelos reológicos para o comportamento viscoelástico linear tradicionalmente são deriváveis de arranjos de molas (elásticos) e amortecedores (viscosos), o que resulta em relações constitutivas tensão-deformação

em forma de operadores diferenciais. Estes elementos, molas e amortecedores, quando combinados podem formar um modelo de material com propriedades viscoelásticas.

Como descreve Balbo (2007), existem duas componentes que podem ser utilizadas para representar as deformações elásticas e viscoelásticas em um material, sendo elas: uma deformação elástica imediata e recuperável e uma subsequente deformação viscoelástica dependente do tempo, que dependendo da carga imposta pode atingir uma condição de plastificação do material. Existem diversos modelos analíticos, entre eles podemos citar os dois mais simples encontrados na literatura: o Modelo de Maxwell e o Modelo de Kelvin, ilustrados na Figura 13.

Ao se estabelecer um modelo viscoelástico de comportamento, a equação constitutiva do material e através de dados experimentais, obtidos de ensaios mecânicos de fluência ou relaxação de tensão, determinar os parâmetros da equação é possível representar o comportamento de um material polimérico em longo prazo. O ajuste de parâmetros é um processo bastante complexo devido às características da base de funções usada. A precisão deste ajuste depende da quantidade de unidades mola-amortecedores, geralmente unidades de Maxwell ou Kelvin, usadas no modelo.

Figura 13 - Representação física de Modelos reológicos



Fonte: Balbo (2007).

Pagliosa (2004) ainda explica que tais modelos são exclusivamente fenomenológicos, eles não contêm informações sobre ocorrência de fenômenos físicos ou moleculares, mesmo assim são úteis para inferir a resposta de um material sob condições de fluência e relaxação, bem como situações de carregamento

complexos. Esses modelos ainda fornecem uma visão da natureza geral da resposta viscoelástica. É importante considerar a resposta viscoelástica em projetos onde os componentes estruturais sejam materiais poliméricos destinados a operar por períodos longos de tempo.

Numerosos modelos físicos-matemáticos foram desenvolvidos para representar os efeitos viscosos e elásticos presentes nos materiais viscoelásticos. Melo (2014) explica que tais modelos geralmente são constituídos por diferentes arranjos geométricos de molas, que representam a parcela elástica, e amortecedores, que representam a parcela viscosa. A elasticidade instantânea do material no carregamento e descarregamento é representada pela mola linear. Já o amortecedor viscoso linear reproduz a dependência no tempo do material, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

Segundo Pronk (2005) para representar o comportamento dos ligantes asfálticos geralmente é utilizado o modelo de Huet, já o modelo de Huet-Sayegh costuma ser usado para representar as misturas asfálticas. O modelo Huet-Sayegh é uma versão aprimorada por Sayegh (1965) em relação ao modelo de Huet (1963). O modelo de Huet consiste de uma mola e dois elementos parabólicos colocados em série. Já o modelo de Huet-Sayegh, que foi otimizado para misturas asfálticas, é composto pela combinação de uma mola linear em paralelo ao modelo de Huet original. A mola em paralelo no modelo Huet-Sayegh representa o módulo elástico do material, isto é, representa o comportamento viscoelástico de material sólido.

O modelo de Huet não se aproxima, com a precisão desejável, da resposta viscoelástica das misturas asfálticas a frequências muito baixas e/ou a temperaturas muito altas. Segundo Olard (2003) & Minhoto (2005), o modelo de Huet-Sayegh se insere no espectro contínuo e traduz o comportamento linear das misturas asfálticas no domínio das pequenas deformações e para qualquer faixa de temperatura e de frequência.

#### *2.3.1.4 Modelo 2S2P1D*

Nem o modelo de Maxwell nem o modelo de Kelvin-Voigt produzem uma resposta viscoelástica que capture qualitativamente o comportamento de muitos materiais reais, daí surge à necessidade de se estudar outros modelos mais complexos. Propõem-se então diferentes combinações de molas e amortecedores, possibilitando com isso construir modelos mais complexos, onde seja viável

representar prováveis comportamentos de materiais viscoelásticos. De acordo com Pagliosa (2004) para validar cada modelo se deve confrontar os resultados de ensaios experimentais do material específico que se deseja representar.

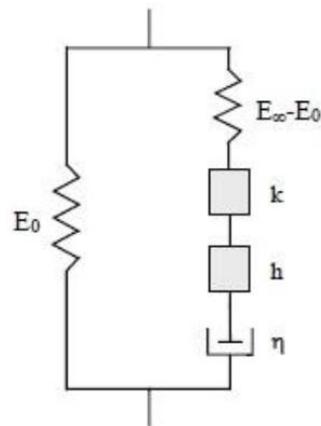
Observa-se que as modelagens baseadas na teoria da elasticidade e viscosidade limitam sobremaneira as condições de campo, ao passo que, deixa-se de considerar temperatura, variação de carga e recuperação da deformação da mistura. Deste modo é evidente a necessidade de se utilizar modelos matemáticos que se aproximem das variáveis reais, e eis que aqui merece destaque o modelo 2S2P1D, proposto por François Olard e Hervé Di Benedetto.

Di Benedetto et al. (2004), desenvolveram um estudo de modelagem em 2003 resultando no modelo 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot*), um modelo reológico único, que é baseado em uma simples combinação de elementos físicos: 2 molas, 2 elementos parabólicos e 1 amortecedor, o qual tem um espectro contínuo, ou seja, pode ser representado por uma infinidade de elementos em série ou em paralelo.

Di Benedetto et al. (2004) explicam que desenvolveram uma campanha experimental sobre a caracterização do comportamento viscoelástico linear de diferentes materiais betuminosos, tendo como objetivo principal estabelecer as ligações entre as propriedades viscoelásticas lineares das misturas betuminosas. Assim, através da realização de testes de módulo complexo a diferentes temperaturas e frequências eles puderam avaliar e estudar o comportamento viscoelástico linear de ligantes e misturas utilizando modelo 2S2P1D. Este modelo consiste, basicamente, em uma generalização do modelo analógico Huet-Sayegh, o mesmo é válido para qualquer material betuminoso, adaptado pela adição de um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e a mola de rigidez, de acordo com a Figura 14.

Mangiafico (2014) relata que através dessa adaptação o modelo pôde ajustar-se muito bem ao comportamento mecânico da maioria das misturas betuminosas, passando a representar bem os intervalos de altas temperaturas e baixas frequências, deficiências encontradas no modelo analógico de Huet-Sayegh.

Figura 14 - Representação do Modelo 2S2P1D



Fonte: Di Benedetto (2004).

Utilizado no princípio de sobreposição tempo/frequência-temperatura, o fator de translação horizontal é uma propriedade básica do material. Isto implica que o mesmo fator permanece aplicável para todas as outras funções viscoelásticas do material. Na literatura, vários modelos são propostos para a obtenção do coeficiente de translação horizontal. De acordo com De La Roche (1996) dentre os modelos mais usados, pode-se citar Williams-Landel-Ferry, o qual será apresentado na Equação 13 e utilizado na realização deste trabalho.

O modelo 2S2P1D possui duas versões, na primeira o número total de constantes do modelo são sete, para expressão unidirecional. Na segunda versão, para expressão tridimensional o número total de constantes do modelo é igual à 9, ou seja, as sete do modelo unidirecional mais os dois coeficientes de Poisson,  $\nu_0$  e  $\nu_{00}$ . Ou seja, o modelo 2S2P1D é um modelo robusto e que já permite tridimensionalização. Utilizar-se-á para realização deste trabalho a primeira versão devido às propostas iniciais deste estudo.

### 2.3.2 Danificação

Os principais defeitos que ocorrem nos revestimentos asfálticos são o trincamento por fadiga juntamente com a deformação permanente, eles são utilizados como critérios de aceitação/avaliação da estrutura do pavimento.

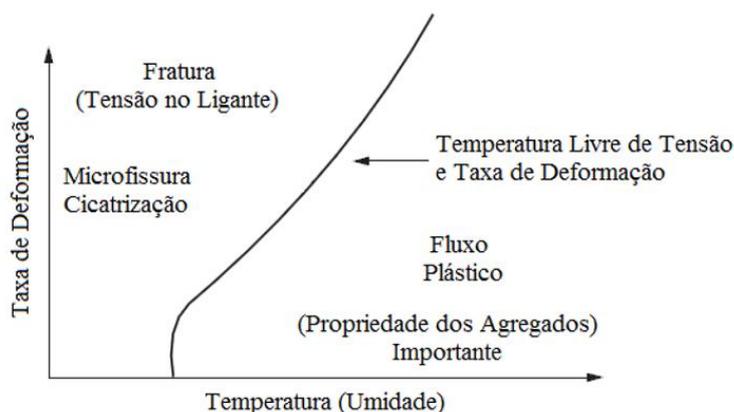
Sobre influência de qualquer temperatura, o ligante asfáltico deformará de forma lenta e permanente quando carregado aos poucos, já se for carregado

rapidamente, será muito mais rígido e ficará sujeito a fratura. Quando sujeito à uma determinada descarga de deformação o material irá relaxar rapidamente, acima de uma determinada temperatura, onde nenhuma tensão se acumula no material.

De acordo com Kim (2009) esses dois fatos conhecidos sobre materiais podem ser visualizados na Figura 15 que apresenta a taxa de deformação versus a temperatura. A Figura 15 apresenta ainda um limite de temperatura livre de tensões e deformações, acima dela o material sofrerá micro fissurações, e abaixo dela o material sofrerá fluxo plástico.

Os problemas de fadiga e deformação permanente de maneira geral se originam de maneiras distintas, principalmente no que diz respeito ao intervalo de temperatura para ocorrência de cada um deles. Analisando a Figura 15 é possível observar que em pequenas temperaturas e uma taxa de deformação elevada há uma maior ocorrência de fissuração. Já para temperaturas elevadas o problema de fluxo plástico se apresenta, sendo independente da taxa de deformação, neste caso o esqueleto pétreo se destaca com a queda da rigidez do ligante.

Figura 15 - Dano no concreto asfáltico



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Mais uma vez cabe ressaltar que a análise de parâmetros de rigidez e danificação são importantes visto que elas afetam diretamente o comportamento das misturas e dos pavimentos quando submetidas a variações de temperatura, níveis de deformações e taxas de carregamento. Acoplado aos parâmetros de rigidez e danificação temos o efeito da umidade que também influencia no comportamento das

misturas e conseqüentemente na estrutura. Todos estes aspectos quando observados na natureza não podem ser dissociados e afetam as propriedades viscoelásticas das misturas. Como ainda não se pode avaliar todos os aspectos simultaneamente, segue-se discretizando os parâmetros para melhor entendimento dos fenômenos.

### 2.3.2.1 *Fadiga*

Rivière (1996), Kim et al. (1997), Di Benedetto et. al. (2004), Specht (2004), Tapsoba (2012), Sabouri e Kim (2014), entre diversos outros, citam que a fadiga é um dos principais modos de falha das estruturas de pavimento asfáltico. De acordo com Nascimento (2015), o trincamento por fadiga é a principal manifestação patológica nos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil.

De acordo com Balbo (2007) o fenômeno da fadiga pode ser definido como o processo pelo qual passam muitos materiais que são solicitados por tensões inferiores às de ruptura sucessivas vezes, desenvolvendo paulatinamente alterações na estrutura interna, levando a perda de suas características estruturais originais. Ocorre então um processo de microfissuração sucessiva que leva à formação de fraturas e, posteriormente, ao rompimento do material.

Quando há repetições de aplicação de cargas dos veículos no pavimento, a superfície é submetida a uma carga vertical de compressão, surgem então tensões de tração e compressão na camada de concreto asfáltico devido ao carregamento e descarregamento repetido. Isto posto, verifica-se que o domínio do fenômeno de fadiga está diretamente conectado a quantidade de ciclos de aplicação de cargas e a magnitude das deformações causadas por elas.

Bastos (2010) relata que a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é influenciada por distintos fatores, como por exemplo, características do ensaio, condições ambientais e características do material e do corpo de prova. Momm (1998) faz um apanhado sobre os principais fatores que afetam o comportamento a fadiga, divididos em três famílias: fatores de solicitação, fatores de formulação do concreto asfáltico, fatores do meio ambiente.

- Fatores de solicitação ou do ensaio mecânico: carregamento (intervalo entre aplicações de carga, magnitude, frequência, forma do carregamento, duração, tipo, entre outros);

- Fatores de formulação do concreto asfáltico: características do ligante asfáltico (teor, penetração, viscosidade etc.) e dos agregados (origem, forma e granulometria), compactação da mistura, rigidez, volume de vazios e temperatura;
- Fatores do meio ambiente: temperatura e umidade.

Diversos modelos podem ser utilizados para fazer a análise do trincamento por fadiga, normalmente os mais utilizados são os que procuram uma interpretação do fenômeno por meio de ensaios laboratoriais. Com os dados em mãos são então ajustados com o intuito de encontrar uma correlação para obter uma previsão da vida de fadiga do material.

Os principais ensaios laboratoriais para determinação do desempenho à fadiga são: Compressão diametral (Tração Indireta), método mais difundido no Brasil; Flexão em corpos de prova trapezoidais; Flexão em barras prismáticas ou vigas; Tração-Compressão uniaxial.

O ensaio de compressão diametral tem o objetivo de expressar as propriedades resilientes e de ruptura por fadiga dos corpos de prova. Este procedimento permite uma análise fenomenológica do material relacionando a máxima deformação inicial ( $\epsilon_i$ ) e o número de solicitações que causariam uma ruptura por fadiga ( $N_f$ ) (PINTO, 1991). Ainda segundo o autor este método de ensaio é aconselhado para estruturas com camadas asfálticas de espessuras elevadas devido à predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação as camadas subjacentes. Um modelo de previsão da vida de fadiga a ser citado é o chamado Modelo Salomão Pinto (PINTO, 1991). Este relaciona a deformação máxima embaixo do revestimento com a resistência à fadiga.

A nível nacional, Nascimento (2015) em sua tese de doutorado pela North Carolina State University, com base no ensaio de fadiga a tração direta, aplicou e validou o modelo S-VECD e o critério de falha por fadiga proposto por Sabouri e Kim (2014) para as misturas asfálticas brasileiras. Nascimento (2015) aplicou a modelagem S-VECD juntamente ao LVECD, validando a previsão de dano por fadiga para misturas asfálticas brasileiras. Fritzen (2016) desenvolveu e validou a função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos calibrando para trechos experimentais brasileiros a função transferência por meio do ensaio de tração compressão diametral.

No âmbito do GEPPASV já foram realizadas pesquisas que abordam esse assunto, como a de Rossato (2015) que avaliou o fenômeno de fadiga por meio do ensaio de tração indireta. Outras três pesquisas do grupo também abordaram esse assunto. Boeira (2018) contribuiu para a implementação e disseminação do novo ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico, e estudou o comportamento de misturas asfálticas quanto a influência do tipo de ligante asfáltico utilizado, do método de dosagem e do arranjo granulométrico quanto às suas propriedades viscoelásticas, deformação permanente e dano por fadiga. Possebon (2018) avaliou o comportamento mecânico de misturas originadas a partir de seis CAPs que representam a produção brasileira, produzidos nas refinarias REFAP (RS), REPAR (PR), REGAP(MG), LUBNOR (CE) e REVAP (SP). Para tal verificou-se, em laboratório, a influência desses CAPs nas propriedades de dosagem, rigidez, dano por fadiga e deformação permanente nas misturas asfálticas. Em seu estudo Schuster (2018) propôs avaliar as mesmas 24 misturas desta pesquisa buscando entender de que maneira suas distintas características influenciam na resistência à fadiga. O autor verificou a forte influência do tipo de ligante nos níveis de dano acumulado por fadiga, onde as misturas com ligante modificado por polímero e com asfalto borracha apresentam resultados significativamente melhores do que misturas e com ligante convencional. De maneira geral, para os concretos asfálticos utilizados no Rio Grande do Sul, o autor encontrou valores médios e baixos de níveis de dano frente ao fenômeno de fadiga.

#### *2.3.2.2. Deformação permanente*

A deformação permanente pode ser definida como o acúmulo irrecuperável de pequenas quantidades de deformações, provocando uma distorção na superfície do pavimento provocada pela aplicação de carga com a passagem dos veículos, principalmente quando exposta a temperaturas elevadas (MURAYA, 2007). É também conhecida como afundamento de trilha de roda (ATR) e, de acordo com Sousa, Craus e Monismith (1991), aparece tipicamente como depressões longitudinais em trilhas de roda, geralmente acompanhadas de elevações laterais adjacentes ao trilho.

Segundo a norma DNIT 005/2003 – TER, são afundamentos por consolidação as depressões que ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizados quando a extensão não supera 6 m, ou longitudinal, nas trilhas de roda, nos casos que exceda 6 m de extensão; ou afundamentos plásticos, em que as depressões são

decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado ou longitudinal nas trilhas de roda. Comumente, neste último tipo de afundamento, há certa compensação volumétrica, com solevamento da massa asfáltica junto às bordas do afundamento.

Corroborando com o anteriormente exposto os autores Yoder e Witczac (1975), Souza (1991) e Mohamoud e Bahia (2004) relatam que a deformação permanente é causada pela combinação da densificação da massa asfáltica e conseqüente redução de volume, e pela deformação cisalhante da mesma.

Ambos os estágios do comportamento das misturas asfálticas, no que diz respeito a deformação permanente, são regidos por mecanismos influenciados diretamente pelas características dos agregados, na parcela que envolve a deformação plástica do esqueleto mineral, bem como pelo ligante asfáltico utilizado, que por ter comportamento viscoelástico se envolve na deformação viscosa (JOLIVET e MALLOT, 2000).

Muitos estudos como os de Sousa, Craus e Monismith (1991) e de Kandhall e Cooley (2003) apresentam os principais fatores que afetam a resistência à deformação permanente em misturas asfálticas, sendo eles: as características dos agregados, dos ligantes asfálticos e da própria mistura, grande volume de tráfego, maior carregamento por eixo, elevada pressão nos pneus, estado de tensões elevadas, projetos de misturas deficientes, as repetições de carga, as condições climáticas, a temperatura e a ação da água.

Destacam-se, no âmbito do GEPPASV, as pesquisas de Barboza Junior (2017), que avaliou o efeito deletério da água em misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados, com e sem adição de cal e utilizando ligante asfáltico convencional e modificado. O autor verificou algumas propriedades da mistura, dentre elas a deformação permanente, empregando o protocolo AASHTO T 283 para o ensaio de *Flow Number* (FN). Ainda explica que em relação ao FN retido (FNR), 50% das misturas sofreram uma diminuição dos valores de FN, por razão da ação da água. Possebon (2018) também avaliou a influência dos diferentes CAPs produzidos em cinco refinarias brasileiras quanto a deformação permanente por meio do ensaio de FN, apresentando como resultado que a mistura com CAP 30/45 suportou maior número de ciclos quando comparada às de CAP 50/70, que, por sua vez, apresentaram entre si diferentes patamares de comportamento. Boeira (2018) em sua

tese estudou o comportamento de misturas asfálticas quanto a influência do tipo de ligante asfáltico utilizado, do método de dosagem e do arranjo granulométrico quanto às suas propriedades viscoelásticas, deformação permanente e dano por fadiga. Nos resultados de FN o autor destacou que a influência do tipo e teor do ligante asfáltico é perceptível e significativa.

Almeida Jr et al (2018) avaliaram a influência na deformação permanente do tipo e teor de ligante asfáltico e da granulometria quanto ao método Bailey, Faixa de Agregado Dominante (FAD) e faixas granulométricas B e C por meio do ensaio uniaxial de carga repetida. Os resultados indicaram que as modificações no tipo e no teor dos ligantes asfálticos foram mais influentes na deformação permanente do que a granulometria das misturas. Faccin (2018) avaliou o comportamento mecânico das mesmas misturas asfálticas desta pesquisa, por meio de ensaios laboratoriais e de campo, com foco na deformação permanente e no parâmetro FN. Para o ensaio de FN, o autor encontrou uma forte correlação do parâmetro FN com a reologia das misturas, característica fortemente influenciada pelo tipo de ligante, seguido do percentual de pó de pedra no traço.

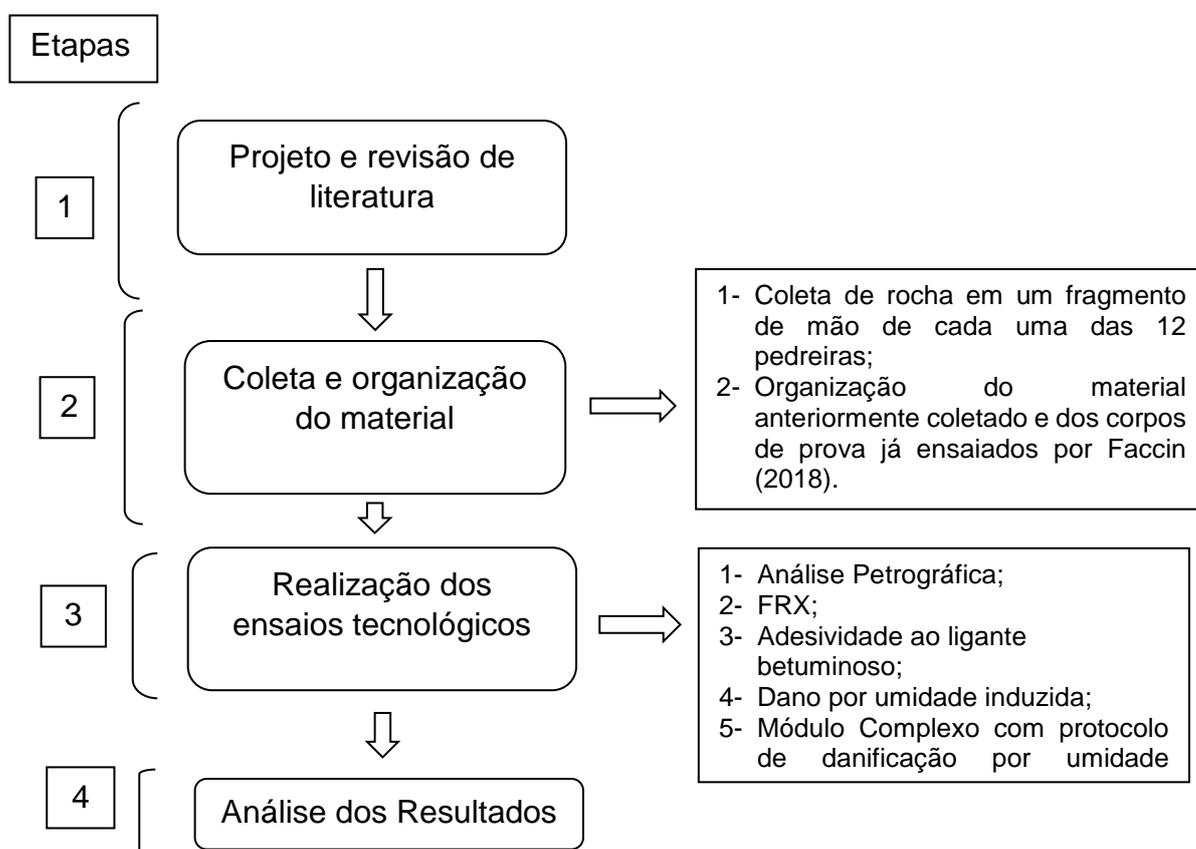
### 3. METODOLOGIA

No presente capítulo, serão apresentados o planejamento da pesquisa, os materiais utilizados, bem como os métodos e procedimentos.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a pesquisa foi dividida em quatro etapas, apresentadas no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora, (2019).

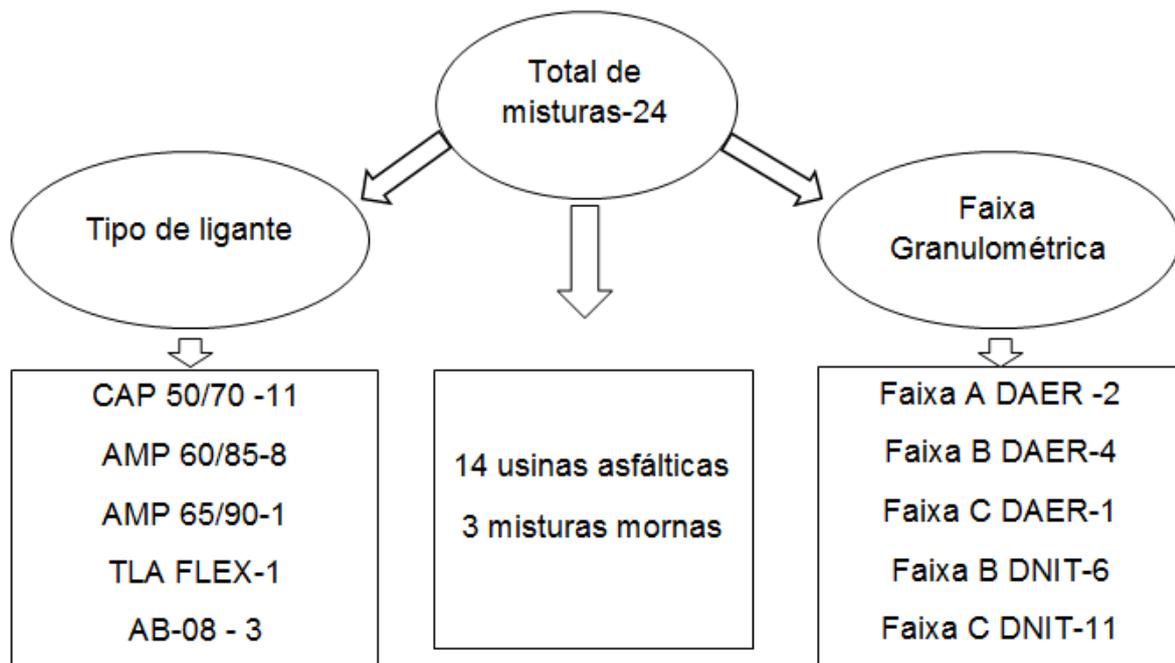
Concomitante a este estudo, Faccin (2018) analisou a resistência a deformação permanente enquanto Schuster (2018) o comportamento à fadiga fazendo uso das mesmas misturas, de forma a criar um espectro completo para a avaliação das mesmas. Isto posto, busca-se através desta pesquisa contribuir com a construção

deste banco de dados através do estudo do efeito deletério da água no que diz respeito à rigidez das misturas.

Dessa maneira, os dados de caracterização de materiais (agregados e ligantes), bem como os demais dados essenciais para confecção dos corpos de prova (teor, granulometria, DMM, parâmetros volumétricos, moldagens) que serão ensaiados e avaliados pela atual pesquisa, foram provenientes e podem ser encontrados na dissertação de Faccin (2018) intitulada “Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente”.

Em sua pesquisa, para estudar o comportamento mecânico dos concretos asfálticos em utilização no estado do Rio Grande do Sul, Faccin (2018) avaliou vinte e quatro misturas asfálticas densas, quatro tipos de ligantes asfálticos, quatro faixas granulométricas (duas para especificações do DAER e duas do DNIT), além de diferentes agregados minerais. As misturas asfálticas foram coletadas em quatorze usinas de produção de CA no estado. A Figura 17 apresenta um resumo dos materiais utilizados na pesquisa de Faccin (2018) e que foram também utilizados no presente estudo.

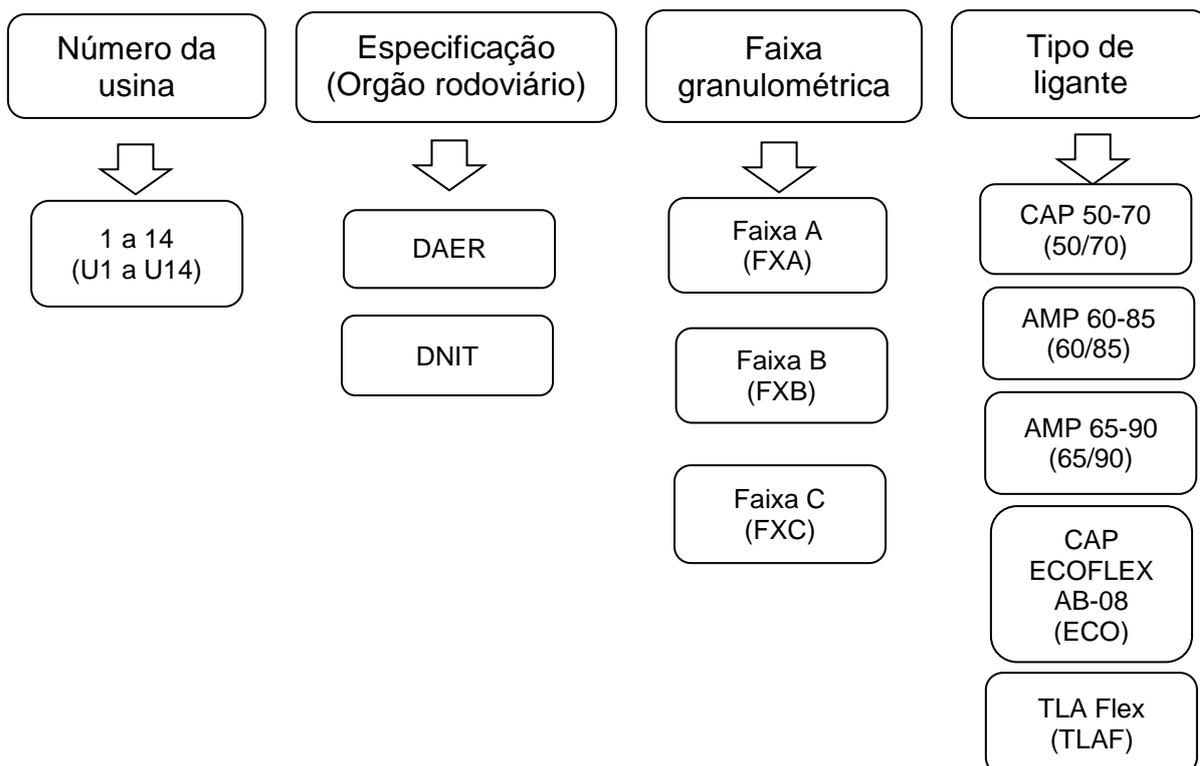
Figura 17 - Resumo dos materiais coletados



Fonte: Faccin, (2018).

As misturas foram designadas por Faccin (2018) conforme abreviatura proposta na Figura 18, a fim de facilitar a análise dos dados no decorrer do trabalho, de acordo com a usina de produção, especificação do órgão rodoviário utilizado para elaboração do traço, tipo de faixa granulométrica e ligante asfáltico.

Figura 18 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas



Exemplo: U1-DAER-FXA-50/70

Fonte: Faccin (2018).

Com os agregados coletados foram realizados os ensaios de análise petrográfica, fluorescência de raios-X e adesividade ao ligante betuminoso. Com os corpos de prova já moldados foram realizados os ensaios de dano por umidade induzida e Módulo Complexo com aplicação do protocolo de danificação por umidade induzida em dois ciclos.

Com os resultados, fez-se uma avaliação do comportamento das misturas em utilização no RS levando em consideração o efeito deletério da água, buscando compreender as modificações causadas nos parâmetros de rigidez.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

De acordo com Faccin (2018) os materiais empregados em sua pesquisa, e por consequência também utilizado neste estudo, são misturas asfálticas densas utilizadas em obras de restauração e implantação de rodovias no estado do Rio Grande do Sul, no período de março de 2016 até agosto de 2017, e os respectivos materiais de sua composição – agregados minerais e ligantes asfálticos.

#### 3.2.1 Misturas asfálticas densas

Ainda de acordo com Faccin (2018) as misturas foram coletadas em diferentes regiões do RS, com o objetivo de caracterizar e avaliar concretos asfálticos com agregados das principais formações geológicas do estado, diferentes faixas granulométricas do DAER e do DNIT, diferentes tipos de ligantes asfálticos e usinas de asfalto em operação. Todas as misturas estudadas foram dosadas pelo método Marshall, conforme informações das empresas executoras.

Faccin (2018) também apresentou a localização das usinas onde as amostras foram coletadas, o tipo de faixa granulométrica, ligante e a nomenclatura utilizada, no decorrer de seu trabalho, denominações estas que continuarão sendo utilizadas nesta pesquisa, sendo apresentadas na Tabela 4 e Figura 19.

Tabela 4 - Relação de misturas estudadas e nomenclatura utilizada

Usina de asfalto	Município de localização da usina	Faixa granulométrica	Tipo de ligante asfáltico	Nomenclatura utilizada
U1	Santa Rosa	FX A- DAER	50/70	U1-DAER-FXA-50/70
U2	Santo Ângelo	FX B- DAER	50/70	U2-DAER-FXB-50/70
		FX C- DNIT	AMP 60-85	U2-DNIT-FXC-60/85
		FX C- DNIT	AMP 65-90	U2-DNIT-FXC-65/90
U3	Itaara	FX B- DAER	ECOFLEX AB-8	U3-DAER-FXB-ECO
U4	Dilermando de Aguiar	FX C- DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXC-50/70
		FX B - DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXB-50/70
U5	Capão do Leão	FX B-DNIT	AMP 60-85	U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>
		FX B-DNIT	ECOFLEX AB-8	U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>
		FX B-DAER	ECOFLEX AB-8	U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>
U6	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U6-DNIT-FXC-60/85

(Continua)

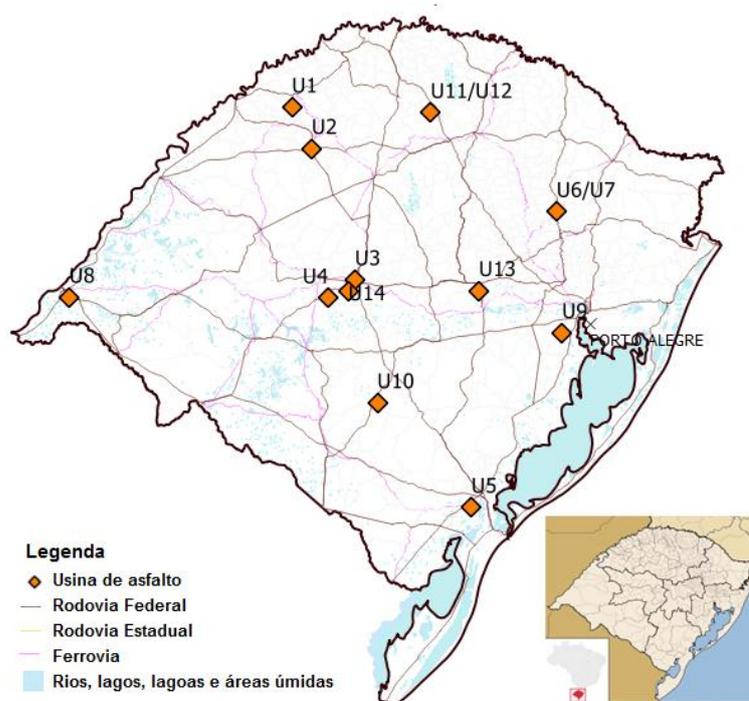
Usina de asfalto	Município de localização da usina	Faixa granulométrica	Tipo de ligante asfáltico	Nomenclatura utilizada
U7	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U7-DNIT-FXC-60/85
U8	Uruguaiana	FX B-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXB-50/70
		FX C-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXC-50/70
U9	Eldorado do Sul	FX C-DNIT	AMP 60-85	U9-DNIT-FXC-60/85
		FX C-DNIT	TLA FLEX	U9-DNIT-FXC-TLAF
U10	Caçapava do Sul	FX C-DNIT	CAP 50/70	U10-DNIT-FXC-50/70
U11	Sarandi	FX A-DAER	CAP 50/70	U11-DAER-FXA-50/70
U12	Sarandi	FX B-DAER	AMP 60/85	U12-DAER-FXB-60/85
		FX C-DAER	AMP 60-85	U12-DAER-FXC-60/85
U13	Santa Cruz do Sul	FX B-DAER	CAP 50/70	U13-DNIT-FXB-50/70
		FXC DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXC-50/70
U14	Santa Maria	FXB DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXB-50/70
		FXC DNIT	AMP 60-85	U14-DNIT-FXC-60/85

(Conclusão)

<sup>1</sup> Misturas mornas com aditivo surfactante Evotherm™.

Fonte: Faccin (2018).

Figura 19 - Mapa localização das usinas amostradas

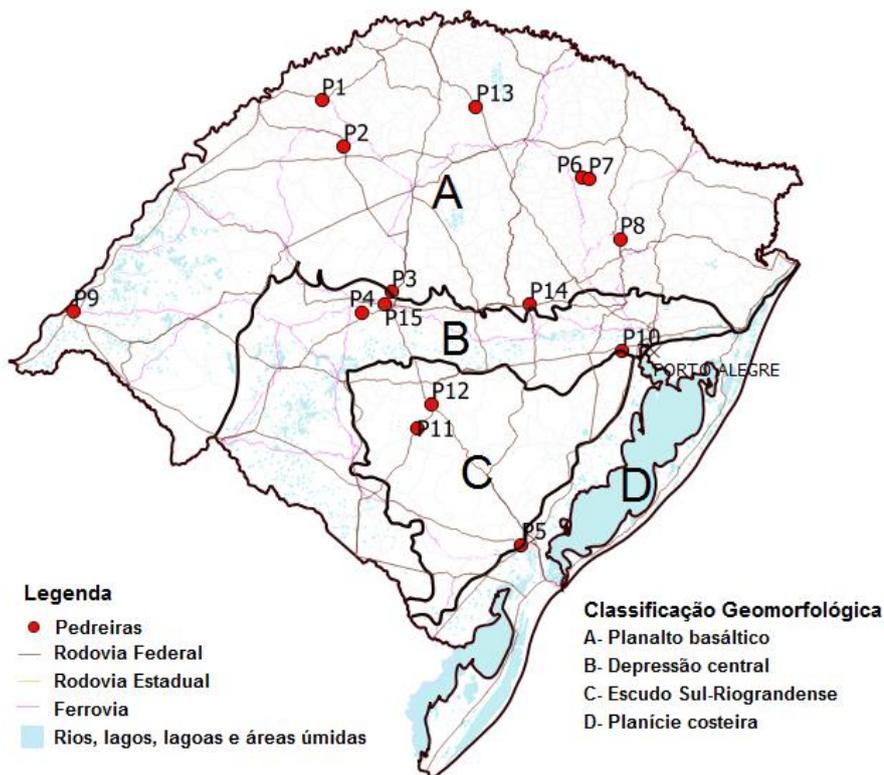


Fonte: Faccin (2018).

### 3.2.1.1 Agregados minerais

De acordo com Faccin (2018) os materiais granulares utilizados na produção das misturas foram coletados diretamente das unidades de produção, quando efetuada a coleta dos concretos asfálticos. A localização dos agregados minerais está apresentada na Figura 20. Observa-se que os materiais utilizados são provenientes de distintas regiões do Rio Grande do Sul, com objetivo de contemplar as formações geológicas do estado que possuem extração de agregados para pavimentação. Para esta pesquisa, além dos agregados britados, foram também coletadas amostra de rocha em fragmentos de mão.

Figura 20 - Localização das pedreiras com coleta de material



Fonte: Faccin, (2018).

### 3.2.1.2 Ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos utilizados nas misturas do trabalho de Faccin (2018) foram o CAP 50-70, o AMP 60-85, o AMP 65-90 e o ECOFLEX AB-08. Algumas

misturas utilizaram o aditivo surfactante Evotherm™, para produção de misturas asfálticas mornas, acrescido em função do peso do ligante. O autor apresenta as informações a respeito dos ligantes utilizados nas misturas coletadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Ligantes asfálticos utilizados nas misturas

Mistura	Tipo de Ligante	Observações
U1-DAER-FXA-50/70	CAP 50-70	-
U2-DAER-FXB-50/70	CAP 50-70	
U2-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	
U2-DNIT-FXC-65/90	AMP 65-90	
U3-DAER-FXB-ECO	ECOFLEX AB-08	0,03 % dope e 2% cal
U4-DNIT-FXC-50/70	CAP 50-70	2% de cal
U4-DNIT-FXB-50/70	CAP 50-70	
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	AMP 60-85	0,4% Evotherm™ e 1% cal
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	ECOFLEX AB-08	0,4% Evotherm™ e 1% cal
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	ECOFLEX AB-08	0,4% Evotherm™ e 1% cal
U6-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U7-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U8-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	2% cal
U8-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	2% cal
U9-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	0,05 % dope
U9-DNIT-FXC-TLAF	TLA FLEX	0,04 % dope
U10-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	1% cal
U11-DAER-FXA-50/70	CAP 50/70	
U12-DAER-FXB-60/85	AMP 60-85	
U12-DAER-FXC-60/85	AMP 60-85	
U13-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	
U14-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	1% cal
U14-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	1% cal
U14-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	1% cal

Fonte: Adaptado de Faccin (2018).

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para avaliação dos materiais e misturas estudados nesta pesquisa foram utilizados os seguintes ensaios: análise petrográfica, fluorescência de raios-X, adesividade ao ligante betuminoso, dano por umidade induzida e módulo complexo

com aplicação de protocolo de danificação por umidade induzida em dois ciclos, conforme AASHTO T 283-14 e DNIT 180/2018. Neste tópico estão descritos os procedimentos para realização e avaliação de cada um dos ensaios anteriormente citados.

### **3.3.1 Ensaios tecnológicos dos agregados**

Foram realizados os seguintes ensaios tecnológicos nos agregados: análise petrográfica, fluorescência de raios-X e ensaio de adesividade ao ligante betuminoso.

#### *3.3.1.1 Análise Petrográfica*

A “composição petrográfica” é o termo utilizado para descrever a composição dos agregados avaliando sua composição mineralógica, textura, estrutura, grau de alteração e classificação petrográfica. Rhoades e Mielenz defendiam, na década de 1940, que a petrografia permitia detectar substâncias nocivas e comparar novos materiais com outros dos quais existia experiência em obra, proporcionando informação rápida sobre a qualidade dos agregados.

Diversos autores como, por exemplo, Power e Hammersley (1978), Sims e Brown (1998), Smith e Collis (2001), Grattan-Bellew (2001), Jensen e Sibbick (2001), explicam que a análise petrográfica possibilita estudar as principais características dos agregados, quer dizer, a natureza e propriedades das rochas e minerais constituintes, buscando com isso avaliar o desempenho e identificar a presença de impurezas e constituintes prejudiciais.

Segundo Sims et al. (2000), lançando mão de procedimento sistemático, a primeira análise de um agregado deve ser realizada por um petrógrafo, visto que geologia e mineralogia são universais e sem fronteiras políticas, posteriormente um especialista deve identificar componentes reativos e verificar, a partir de sua experiência local, o desempenho da rocha para determinada obra. Portanto, a análise petrográfica apresenta como limitação a dependência da sensibilidade e experiência do petrógrafo.

Com o intuito de obter informações sobre aspectos texturais, fundamentais para o estudo das propriedades fisicomecânicas dos agregados, realizou-se a descrição petrográfica das rochas de acordo com a norma DNER – IE 06/94. Para realização do

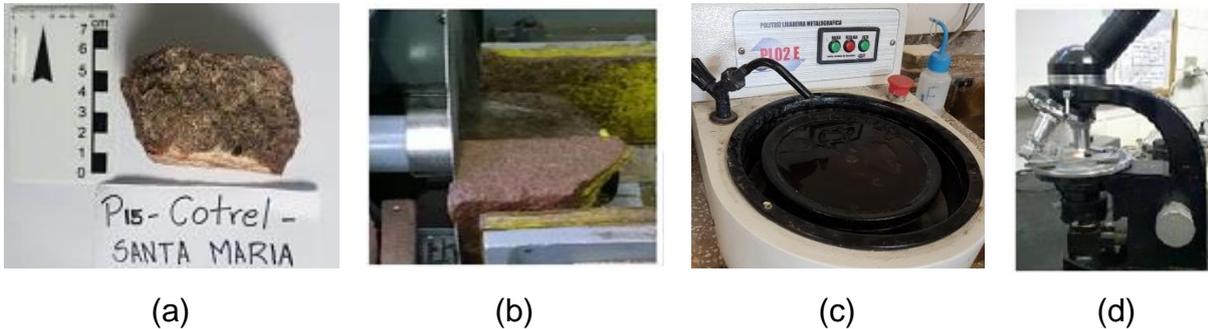
ensaio foram coletadas amostras de rocha em fragmento de mão com dimensões de aproximadamente 10x10x15 cm, que sejam representativas à jazida.

Cortou-se o fragmento de rocha com o auxílio de serra diamantada e se desgastou até uma determinada espessura para confecção da lâmina delgada. A seguir, a amostra foi colocada em uma lâmina de vidro de dimensões 5cm x 2,5cm x 01,cm, e após seu endurecimento o fragmento foi desgastado com esmeril até a espessura de 3 micras. Este passo a passo está exemplificado na Figura 21. A confecção das lâminas petrográficas foi realizada no Laboratório de laminação do Departamento de Geociências da UFSM pelo servidor, geólogo Ronaldo Fonseca.

A descrição da rocha se dá em duas escalas de observação: uma macroscópica, com o auxílio de uma lupa binocular e outra microscópica, por meio de microscópio petrográfico. As características gerais do fragmento de rocha como cor, textura (tamanho dos minerais, relação entre eles, etc), estrutura, grau de coerência, alteração, entre outras, é feita por meio da descrição macroscópica.

A descrição microscópica da lâmina delgada, indica características como granulação, textura, composição mineralógica (tipos de minerais e porcentagem de cada um deles), grau de alteração, entre outras, com intuito de realizar a classificação petrográfica do material. A avaliação petrográfica das amostras de rocha foi realizada pelos professores Dr Luis Eduardo Robaina e Dra Andrea Nummer do Departamento de Geociências da UFSM e teve a colaboração dos estagiários de Geologia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Caçapava do Sul: Ravi Gabriel dos Santos Pinheiro Sampaio, Gabriela Gheralde e Lucas Luiz Dal Bosco.

Figura 21- Análise petrográfica (a) Amostra de mão coletada para posterior redução; (b) Redução da amostra com o auxílio da serra diamantada; (c) Politriz utilizada para desgastar a lâmina delgada; (d) Microscópio petrográfico.



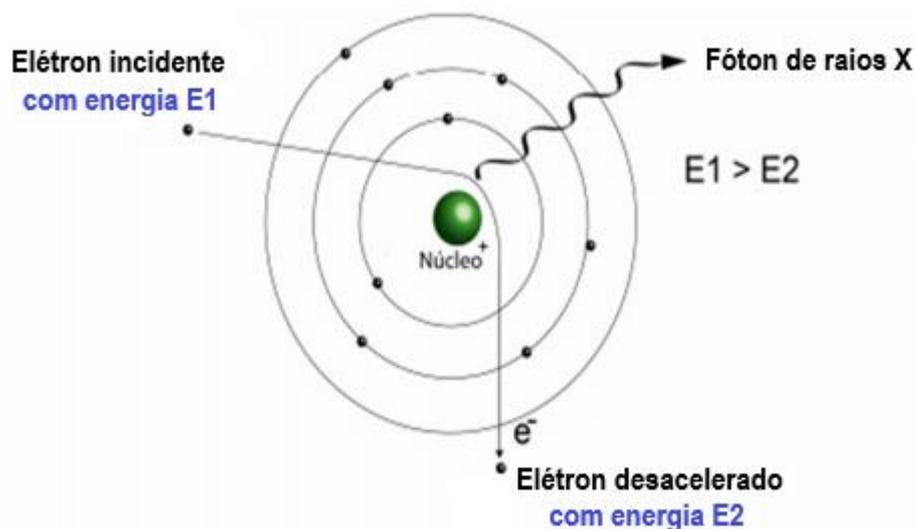
Fonte: Autora, (2019).

### 3.3.1.1 Fluorescência de Raio-x

O método de Fluorescência de Raio-X (FRX) é uma técnica não destrutiva largamente usada para análise quantitativa e qualitativa de elementos da tabela periódica com número atômico maior que o do sódio, pois átomos dessa natureza possuem maior probabilidade de interação com a radiação incidente em relação aos átomos leves viabilizando, assim, a aplicação do método.

Na análise por fluorescência de raios-X, a amostra é submetida a radiações de elevada energia. Essa radiação provoca a excitação dos átomos constituintes do material alvo do exame. Desta forma, o átomo que estava no estado fundamental absorve esta energia passando para um estado excitado mudando os elétrons para níveis mais energéticos. Ao retornar ao seu estado fundamental, a transição eletrônica ocorre por emissão de energia que é característica de cada elemento químico permitindo, então, a identificação e quantificação, conforme Figura 22 (SKOOG et al, 2002).

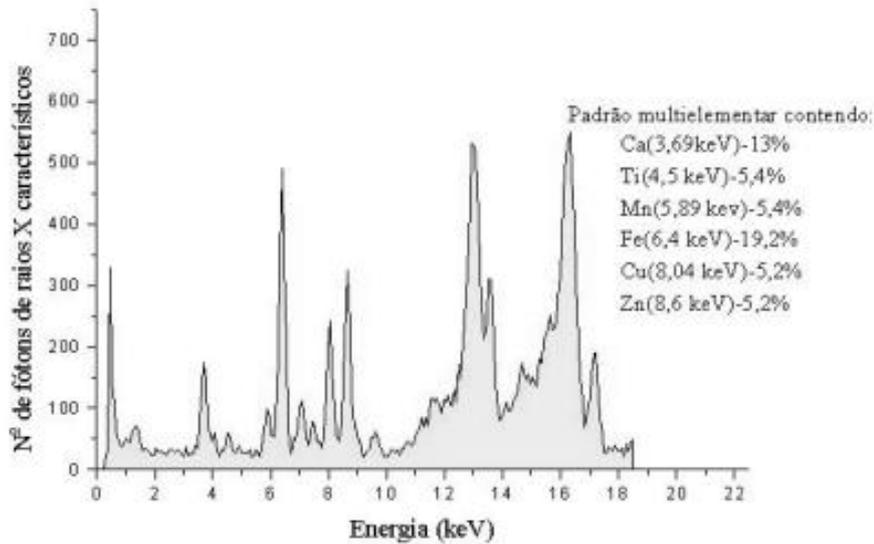
Figura 22 - Produção de raios X



Fonte: Nascimento-dias; Oliveira e Anjos, (2017).

Os raios X são produzidos por meio da colisão de um elétron muito veloz com a matéria deslocando elétrons das camadas mais internas do átomo. Esse processo faz com que um outro elétron da camada mais externa substitua o elétron perdido (Figura 22), e essa movimentação libera energia na forma de raios X fluorescentes, que formam um espectro característico de energia associada diretamente ao número atômico do elemento. Esses raios característicos são então identificados e medidos, fornecendo o elemento químico que o originou e sua concentração, a qual é proporcional a intensidade dos raios recebidos (Figura 23). Assim, a análise de FRX divide-se em três passos: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e identificação desses raios X (SANTOS et al., 2013; PARREIRA, 2007).

Figura 23 - Espectro característico de um padrão multielementar



Fonte: Parreira (2007).

A equação que correlaciona a intensidade de raios X característicos e sua concentração em uma determinada amostra é dada por:

$$I_i = C_i S_i A \quad (7)$$

onde:

$I_i$ - intensidade do elemento  $i$  (total de fótons dividido pelo tempo de medida), cps (contagem por segundo);

$C_i$ - concentração do elemento  $i$  na amostra,  $\mu\text{g/g}$ ;

$S_i$ - sensibilidade do sistema de medidas para o elemento  $i$ ,  $\text{cps} \cdot (\mu\text{g/g})^{-1}$ ;

$A$ - fator de absorção da matriz, tanto para o feixe de excitação, quanto para o raio X característico, adimensional.

A composição química das amostras foram obtidas através da técnica de fluorescência de raios X com energia dispersiva (FRX ED), o equipamento utilizado para a análise foi o S2 Ranger (Bruker) (Figura 24).

Figura 24 - Espectrômetro de FRX S2 Ranger Bruker, utilizado para determinação da composição química



Fonte: Autora (2019).

A Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX ED) trata-se de uma técnica analítica nuclear, instrumental, multielementar e simultânea baseada na medição das intensidades de raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra a partir de excitação por meio de um feixe de raios-X. O termo “energia dispersiva” refere-se à técnica de detecção dos raios-X emitidos, que é efetuada por um detector de silício que gera um espectro de intensidade em função da energia. A intensidade da energia característica emitida pelos componentes da amostra está relacionada com a concentração de cada elemento presente na amostra (ALEXANDRE e BUENO, 2006).

A técnica FRX ED, embora não atinja limites de detecção comparáveis aos alcançados pelas técnicas de espectrometria de absorção ou emissão atômica e à análise por WDXRF, possui grandes vantagens como o baixo custo de análise, geralmente requer baixo consumo de reagentes e vidraria, gera pouco ou nenhum resíduo, o que também a torna ideal para se trabalhar em análises de rotina além de permitir a montagem de um espectrômetro de baixo custo. O rápido desenvolvimento dos detectores semicondutores contribuiu para aumentar e diversificar as aplicações

com os sistemas de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (PATACA et al., 2005).

Para realizar o ensaio de forma semi-quantitativa foi utilizado o equipamento FRX ED S2 Ranger da BRUKER, disponível no Laboratório de Análises Química (LACHEM) da UFSM, as amostras introduzidas no porta-amostra apresentavam aproximadamente 40 mm de diâmetro e 4mm de altura, resultando em uma massa média de 5g de amostra. O porta-amostra foi inserido no equipamento e selecionado no sistema operacional a opção de análise elementar. A medida é realizada a vácuo e, no fim do processo, o equipamento forneceu uma lista dos elementos encontrados na amostra.

### *3.3.1.3 Ensaio de adesividade ao ligante betuminoso*

Com o intuito de verificar a aderência entre o agregado graúdo e o ligante asfáltico, executou-se o ensaio de adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 78/94) que consiste em ensaiar 500g de agregado previamente limpo e aquecido. Em seguida, mistura-se o agregado ao ligante e, após o resfriamento da mistura, deve-se recobrir o recipiente com água destilada a 40°C por 72 horas.

Este ensaio apresenta seu resultado por meio da denominação satisfatório quando não houver deslocamento da película de betume no final das 72 horas, caso contrário, quando há exposição da superfície do agregado, o resultado é dito não satisfatório (Figura 25). Optou-se por realizar este ensaio devido a sua facilidade no procedimento, simplicidade, baixo custo de execução e proximidade a atual prática de engenharia.

Figura 25 - Amostra de mistura asfáltica após ensaio de adesividade do agregado graúdo



Satisfatório



Não Satisfatório ou Insatisfatório

Fonte: Autora, (2019).

### 3.3.2 Ensaios tecnológicos das misturas asfálticas

Realizaram-se os seguintes ensaios tecnológicos para misturas asfálticas: Ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) e Módulo Complexo com aplicação do protocolo de danificação por umidade induzida em dois ciclos.

#### 3.3.2.2 *Dano por umidade induzida*

Nesta pesquisa a avaliação da danificação por umidade induzida foi realizada a partir da utilização do ensaio Lottman modificado, o qual segue as normas AASHTO T 283-14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage*, e também a norma DNIT 180/2018 – ME - Determinação do dano por umidade induzida.

Segundo a norma, os procedimentos são utilizados para determinar o efeito da presença de água na resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas, por comparação entre corpos de prova virgens e corpos de prova submetidos a procedimentos de condicionamento próprios. Este indicador é associado a uma medida indireta da adesividade e coesão do par agregado-ligante asfáltico.

Este ensaio leva em consideração o efeito deletério da água em amostras cilíndricas compactadas pelo método de dosagem Marshall ou Superpave com volume de vazios entre 6% e 8%, e tem por objetivo verificar a durabilidade das misturas asfálticas a longo prazo, cerca de quatro a doze anos, com relação à propriedade de

adesividade ligante/agregado. De acordo com Bernucci et al. (2010), tal propriedade é relevante pois evidencia os possíveis problemas de interação do agregado com o ligante asfáltico causados pelo dano por umidade, o que acaba por afetar diretamente o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos.

Para determinação do dano por umidade induzida, são ensaiadas seis amostras por mistura, de dimensões 10 por 6 cm. Os corpos de prova foram confeccionados seguindo a metodologia Marshall, com volume de vazios de  $7\pm 1\%$ , e serão divididos em dois grupos. De acordo com Boeira (2014), esta divisão é feita para que possa ser realizada posteriormente uma análise entre a relação da resistência à tração por compressão diametral de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento.

Os corpos de prova do primeiro grupo foram saturados até atingirem valores de grau de saturação entre 55% e 80%. Essa saturação é conseguida através da aplicação de vácuo na faixa de 13 a 67 kPa de pressão absoluta. O processo de saturação consiste em medir a massa inicial dos corpos de prova e, de posse do volume de vazios, calcula-se a massa de água que deve ocupar os vazios do corpo de prova para atingir o grau de saturação exigida pelo método.

Primeiramente o corpo de prova é imerso em um dessecador com água destilada e em seguida aplica-se o vácuo (Figura 26). O compressor é então ligado e após cerca de 15 segundos, retira-se o corpo de prova da imersão e sua massa é determinada. Por comparação de massas é conhecido o grau de saturação que o corpo de prova atingiu. Caso não tenha atingido o mínimo de 55%, é retornado para a imersão e aumenta-se o tempo de permanência sob o vácuo. Cada corpo de prova teve seu grau de saturação calculado a partir dos valores provenientes do projeto de Faccin (2018).

Figura 26 - Cuba onde é realizada a saturação dos corpos de prova



Fonte: Autora, (2019).

Após atingir a saturação requerida, os mesmos foram embalados a vácuo e condicionados à temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 16h, esta temperatura leva o corpo de prova ao congelamento, conforme a Figura 27 (a). Então, as amostras foram removidas da refrigeração e imersas em água destilada, à temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , por um período de 24h, Figura 27 (b). Por fim, os corpos de prova foram imersos em água a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  por um período de 2h, Figura 27 (c) sendo, após, submetidos ao ensaio de resistência à tração ( $RT'$ ).

Figura 27 - Ciclos de congelamento e imersão em água. (a) Congelamento de 16 hrs à  $-18^{\circ}\text{C}$ . (b) Imersão por 24 hrs à  $60^{\circ}\text{C}$  (c) Condicionamento por 2 hrs  $25^{\circ}\text{C}$



Fonte: Autora, (2019).

A norma que prescreve o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral é a norma DNIT 136/2018 - ME- Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. O mesmo consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. A resultante obtida é a Resistência à Tração (RT).

$$RT = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (8)$$

Sendo:

RT = resistência à tração, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm.

O segundo grupo foi também submetido ao ensaio de resistência à tração (RT), após condicionamento a 25°C, por pelo menos 12 horas. A relação entre  $RT'/RT$  indica a perda de resistência por umidade induzida, que não deve ser inferior a 30%, ou seja, ter perda maior ou igual a 0,70 (BERNUCCI et al., 2010). A análise é feita com a obtenção da relação entre as médias dos valores obtidos na resistência à tração pela compressão diametral de corpos de prova, submetidos previamente a condicionamentos, e a resistência à tração pela compressão diametral de corpos-de-prova sem condicionamentos (SPECHT, 2004). Esta relação de resistência em porcentagem é denominada de Resistência à Tração Retida (RRT).

### 3.3.2.3 Módulo Complexo com protocolo de efeito deletério da água em dois ciclos

Para realização do ensaio de módulo complexo Faccin (2018) confeccionou em sua pesquisa 3 corpos de prova para cada umas das 24 misturas coletadas no estado do Rio Grande do Sul. Os dados e nomenclaturas das misturas avaliadas foram descritos na Tabela 4.

Nesta pesquisa foram ensaiados 2 corpos de prova de cada uma das 24 misturas, totalizando 48 amostras, sendo que cada uma delas passará primeiramente pelo protocolo de danificação por umidade induzida descrito no item anterior e novamente pelo ensaio de módulo complexo, configurando o Ciclo 1. Posteriormente, repete-se esse processo, e denomina-se Ciclo 2. Esta sequência de ensaios tem por objetivo avaliar a variação da rigidez das misturas asfálticas estudadas devido ao dano induzido pela água.

Os resultados obtidos após a realização dos ensaios desta pesquisa foram comparados com os obtidos por Faccin (2018), ou seja, a relação acontecerá entre os resultados de módulo complexo antes e depois de um ou dois ciclos de dano por umidade. Tais resultados e comparações serão apresentados em tabelas e gráficos onde serão analisados e discutidos.

De acordo com Pereira (2012) o ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo, já consolidado nos Estados Unidos e na Europa, apresenta-se como tendência para avaliação da variação de frequência e temperatura das propriedades elásticas dos concretos asfálticos. Costuma-se entender o módulo complexo como um ensaio que apresenta resultados mais próximos das reais propriedades do material.

A importância de se considerar a influência da temperatura e de diferentes frequências de carregamento faz com que o módulo complexo venha a ser o principal ensaio para a melhor compreensão acerca da rigidez das misturas asfálticas. Como as misturas asfálticas devem ser consideradas como sistemas viscoelásticos lineares, Franco (2007) explica que o módulo complexo é a propriedade que melhor representa a resposta tensão-deformação das misturas asfálticas.

O ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo foi realizado com 48 amostras de dimensões 10 x 15 cm, moldadas e ensaiadas previamente por Faccin (2018) sem terem passado por nenhum protocolo de danificação por umidade. As amostras foram moldadas no compactador giratório *superpave* (CGS), nos teores de projeto determinado pela dosagem Marshall com dimensões 10 x 16 cm e um volume de vazios de  $5,5 \pm 0,5\%$ , sendo as mesmas serradas 1 cm em cada extremidade e retificadas a superfície, sendo 2 amostras para cada mistura estudada.

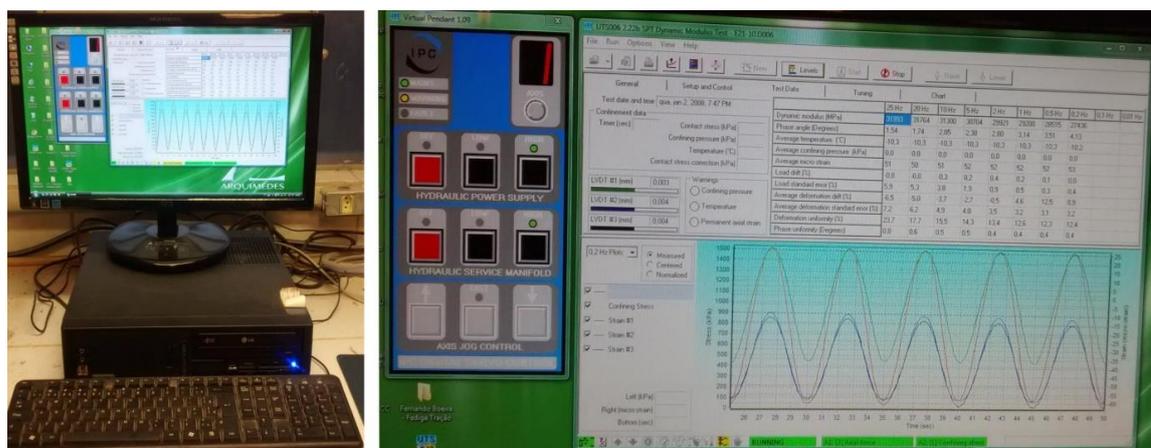
Após cada um dos ciclos do protocolo de danificação, iniciam-se os procedimentos para execução do ensaio de Módulo Complexo. Foram colados nos corpos de prova de 10 x 15 cm três pares de pinos que serviram para fixar um conjunto de três LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*), Figura 28. O módulo complexo foi determinado após aplicação de carga em todas frequências possíveis, além das frequências determinadas pela norma foram acrescentadas as frequências de carregamento que o *software* UTS006 – *SPT Dynamic Modulus Test* disponibiliza, Figura 29, (25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz), nas temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C).

Figura 28 - Colagem dos pinos nos corpos de prova de ensaio de Módulo Complexo



Fonte: Autora, (2019).

Figura 29 - Software UTS006 e registro de dados e resultados do Ensaio de Módulo Complexo



Fonte: Autora, (2019).

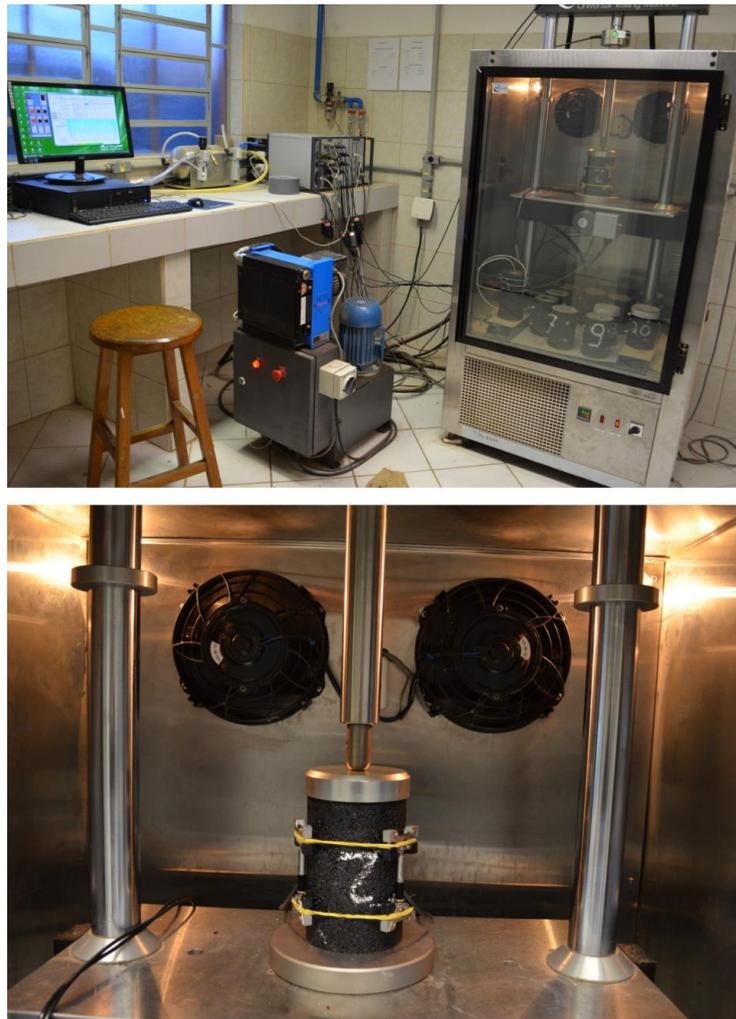
O condicionamento das amostras, bem como toda a realização do ensaio, segue os preceitos da norma AASHTO T 342 - 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot mix Asphalt Concrete Mixtures*. O ensaio foi realizado utilizando a prensa hidráulica UTM-25, disponibilizada pelo LMCC da UFSM. A Figura 30 mostra um corpo de prova submetido ao ensaio uniaxial de carga repetida para determinação do módulo complexo a 21 °C. O tempo de condicionamento para cada temperatura está detalhado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tempo mínimo recomendado de estabilização da temperatura das amostras a serem ensaiadas

Temperatura de ensaio (°C)	Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura da sala de ensaio de 25°C (h)	Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura de teste anterior (h)
-10	Uma noite	Uma noite
4	Uma noite	4 horas ou uma noite
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Fonte: (Adaptado de AASHTO T 342).

Figura 30 - Condicionamento e Ensaio dos Corpos de prova



Fonte: Autora, (2019).

A deformação axial controlada foi fixada entre 50 e 75 microstrains, no intuito de buscar um regime de viscoelasticidade linear. Aonde não há deformação plástica das amostras. Assim garantido a integridade do corpo de prova.

O cálculo de ajuste para alcançar esta faixa de deformação é realizado através da Equação (9):

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (9)$$

Nascimento (2008) afirma que as porções reais e imaginárias do módulo complexo ( $E^*$ ) podem ser escritas pela Equação (10):

$$|E^*| = E1 + E2 \quad (10)$$

Sendo:

E1 = fração de armazenamento ou fração elástica do módulo complexo

E2 = fração de perda ou fração viscosa do módulo.

Já o ângulo de fase ( $\varphi$ ) é definido como um indicador das propriedades viscosas do material ensaiado e pode ser representado como o ângulo de atraso de  $\varepsilon_0$  em relação a  $\sigma_0$ , conforme a Equação (11):

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (11)$$

Sendo:

$t_i$  = fração de tempo entre os picos de tensão e deformação;

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga;

$i$  = número imaginário.

Ainda, conforme Nascimento (2008), para um material puramente elástico  $\varphi = 0^\circ$ , o módulo complexo será igual ao módulo dinâmico. Para um material puramente viscoso, por outro lado, o valor de  $\varphi$  será igual a  $90^\circ$ .

A partir da obtenção dos dados experimentais foi possível fazer uma modelagem física matemática para obtenção de outras propriedades sem a necessidade de se realizar novos ensaios, de tal forma que se poderia obter dados de frequência e temperatura que não foram contemplados durante o ensaio em si.

### 3.3.3 Modelagem físico matemática – 2S2P1D

A literatura disponibiliza vários modelos que geralmente são arranjos de molas, amortecedores e elementos parabólicos, como já apresentados na revisão bibliográfica item 2.3.1.3. Neste trabalho, utilizar-se-á o modelo 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolics, 1 Dashpot*), desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003), afim de realizar uma análise de dados das misturas e assim comprovar o desempenho das propriedades viscoelásticas. Foi desenvolvida no Grupo de Estudos e Pesquisas de Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) uma planilha com o intuito de

automatizar o ajuste dos parâmetros do modelo 2S2P1D, baseado na planilha disponibilizada pelo grupo do ENTPE.

O modelo bidimensional 2S2P1D é composto por 7 parâmetros que devem ser calibrados para representar o comportamento viscoelástico do material em termos de módulo e ângulo de fase para qualquer temperatura e frequência de carregamento. O módulo complexo é expresso pela Equação (12):

$$E^*(i\omega\tau) = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (12)$$

Sendo:

$\omega$  = pulsação,  $\omega=2\pi f$  (sendo  $f$  a frequência)

$k, h$  = expoentes,  $0 < k < h < 1$ ,  $\beta$  = constante

$E_{00}$  = módulo estático  $\omega \rightarrow 0$

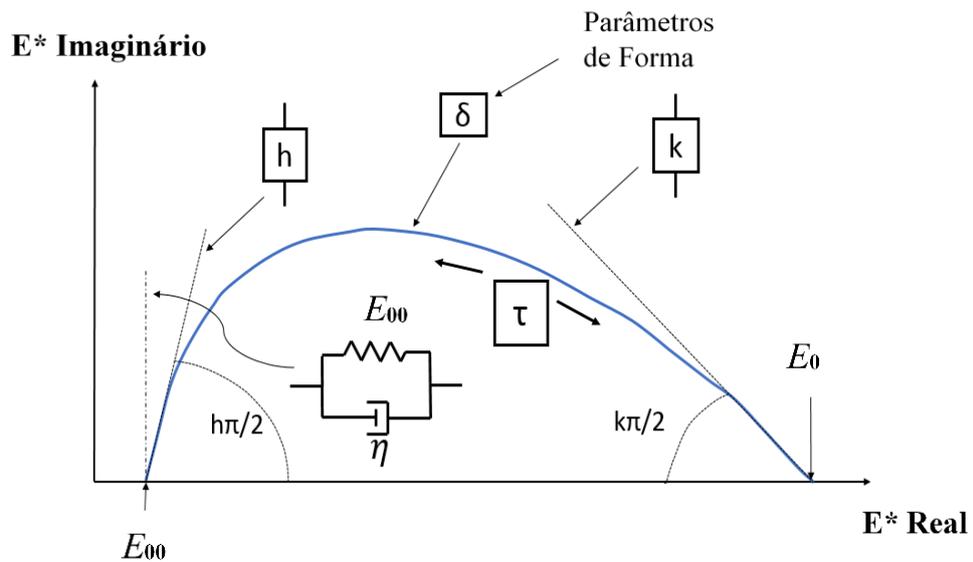
$E_0$  = módulo em transição vítrea  $\omega \rightarrow \infty$

$\eta$  = viscosidade Newtoniana,  $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$

$\tau$  = tempo característico, o qual varia com a temperatura  $T$ ,  $\tau(T) = a\tau(T) \tau_0$  onde  $\tau_0 = \tau(T_{ref})$  é determinado na temperatura de referência

Conforme Olard e Di Benedetto (2003), as sete constantes presentes na Equação 12 definem completamente o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. O modelo 2S2P1D permite melhorar a aproximação das simulações com as curvas reais, encontradas através dos dados colhidos durante a realização de testes em laboratório. Após a inserção dos resultados no 2S2P1D são geradas e ajustadas as curvas no plano Cole-Cole, diagrama de Black, curva mestra de módulo dinâmico e ângulo de fase. O Cole-Cole é a representação dos dados colhidos em escala aritmética de  $E_1$  (parte real) juntamente com  $E_2$  (perda ou parte imaginária), dando origem a uma curva na forma de semicírculo, conforme a Figura 31.

Figura 31 - Influência dos parâmetros associados aos elementos físicos do modelo 2S2P1D



Fonte: Olard et. al. (2003)

Há também duas constantes  $C_1$  e  $C_2$ , responsáveis pela translação, como é demonstrado na Equação 13:

$$\log(a_T) = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (13)$$

$a_T$  = fator de translação horizontal de uma curva isotérmica para temperatura  $T$   
 $C_1, C_2$  = parâmetros do modelo, calculados por regressão linear, dependentes do material;

$T$  = temperatura de uma dada curva isotérmica ( $^{\circ}\text{K}$ ); e,

$T_{ref}$  = temperatura de referência de uma curva isotérmica ( $^{\circ}\text{K}$ ).

O Diagrama de Black é composto com o gráfico do módulo dinâmico e o ângulo de fase. Este gráfico analisa a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas. Para cada temperatura de ensaio resulta também uma isoterma na qual estão associadas todas as frequências ensaiadas nesta temperatura. Com as curvas isotérmicas, é possível estimar a susceptibilidade à temperatura do asfalto, através da variação do módulo em função da variação da temperatura. De

maneira análoga, para cada frequência se obtém uma isócrona, na qual se associam todas as temperaturas ensaiadas para esta frequência específica.

Valendo-se da propriedade de equivalência tempo-temperatura é possível obter uma curva contínua (frequência-temperatura) chamada de curva mestra. Segundo explica Otto (2009), a curva mestra é a união de curvas através de pontos com mesmo valor de módulo do material, para uma temperatura de referência ( $T_r$ ), escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até a superposição de pontos de mesma ordenada. A curva mestra de módulo dinâmico mostra a variação do módulo em diferentes temperaturas e frequências, enquanto a curva mestra de ângulo de fase permite a avaliação das propriedades viscosas do material, também em diferentes temperaturas e frequências.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados durante a pesquisa e suas relações. Para compreender melhor o mecanismo de dano se faz necessário decompor as variáveis que tem influência no processo, mesmo sabendo que as mesmas trabalham em conjunto em campo, diante disso, optou-se por estudar e apresentar primeiramente os materiais, mais especificamente, os agregados e posteriormente as misturas completas.

Na primeira abordagem, tratando do estudo do material, apresentam-se nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 a análise petrográfica, os resultados da fluorescência e da adesividade visual respectivamente e, por fim, no item 4.3.1, correlacionam-se e são discutidos os resultados dos três ensaios com o intuito de compreender melhor a influência da mineralogia, composição química e adesividade do agregado ao betume.

Na segunda abordagem, procurando estudar o comportamento da mistura completa diante do efeito deletério da água, analisaram-se os ensaios de dano por umidade induzida no item 4.4 e o módulo complexo no item 4.5.

### 4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Avaliou-se a composição mineralógica dos agregados por meio da observação macroscópica de fragmentos de rochas e microscopicamente com o uso de lâminas delgadas sob microscópio petrográfico. Esse ensaio visou à obtenção dos principais minerais constituintes das rochas utilizadas nesta pesquisa, verificar o grau de alteração das mesmas, observar também propriedades físico-mecânicas e a estrutura/textura afim de realizar posterior comparação com resultados de outros ensaios tecnológicos nas mesmas rochas.

Foram avaliadas e classificadas 12 amostras de rochas entre ígneas vulcânicas, hipabissais e plutônicas e uma amostra de rocha metamórfica. As descrições são apresentadas na Tabela 7 seguindo uma sequência de classificação química (quantidade de sílica): primeiramente as rochas ígneas vulcânicas básicas (P1, P2, P9, P4) e as ígneas hipabissais (P13 e P15); rochas intermediárias: ígneas vulcânicas (P14 e P6/P7/P8); rochas ácidas: ígneas vulcânicas (P3) ígneas plutônicas (P10 e P5) e por último a rocha metamórfica (P11/P12). Tanto no caso das pedreiras P6/P7/P8 quanto no caso das pedreiras P11/P12 foi selecionado apenas uma rocha

representativa por serem pedreiras da mesma empresa, estarem situadas muito próximas umas das outras e terem utilizado uma mistura de agregados provenientes destas localidades para compor a mistura asfáltica utilizada nesta pesquisa.

Tabela 7- Classificação Petrográfica das 12 amostras de rocha e porcentagens de minerais encontradas

Pedreiras	Classificação Petrográfica	Porcentagem dos principais minerais
<b>Rochas Ígneas Vulcânicas - Básicas</b>		
P1	BASALTO	Plagioclásio (45%) Piroxênio (35%) Minerais opacos (20%)
P2	BASALTO COM OLIVINA	Plagioclásio (40%) Piroxênio-augita (40%) Minerais opacos (18%) Olivina (2%)
P9	OLIVINA BASALTO	Plagioclásio (42%) Piroxênio (30%) Opacos (15%) Olivina
P4	BASALTO	Plagioclásio (55%) Piroxênios (41%) Opacos (4%)
<b>Rochas Ígneas Hipabissais - Básicas</b>		
P13	OLIVINA-DIABÁSIO	Plagioclásio (42%) Piroxênio (30%) Minerais opacos (15%) Olivina alterada (13%)
P15	DIABÁSIO	Plagioclásio (50%) Piroxênio (44%) Minerais opacos (6%)
<b>Rochas Ígneas Vulcânicas - Intermediárias</b>		
P14	ANDESITO	Fenocristais de plagioclásio alterados (50%) Piroxênio augita (30%) Minerais opacos (10%) Quartzo (10%)
P6/P7/P8	DACITO	Plagioclásio (40%) Quartzo (25%) Piroxênio (25%) Minerais
<b>Rocha Ígnea Vulcânica - Ácida</b>		
P3	RIODACITO	Feldspato (35%) Quartzo (32%) Piroxênio (25%) Minerais
<b>Rochas Ígneas Plutônicas - Ácida</b>		
P10	SIENOGANITO	Quartzo (30%) Plagioclásio (20%) Feldspato alcalino (40%)
P5	SIENOGANITO	Feldspato (45%) Quartzo (20%) Piroxênio (15%) Óxidos (8%)
<b>Rocha Metamórfica</b>		
P11/P12	MÁRMORE DOLOMÍTICO	Dolomita (60%) Calcita (30%) Óxidos (10%)

Fonte: Autora, 2019.

As imagens dos 12 agregados estudados, a descrição completa da análise petrográfica e as imagens do microscópio petrográfico são apresentadas no Anexo A, nas figuras 68 a 79 e nas tabelas 16 a 27.

## 4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

O ensaio de Fluorescência de Raios-X, utilizado para determinar a composição química da amostra em análise, fornece uma lista variada de elementos. A lista completa dos elementos de cada amostra é apresentada no Apêndice B. Na Tabela 8 destacamos os elementos químicos relevantes para análise neste estudo, bem como suas respectivas concentrações em cada amostra analisada.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de Fluorescência de Raios-X

Pedreiras	Composição FRX (%)			
	Fe	Si	Ca	K
P1	38,20	25,05	20,39	2,47
P2	41,26	24,91	17,13	3,06
P3	24,22	38,44	9,48	13,99
P4	29,86	33,86	21,17	2,26
P5	10,84	50,78	4,14	22,10
P6/P7/P8	26,32	37,91	11,72	10,42
P9	36,75	27,58	22,07	4,42
P10	13,06	48,17	7,00	20,28
P11/P12	5,00	3,09	80,08	0,62
P13	34,63	29,68	18,00	3,52
P14	33,34	30,01	16,50	6,60
P15	33,87	27,11	21,36	2,43

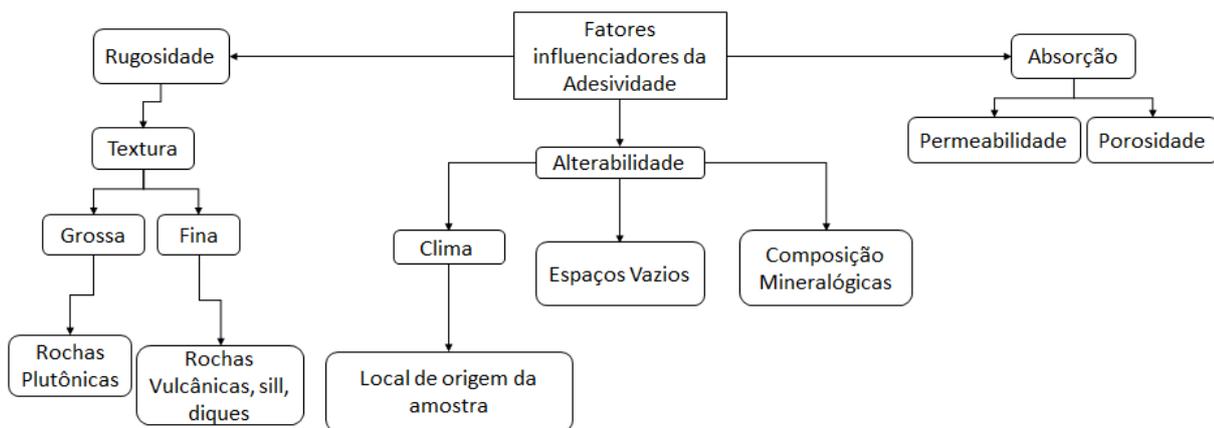
Fonte: Autora (2019).

## 4.3 ADESIVIDADE AO LIGANTE BETUMINOSO

Misturas asfálticas são compostas de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume de agregados, para que os mesmos sejam adequados à sua finalidade na construção asfáltica é necessário avaliá-lo quanto a: forma da partícula, tamanho, graduação, rigidez, durabilidade, textura superficial, absorção, sanidade, composição mineralógica e afinidade com asfalto.

Destacam-se no fluxograma da Figura 32 alguns dos fatores relevantes no estudo da adesividade, quando do ponto de vista da análise do agregado. Para produção de adequadas misturas asfálticas deve-se levar em conta fatores como absorção, alterabilidade e rugosidade dos agregados, pois esses, além de aspectos físicos da rocha, modificam também aspectos químicos do agregado e conseqüentemente sua interação com o ligante asfáltico.

Figura 32 - Fluxograma dos fatores influenciadores da adesividade em agregados



Fonte: Autora, (2019).

Conforme comenta Santana (1992) o ensaio de adesividade ao ligante betuminoso pode caracterizar a adesividade como ativa ou passiva, onde a adesividade ativa é desenvolvida quando o ligante vai cobrir o agregado e a adesividade passiva é a resistência apresentada ao deslocamento da película de ligante da superfície do agregado já envolvido. Para que haja adesividade ativa, a condição imprescindível é que haja “molhagem”, ou seja, que o ligante consiga envolver todo o agregado. O autor comenta ainda, que, na prática, uma viscosidade mais alta do ligante, a textura rugosa e a porosidade do agregado favorecem a adesividade passiva, porém é importantíssimo que não haja a presença de água.

O ensaio de adesividade visual, realizado de acordo com a norma DNER-ME 078/94 e utilizando ligante convencional 50/70, apresentou como satisfatório apenas o resultado da adesividade ao ligante betuminoso da pedra P1, os demais

agregados, após as 72 horas à 40°C em água destilada, tiveram descolamento da película betuminosa, caracterizando-se assim como adesividade não satisfatória.

Embora os resultados dos ensaios de adesividade de acordo com a norma tenham sido, quase que em sua totalidade, considerados não satisfatórios, procurou-se estabelecer de forma visual, o que seriam considerados resultados melhores, ou seja, quando o betume cobre todo o material ficando apenas algumas pontuações da rocha aparecendo, até os muito ruins/péssimos, ou seja, onde a rocha fica quase totalmente exposta. Para melhor entendimento criou-se um índice conceitual e numérico da classificação visual da adesividade dos agregados ao ligante CAP 50/70 apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Ranking de adesividade visual CAP 50/70

Nome da Amostra	Adesividade visual CAP 50/70	Índice
P1	Excelente	50
P13	Muito boa	45
P2	Muito boa	40
P9	Boa	35
P11/P12	Boa	30
P4	Boa	30
P15	Boa	25
P3	Ruim	20
P10	Ruim	15
P5	Muito ruim	10
P6/P7/P8	Péssimo	5
P14	Péssimo	0

Fonte: Autora, (2019).

Os resultados dos ensaios de adesividade podem ser vistos nas Figuras 33 e 34. A apresentação dos resultados segue a sequência sugerida da qualidade do resultado do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso, do melhor para o pior. Mesmo com alguns materiais tendo pouco descolamento da película de ligante, recomenda-se o uso de dope ou de ligantes modificados, para que haja melhora no poder molhante, mais eficiência na mistura e não ocorra descolamento de película do ligante sobre os agregados.

Figura 33 - Resultado do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso



P1 Ígnea Vulcânica Básica  
Basalto - Satisfatório



P13 Ígnea Hipabissal  
Olivina Diabásio - Não satisfatório



P2 Ígnea Vulcânica Básica  
Basalto com Olivina – Não satisfatório



P9 Ígnea Vulcânica Básica  
Olivina Basalto – Não satisfatório



P11/P12 Metamórfica  
Mármore - Não satisfatório



P4 Ígnea Vulcânica Básica  
Basalto - Não satisfatório

Figura 34 - Resultado do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso

P15 Vulcânica Hipabissal  
Diabásio – Não satisfatórioP3 Ígnea Vulcânica Ácida  
Riodacito – Não satisfatórioP10 Ígnea Plutônica Ácida  
Sienogranito – Não satisfatórioP5 Ígnea Plutônica Ácida  
Sienogranito – Não satisfatórioP6/P7/P8 Ígnea Vulcânica Intermediária  
Dacito – Não satisfatórioP14 Ígnea Vulcânica Intermediária  
Andesito – Não satisfatório

Fonte: Autora (2019)

#### 4.3.1 Análise comparativa a partir dos resultados dos ensaios de lâmina petrográfica, FRX e adesividade

A partir dos resultados do ensaio de adesividade, foi criada uma escala comparativa das pedreiras que apresentaram melhor aderência entre o ligante e o agregado utilizado, como já apresentado anteriormente. Com o objetivo de isolar a questão referente ao agregado, optou-se por utilizar o mesmo ligante CAP 50/70 em todas as amostras na realização do ensaio de adesividade.

Percebe-se, a partir da observação das Figuras 33 e 34 e da Tabela 10, que inicialmente as rochas básicas, como a P1, P2, P9 e P4, apresentaram um resultado mais favorável, mesmo sendo considerado não satisfatório pela norma de adesividade visual, enquanto rochas de composição intermediária a ácida, como a P3, P10, P5 e P14, apresentaram um comportamento menos favorável e igualmente não satisfatório em relação ao cobrimento do agregado pelo ligante. Um dos fatores que explica essa situação está relacionado com o teor de sílica da rocha (acidez). Quanto mais ácida a rocha e maior o tamanho dos minerais que a compõem, como no caso dos sienogranitos P5 e P10, pior a adesividade. Conforme Frazão (2002), quando a rocha é fraturada, cortada ou britada, os planos de fratura ou corte seccionam os tetraedros de sílica criando cargas elétricas insatisfeitas na superfície da rocha de sinal negativo, incompatível com as cargas elétricas do betume que, em geral, também possuem caráter negativo, ou seja, por serem cargas de mesma polaridade irão se repelir. A pedreira P11/P12 encontra-se deslocada da Tabela 10 por ser classificada como rocha metamórfica, a classificação de acidez se aplica apenas à rochas ígneas, apresentou-se então apenas a título de comparação.

Quando a rocha é de caráter básico existirão elementos alcalinos (K, Na, etc) ou alcalino terrosos (Ca, Mg, etc) que geram cargas positivas o que torna a adesão do ligante (comumente carga negativa) mais eficaz (FRAZÃO, 2002). Assim sendo, com base na petrografia e nos resultados da FRX, adotou-se para este trabalho que teores de sílica acima de 38%, com presença de minerais de quartzo na amostra, como sendo um limitador para que as ligações agregado-ligante se deem de forma menos eficaz, resultando em uma adesividade baixa. Vale ressaltar que a sílica faz parte da composição de diversos minerais como os Plagioclásios  $[(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8]$ , Feldspatos  $[(K,Na,Ca)(Si,Al)_4O_8]$  e quando a rocha possui sílica em excesso forma quartzo ( $SiO_2$ ) que é um mineral formado por sílica pura.

Tabela 10 - Classificação das rochas quanto a acidez e ranking de adesividade quando comparados parâmetros dos ensaios tecnológicos dos agregados minerais

		Nome da Amostra	Nome da rocha	Textura	Textura AIMS <sup>1</sup>	Composição FRX (%)				Relação Fe/Si	Relação Ca/K	Abs. <sup>1</sup> (%)	Sanid. <sup>1</sup> (%)	Abr. <sup>1</sup> (%)	Adesividade visual CAP 50/70
						Fe	Si	Ca	K						
<b>Básica</b>	<b>Vulcânica</b>	P1	Basalto	Fanerítica inequigranular porfírica fina	679-724	38,2	25,05	20,39	2,47	1,52	8,26	1	3	23	Excelente
		P2	Basalto com olivina	Fanerítica inequigranular porfírica muito fina a fina	737-774	41,26	24,91	17,13	3,06	1,66	5,60	1,4	3,2	16	Muito boa
		P9	Olivina-Basalto	Fanerítica inequigranular porfírica muito fina	624-704	36,75	27,58	22,07	4,42	1,33	4,99	2,6	4,7	12	Boa
		P4	Basalto	Fanerítica inequigranular porfírica muito fina	465-561	29,86	33,86	21,17	2,26	0,88	9,37	0,9	1,9	11	Boa
	<b>Hipabissal</b>	P13	Olivina-Diabásio	Fanerítica inequigranular porfírica muito fina a fina	661-653	34,63	29,68	18	3,52	1,17	5,11	1,7	1,2	17	Muito boa
		P15	Diabásio	Fanerítica inequigranular porfírica fina a média	428-532	33,87	27,11	21,36	2,43	1,25	8,79	1	16,5	14	Boa
<b>Intermediária</b>	<b>Vulcânica</b>	P14	Andesito	Fanerítica inequigranular porfírica fina	701	33,34	30,01	16,5	6,6	1,11	2,50	1	5,8	13	Péssimo
		P6/P7/P8	Dacito	Fanerítica inequigranular porfírica fina	561-465	26,32	37,91	11,72	10,42	0,69	1,12	2,9	3,7	12	Péssimo
<b>Ácida</b>	<b>Vulcânica</b>	P3	Riodacito	Afanítica a fanerítica muito fina	349-369	24,22	38,44	9,48	13,99	0,63	0,68	2,8	0,4	15	Ruim
	<b>Plutônica</b>	P10	Sienogranito	Fanerítica inequigranular porfírica grossa	253-240	13,06	48,17	7	20,28	0,27	0,35	1	4,8	20	Ruim
		P5	Sienogranito	Fanerítica inequigranular porfírica grossa a muito grossa	196-168	10,84	50,78	4,14	22,1	0,21	0,19	0,5	5,4	26	Muito ruim
	<b>Metamórfica</b>	P11/P12	Mármore	Muito fina	485-470	5	3,09	80,08	0,62	1,62	129,16	0,4	4,3	15	Boa

Nota<sup>1</sup>: Dados da Tabela 14 pág. 99 e Tabela 15 pág. 100 da dissertação de Faccin (2018).

Fonte: Autora (2019).

Observando os resultados do ensaio de FRX, do qual se obtiveram os principais elementos constituintes da rocha, verificou-se que amostras com maior adesividade apresentaram um alto conteúdo de ferro (Fe) e uma relação entre ferro e sílica (Fe/Si) maior que 1 (um). A presença de ferro é verificada na mineralogia, em minerais opacos – como a magnetita – e minerais máficos, como piroxênio e olivinas. Para as amostras analisadas, teores de Ca mais elevados (acima de 17%) e uma relação Ca/K acima de 5 (cinco) indicam melhor adesividade pois são valores encontrados em rochas básicas (P1, P2, P9, P4, P13 e P15).

Outro fator que parece interferir nos resultados da adesividade é a textura e o grau de alteração dos minerais constituintes da rocha. Procurando estabelecer uma correlação da adesividade com estas propriedades, buscou-se primeiramente associar os valores obtidos para textura (rugosidade) do ensaio AIMS de Faccin (2018), com a textura e grau de alteração mineralógica descrita na petrografia e posteriormente com os resultados de adesividade.

Rochas com texturas finas descritas pela petrografia como fanerítica muito fina a fina e todas microporfíricas (amostras P1, P2, P9 e P4), apresentaram valores de AIMS entre 465-774, sendo classificadas como muito rugosas, mostraram adesividades melhores. Rochas com texturas mais grossa como as faneríticas médias a grossas (sienogranitos) apresentam valores de AIMS mais baixos (entre 253 e 168), classificados como macios e apresentaram adesividades piores.

Valores baixos de AIMS em rochas de granulometria grossa são explicados pelo fato de o ensaio avaliar a superfície do mineral, que no caso de sienogranitos, por exemplo, são grandes (comumente a superfície dos minerais são lisas e polidas). Já no caso de rochas mais finas, o que o equipamento avalia é o conjunto de mais de um mineral (melhora a rugosidade) tratando-se, portanto, de uma questão de escala de observação do equipamento e da textura da rocha (tamanho do grão).

Vale destacar que esta relação sofre influência da alteração mineralógica das amostras das rochas, pois o intemperismo gera argilominerais capazes de suavizar as inconformidades da superfície da rocha ensaiada, ou seja, a sanidade das amostras poderá afetar o valor da rugosidade. Tal fato pode corroborar para a justificativa dos valores mais baixos do ensaio AIMS para as amostras com a presença de alterações.

Rochas finas que mostram minerais alterados ou bordas de alteração tem valores de AIMS mais baixos (muda a configuração do “relevo” da imagem obtida pelo equipamento) como é o caso da P3 (AIMS em torno de 369), que tem uma textura fina a muito fina, porém, apresenta minerais alterados e zeolitas preenchendo as amígdalas. Além disso, foi verificado que a rugosidade melhora a adesividade e que, esta propriedade apresenta uma tendência a ser maior para rochas que possuem textura muito fina a fina, e menor (macias), para rochas de textura grossa ou as finas que possuam minerais alterados ou valores de sanidade mais elevados.

As alterações mineralógicas, conforme Frazão (2002) levam a remoção das bases (elementos alcalinos e alcalinos terrosos) o que torna ácida a superfície do agregado mesmo que este seja de caráter básico (incompatibilidade físico-química). Desta forma é de se esperar que a adesividade seja pior em rochas mais alteradas (observado na análise petrográfica) ou que tenham valores do ensaio de sanidade também maiores como as rochas P15, P14, P10 e P5, por exemplo.

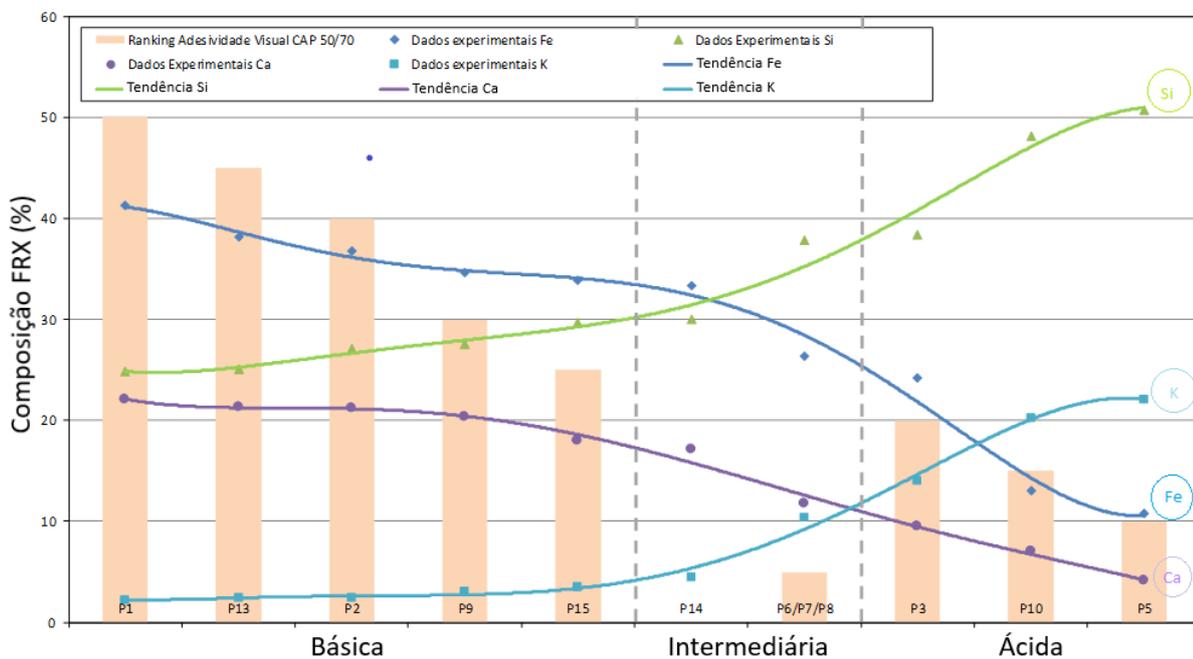
Dessa maneira, para o presente trabalho, é possível afirmar que o teor de sílica apresenta uma forte influência nos resultados do ensaio de adesividade. Rochas intermediárias e ácidas, com o teor de Si igual ou superior a 38% e com a presença do mineral quartzo apresentam mais baixa adesividade. Considerando ainda a relação química tem-se que uma elevada relação Fe/Si (acima de 1), valores de cálcio acima de 20% e a relação Ca/K acima de 5 melhoram consideravelmente a cobertura da película que recobre o agregado no ensaio de adesividade (Figura 35).

Quando se utiliza o mesmo ligante no ensaio preconizado pela norma DNER-ME 078/94, percebe-se que a composição química das rochas fornece uma pista importante sobre o comportamento do agregado frente a adesividade ao ligante betuminoso. As relações Fe/Si e Ca/K também aparecem como bons indicadores para o comportamento dos agregados. Na Figura 35 observa-se no gráfico representado por barras a queda do ranking de adesividade visual CAP 50/70 que ocorre na direção das rochas básicas para as rochas ácidas, as linhas de tendência, assim como os valores de dados experimentais, do Fe e do Ca também decrescem na mesma direção, já as linhas de tendência da Si e do K tem comportamento contrário na mesma direção, crescendo.

Pode-se observar também a partir da Figura 35 que as pedreiras com agregados básicos estão colocadas mais à esquerda do gráfico estando relacionadas

às porcentagens de composição do FRX. Segundo a literatura agregados intermediários deveriam apresentar adesividade visual melhor classificada quando comparados a agregados ácidos, porém isso não ocorre para as amostras dessa pesquisa, o que pode justificar os piores resultados de adesividade visual para as pedreiras P14 e P6/P7/P8 é o grau de alterabilidade da superfície dos agregados e não sua composição química diretamente. Já nas pedreiras classificadas como ácidas, mais à direita do gráfico, o ranking de adesividade visual passa a decrescer novamente conforme o aumento da porcentagem de Si.

Figura 35 - Relação entre composição FRX, acidez das rochas e a classificação da adesividade visual CAP 50/70



Fonte: Autora, (2019).

Verifica-se, a partir disso, que é no tipo de rocha que residem as variações no grau de adesividade, causadas por suas variadas composições mineralógicas que influenciam diretamente a ligação entre betume e agregado por meio das forças de atração eletrostáticas.

#### 4.4 DANO POR UMIDADE INDUZIDA - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA (RRT)

O ensaio de dano por umidade induzida avaliou a propriedade de adesividade em 21 misturas asfálticas desta pesquisa, considerando o efeito deletério da água. Pelo fato de já terem sido utilizadas também nas pesquisas de Faccin (2018) e Schuster (2018) não houve disponibilidade de massa das misturas U8-DNIT-FXC-50/70, U5-DNIT-FXB-60/85 e U6-DNIT-FXC-60/85. Por possuírem os mesmos ligantes e faixas granulométricas já representadas entre as outras 21 misturas não há grandes prejuízos para compreensão do ensaio e análise dos resultados desta pesquisa.

As amostras foram separadas em dois grupos com três corpos de prova cada um, Grupo 1 e Grupo 2, com e sem condicionamento, respectivamente. As médias dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras com e sem condicionamento são apresentados na Tabela 11, assim como seus desvios-padrões e coeficientes de variação, bem como os valores da resistência retida à tração (RRT). Nota-se que os resultados de RT para maioria das misturas nos dois ciclos apresentam baixos coeficientes de variação (CV), indicando um conjunto de dados homogêneos.

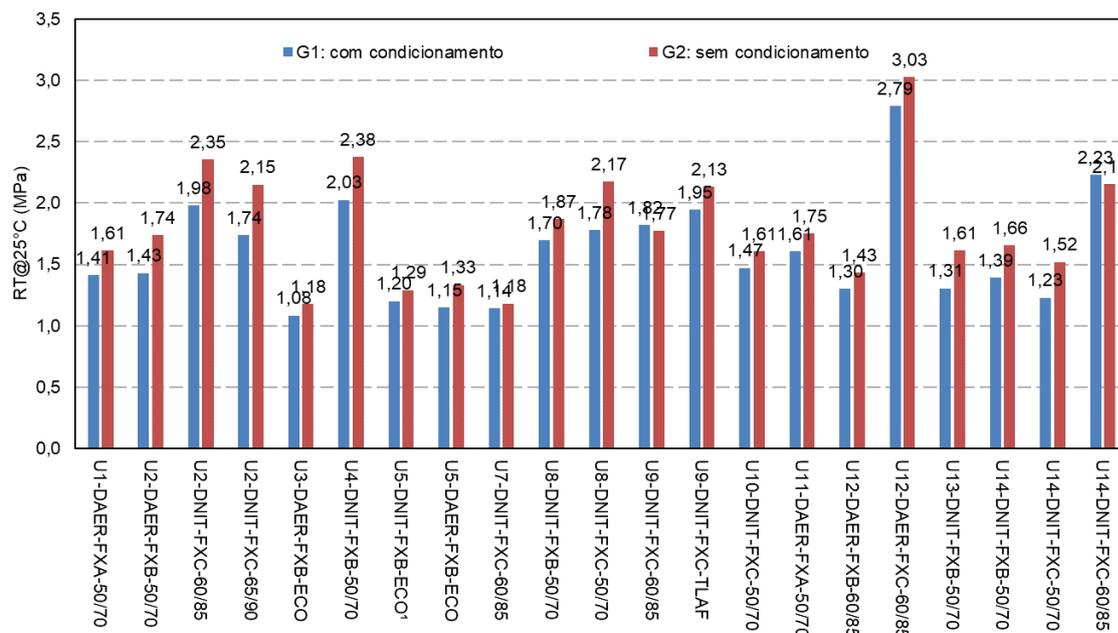
Os resultados da média do RT de cada mistura são ilustrados graficamente na Figura 36, indicando que todos os valores atenderam ao limite mínimo preconizado pela Norma do DNIT ES031/2006, que deve ser de no mínimo 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento. Pode-se observar que para grande maioria das misturas houve uma queda no valor da resistência à tração por compressão diametral após o condicionamento, indicando suscetibilidade ao dano por umidade. Em algumas misturas esta suscetibilidade fica mais evidente devido à maior diferença entre os resultados de RT entre os grupos com e sem condicionamento, como são os casos das misturas U2-DNIT-FXC-65/90 e U8-DNIT-FXC-50/70. Verifica-se ainda que as misturas U9-DNIT-FXC-60/85 e U14-DNIT-FXC-60/85 obtiveram valores de G2 maiores que G1, indicando menor suscetibilidade ao dano por umidade.

Tabela 11 - Valores de Resistência Retida à Tração para o ensaio de dano por umidade induzida

MISTURAS	GRUPO 1 (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	GRUPO 2 (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	RRT (%)
U1-DAER-FXA-50/70	1,41	0,074	5,24	1,61	0,241	14,98	87,70
U2-DAER-FXB-50/70	1,43	0,061	4,25	1,74	0,074	4,24	82,22
U2-DNIT-FXC-60/85	1,98	0,051	2,56	2,35	0,073	3,09	84,14
U2-DNIT-FXC-65/90	1,74	0,045	2,60	2,15	0,076	3,53	80,95
U3-DAER-FXB-ECO	1,08	0,026	2,36	1,18	0,049	4,18	91,97
U4-DNIT-FXB-50/70	2,03	0,135	6,66	2,38	0,082	3,47	85,29
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	1,20	0,089	7,41	1,29	0,040	3,12	93,10
U5-DAER-FXB-ECO	1,15	0,165	14,36	1,33	0,109	8,16	86,09
U7-DNIT-FXC-60/85	1,14	0,044	3,87	1,18	0,056	4,73	96,53
U8-DNIT-FXB-50/70	1,70	0,102	6,02	1,87	0,120	6,40	90,79
U8-DNIT-FXC-50/70	1,78	0,033	1,88	2,17	0,252	11,57	81,78
U9-DNIT-FXC-60/85	1,82	0,081	4,46	1,77	0,031	1,76	102,93
U9-DNIT-FXC-TLAF	1,95	0,138	7,07	2,13	0,061	2,87	91,20
U10-DNIT-FXC-50/70	1,47	0,071	4,85	1,61	0,070	4,37	91,51
U11-DAER-FXA-50/70	1,61	0,023	1,40	1,75	0,025	1,45	91,86
U12-DAER-FXB-60/85	1,30	0,022	1,70	1,43	0,057	4,00	90,69
U12-DAER-FXC-60/85	2,79	0,047	1,69	3,03	0,067	2,22	92,26
U13-DNIT-FXB-50/70	1,31	0,062	4,75	1,61	0,116	7,16	80,89
U14-DNIT-FXB-50/70	1,39	0,019	1,37	1,66	0,109	6,58	83,94
U14-DNIT-FXC-50/70	1,23	0,032	2,61	1,52	0,025	1,68	80,89
U14-DNIT-FXC-60/85	2,23	0,005	0,21	2,15	0,106	4,94	103,56

Fonte: Autora (2019)

Figura 36 - Comparação entre resultados de RT entre corpos de prova com condicionamento e sem condicionamento

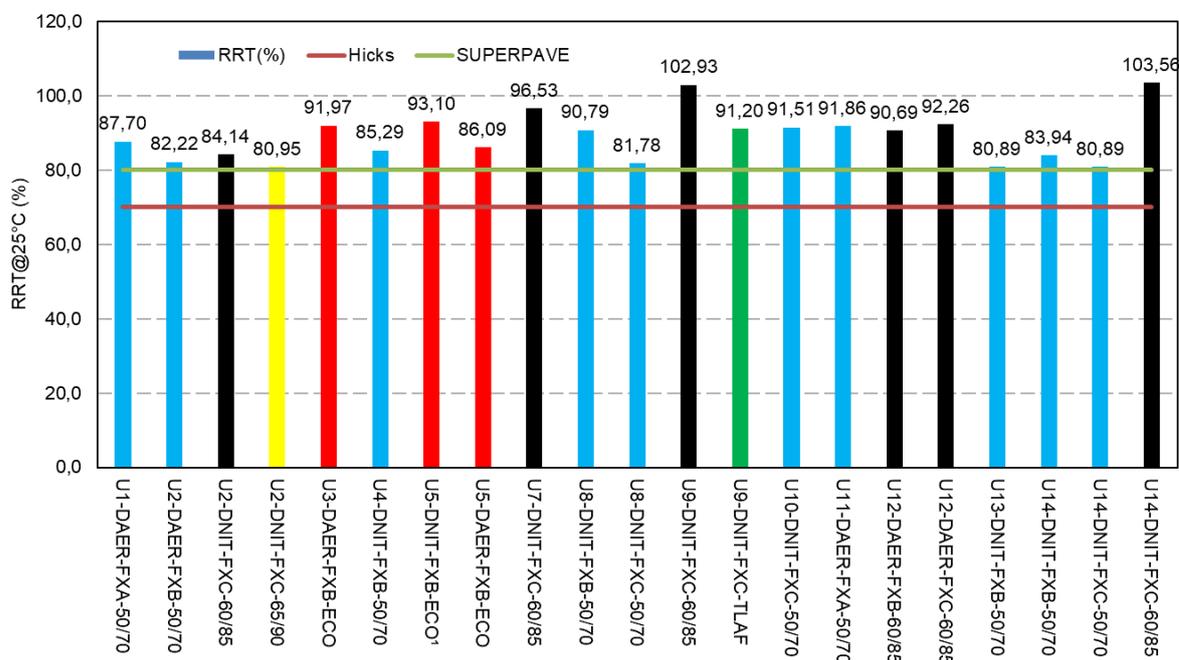


Fonte: Autora, (2019).

De acordo com a metodologia Superpave, os valores de referência preconizados para RRT são aqueles acima de 80% (EPPS et al, 2000, HOSSAIN, FAGER e MAAG, 2017). Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utiliza o limite de 70%. Esses limites são apresentados na Figura 37, assim como, os valores de RRT encontrados na presente pesquisa. Através dos resultados apresentados, é possível verificar que todas as misturas atendem o limite estabelecido por Hicks (1991) e também os 80% idealizados pela metodologia Superpave.

Todas as misturas, exceto U9-DNIT-FXC-60/85 e U14-DNIT-FXC-60/85, apresentaram valores que indicam perda de resistência por umidade induzida. As misturas U9-DNIT-FXC-60/85 e U14-DNIT-FXC-60/85 obtiveram valores de RT menores que RT' e consequentemente apresentam valores de RRT superiores a 100%. Este valor superior a 100% pode estar relacionado a variabilidade do ensaio de RT ligado ao grau de saturação (55 a 80%) e Vv (7± 1%).

Figura 37 - Resultados RRT entre corpos de prova de 21 misturas



Fonte: Autora, (2019).

Devido à variabilidade de resultados dentro de um mesmo grupo não foi possível detectar um padrão de aumento ou diminuição nos valores de RRT, quer seja relacionado ao ligante, à faixa granulométrica ou órgão executor. Buscou-se então fazer uma comparação levando em consideração à origem do agregado, ou seja, sua pedra de origem, o ranking criado para adesividade visual e a existência ou não de aditivos na mistura, com os resultados de RRT apresentados em ordem crescente. Tal correlação é apresentada na Tabela 12.

Valores de RRT menores indicam uma maior suscetibilidade ao dano por umidade, conseqüentemente indicando um pior desempenho da mistura à adesividade, tais valores são encontrados na parte superior da tabela, para misturas como U13-DNIT-FXB-50/70, U14-DNIT-FXC-50/70, U2-DNIT-FXC-65/90 e U8-DNIT-FXC-50/70. Já na parte inferior da tabela encontram-se as misturas com maiores valores de RRT, indicando menor suscetibilidade ao dano por umidade e conseqüente melhor desempenho da mistura à adesividade, tais valores foram encontrados para as misturas U5-DNIT-FXB-ECO, U7-DNIT-FXC-60/85, U9-DNIT-FXC-60/85 e U14-DNIT-FXC-60/85.

O que se destaca ao observar a Tabela 12, é que mesmo os agregados tendo sido classificados pelo ensaio de adesividade ao ligante betuminoso (adesividade visual) como não satisfatórios e ranqueados como ruim, muito ruim e péssimo, no ensaio de RRT os mesmos aparecem como tendo uma tendência favorável à adesividade da mistura. Isso pode ser explicado pela presença de aditivos como dope e cal nas misturas utilizadas no ensaio de dano por umidade induzida, sendo esses justamente melhoradores de adesividade. Observa-se ainda, a partir da tabela, que mesmo a mistura tendo um agregado bem classificado no ranking criado para adesividade ao ligante betuminoso por esta pesquisa, os resultados de RRT foram baixos indicando um pior desempenho à adesividade da mistura, possivelmente justificado pela inexistência de aditivos na mistura.

Quando analisadas as médias dos valores da Tabela 12, temos que os maiores valores de RRT são encontrados para misturas com ligantes modificados (RRT médio 92,78), seguidos das misturas com asfalto borracha (RRT médio 90,39) e a média mais baixa para misturas com ligante convencional CAP 50/70 (RRT médio 85,69) indicando, dessa forma, que as misturas com ligantes modificados são menos

suscetíveis ao dano por umidade do que as misturas com ligantes convencionais e consequente melhor desempenho à adesividade.

Tabela 12 - Resultados de RRT apresentados em ordem crescente com ranqueamento da adesividade visual e existência de aditivos na mistura

MISTURAS	GRUPO 1 (MPa)	GRUPO 2 (MPa)	Diferença G1/G2	RRT (%)	Pedreira	Adesividade visual (CAP 50/70)	Observações <sup>1</sup>
U13-DNIT-FXB-50/70	1,31	1,61	0,31	80,89	P14	Péssimo	-
U14-DNIT-FXC-50/70	1,23	1,52	0,29	80,89	P15	Boa	Cal
U2-DNIT-FXC-65/90	1,74	2,15	0,41	80,95	P2	Muito boa	-
U8-DNIT-FXC-50/70	1,78	2,17	0,40	81,78	P9	Boa	Cal
U2-DAER-FXB-50/70	1,43	1,74	0,31	82,22	P2	Muito boa	-
U14-DNIT-FXB-50/70	1,39	1,66	0,27	83,94	P15	Boa	Cal
U2-DNIT-FXC-60/85	1,98	2,35	0,37	84,14	P2	Muito boa	-
U4-DNIT-FXB-50/70	2,03	2,38	0,35	85,29	P4	Boa	-
U5-DAER-FXB-ECO	1,15	1,33	0,19	86,09	P5	Muito ruim	Evhoterm/Cal
U1-DAER-FXA-50/70	1,41	1,61	0,20	87,70	P1	Excelente	-
U12-DAER-FXB-60/85	1,30	1,43	0,13	90,69	P13	Muito boa	-
U8-DNIT-FXB-50/70	1,70	1,87	0,17	90,79	P9	Boa	Cal
U9-DNIT-FXC-TLAF	1,95	2,13	0,19	91,20	P10	Ruim	Dope
U10-DNIT-FXC-50/70	1,47	1,61	0,14	91,51	P11/P12	Boa	Cal
U11-DAER-FXA-50/70	1,61	1,75	0,14	91,86	P13	Muito boa	-
U3-DAER-FXB-ECO	1,08	1,18	0,09	91,97	P3	Ruim	Dope/Cal
U12-DAER-FXC-60/85	2,79	3,03	0,23	92,26	P13	Muito boa	-
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	1,20	1,29	0,09	93,10	P5	Muito ruim	Evhoterm/Cal
U7-DNIT-FXC-60/85	1,14	1,18	0,04	96,53	P6/P7/P8	Péssimo	Modificado na obra
U9-DNIT-FXC-60/85	1,82	1,77	-0,05	102,93	P10	Ruim	Dope
U14-DNIT-FXC-60/85	2,23	2,15	-0,08	103,56	P15	Boa	Cal

Nota<sup>1</sup>: Dados da Tabela 14 pág. 99 e 16 pág. 101 da dissertação de Faccin (2018).

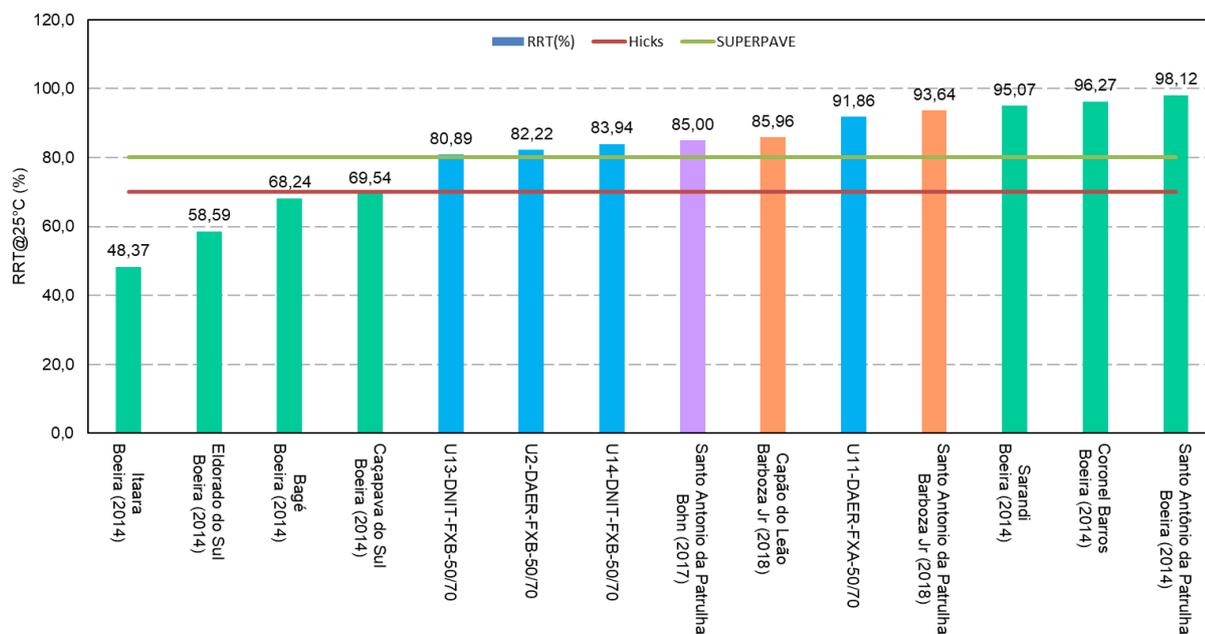
Fonte: Autora (2019).

O que fica evidente tanto na Figura 37 quanto na Tabela 12 é que no estado do Rio Grande do Sul, da maneira como as misturas vêm sendo produzidas, isto quer dizer, com a utilização de melhoradores de adesividade como cal e dope, bem como de ligantes modificados, não se observam grandes problemas de dano por umidade nas misturas, estando todas dentro dos parâmetros recomendados e resultando em valores de RRT satisfatórios.

Buscando compreender melhor a adesividade quando analisada a mistura completa plotou-se o gráfico apresentado na Figura 38, comparando as misturas dessa pesquisa que utilizaram apenas ligante convencional (CAP 50/70) sem nenhum tipo de melhorador de adesividade adicionado, com misturas referência das pesquisas de Boeira (2014), Bohn (2017) e Barboza Jr (2018) que também utilizaram apenas ligante convencional. Pode-se perceber que as primeiras quatro misturas

apresentadas no gráfico possuem valores baixos de RRT, indicando maior suscetibilidade ao dano por umidade induzida, tais misturas foram confeccionadas com agregados que podem ser classificados como ácidos e intermediários, corroborando com o indicativo de que a química do agregado pode dar pistas sobre o comportamento da mistura frente à adesividade. As outras misturas que obtiveram valores de RRT acima de 80% apresentam misturas, que em sua maioria, levam agregados classificados como básicos, mais uma vez contribuindo para as constatações já apresentadas, de que agregados básicos são menos suscetíveis ao dano por umidade induzida, resultando em melhor adesividade.

Figura 38 - Comparativo dos resultados de RRT (@25°C) de misturas com ligante convencional (CAP 50/70) desta pesquisa com misturas de referência de Boeira (2014), Bohn (2017) e Barboza Jr (2018)



Fonte: Autora, (2019).

#### 4.5 MÓDULO COMPLEXO

O ensaio para obtenção do Módulo Dinâmico ( $|E^*|$ ) e Ângulo de Fase ( $\phi$ ) foi executado segundo procedimentos da AASHTO T 342-11, porém, realizado em todas as frequências de carregamento que o *software UTS006 – SPT Dynamic Modulus Test* disponibiliza (25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01Hz). As temperaturas de ensaio foram -10, 4, 21, 37 e 54°C. Foram ensaiadas duas amostras para cada uma

das 24 misturas estudadas, em duas rodadas de ensaios, uma após cada um dos ciclos de dano induzido pela água, conforme protocolo descrito no item 3.3.2.2. As médias dos dados experimentais obtidos foram submetidas ao modelo reológico 2S2P1D para a construção do espaço Cole Cole, Diagrama de Black e das curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase das misturas. Importante ressaltar que todos os resultados foram comparados com os resultados de referência, obtidos por Faccin (2018).

Os sete parâmetros do modelo e as constantes C1 e C2, do WLF (William, Landel e Ferry), para cada uma das 24 misturas pesquisadas, constam nas Tabelas 13, valores de referência de Faccin (2018); Tabela 14, valores após primeiro ciclo (C1); e Tabela 15, valores após segundo ciclo (C2).

Tabela 13 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura obtidos por Faccin (2018)

Mistura	E*						WLF		
	E00	E0	K	h	$\delta$	$\tau E$ (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)
U1-DAER-FXA-50/70	150	34700	0,221	0,550	2,600	0,080	5000	25,68	195,76
U2-DAER-FXB-50/70	100	33800	0,210	0,560	2,700	0,150	2000	25,81	193,14
U2-DNIT-FXC-60/85	75	34600	0,210	0,550	2,600	0,130	10000	26,11	194,52
U2-DNIT-FXC-65/90	95	35200	0,215	0,610	2,700	0,220	10000	29,94	216,65
U3-DAER-FXB-ECO	30	24500	0,228	0,580	2,900	0,020	10000	19,06	152,11
U4-DNIT-FXC-50/70	50	32200	0,220	0,605	2,400	0,095	20000	20,20	152,23
U4-DNIT-FXB-50/70	79	32470	0,220	0,550	2,550	0,080	5000	19,53	152,07
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	89	30200	0,177	0,524	1,950	0,100	750	18,74	115,83
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	35	27900	0,238	0,565	3,60	0,045	20000	24,34	184,19
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	50	28100	0,220	0,550	3,00	0,050	5000	21,33	153,73
U6-DNIT-FXC-60/85	85	22800	0,192	0,468	2,55	0,600	10000	15,29	119,70
U7-DNIT-FXC-60/85	85	26000	0,210	0,520	2,50	0,370	6000	20,17	155,43
U8-DNIT-FXB-50/70	60	31200	0,250	0,580	2,400	0,210	20000	23,66	171,56
U8-DNIT-FXC-50/70	55	30000	0,225	0,570	2,800	0,130	1500	25,93	174,45
U9-DNIT-FXC-60/85	100	34200	0,210	0,570	2,100	0,350	1500	36,13	259,41
U9-DNIT-FXC-TLAF	60	31750	0,225	0,545	2,050	0,080	20000	21,05	151,84
U10-DNIT-FXC-50/70	115	27750	0,245	0,575	2,475	0,055	6000	19,47	151,71
U11-DAER-FXA-50/70	80	29000	0,225	0,575	2,450	0,130	6000	24,67	172,38
U12-DAER-FXB-60/85	90	31500	0,240	0,575	2,450	0,130	6000	21,61	152,07
U12-DAER-FXC-60/85	80	28550	0,198	0,500	2,450	0,500	6000	27,84	203,37
U13-DNIT-FXB-50/70	55	27980	0,175	0,535	1,900	0,080	550	28,31	200,53
U14-DNIT-FXC-50/70	70	26800	0,195	0,540	1,850	0,030	3500	25,60	184,30
U14-DNIT-FXB-50/70	45	28800	0,175	0,525	2,210	0,055	3500	16,20	119,06
U14-DNIT-FXC-60/85	45	30800	0,200	0,550	2,210	0,150	4500	22,15	158,18

Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

Fonte: Faccin (2018)

Tabela 14 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura após ciclo 1

Mistura	E*							WLF	
	E00	E0	K	h	$\delta$	$\tau E$ (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)
U1-DAER-FXA-50/70	39,39	34796	0,167	0,526	2,411	0,027	8719,	17,19	127,38
U2-DAER-FXB-50/70	31,27	36297	0,175	0,560	2,700	0,031	10000	31,03	230,13
U2-DNIT-FXC-60/85	29,86	35454	0,163	0,517	2,123	0,034	5421,	19,78	155,29
U2-DNIT-FXC-65/90	63,42	36003	0,193	0,534	2,291	0,026	2315,	19,53	155,76
U3-DAER-FXB-ECO	19,35	24159	0,221	0,543	2,275	0,012	10000	32,72	271,76
U4-DNIT-FXC-50/70	46,92	31543	0,185	0,553	1,983	0,023	6291,	46,12	354,46
U4-DNIT-FXB-50/70	41,17	33580	0,177	0,565	2,403	0,064	10000	26,59	194,75
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	13,37	28379	0,221	0,560	3,27	0,015	10000	38,18	277,90
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	19,81	33909	0,182	0,520	2,624	0,037	3539,	27,89	203,94
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	18,29	28490	0,186	0,549	2,84	0,024	5747,	38,56	270,86
U6-DNIT-FXC-60/85	14,72	27086	0,184	0,464	2,03	0,059	6886,	30,03	215,22
U7-DNIT-FXC-60/85	20,02	23561	0,158	0,443	2,30	0,094	10000	39,72	273,78
U8-DNIT-FXB-50/70	55,64	35188	0,217	0,638	3,903	0,301	1930,	31,65	229,19
U8-DNIT-FXC-50/70	28,47	33657	0,181	0,550	2,028	0,028	10000	21,75	157,27
U9-DNIT-FXC-60/85	15,49	32316	0,173	0,514	2,476	0,035	10000	20,22	143,14
U9-DNIT-FXC-TLAF	76,94	30583	0,172	0,500	2,287	0,140	10000	31,31	225,10
U10-DNIT-FXC-50/70	37,74	34970	0,189	0,564	2,265	0,050	10000	28,21	212,40
U11-DAER-FXA-50/70	23,02	28602	0,181	0,583	2,477	0,085	559,2	23,01	164,43
U12-DAER-FXB-60/85	70,00	26800	0,195	0,540	1,850	0,030	3500	20,77	155,40
U12-DAER-FXC-60/85	48,65	31586	0,167	0,521	2,017	0,017	10000	21,88	167,63
U13-DNIT-FXB-50/70	51,43	30767	0,179	0,539	2,341	0,058	6269,	46,04	355,48
U14-DNIT-FXC-50/70	11,04	28669	0,223	0,591	2,579	0,066	10000	21,75	169,39
U14-DNIT-FXB-50/70	18,21	25236	0,199	0,483	3,763	0,104	10000	49,83	378,32
U14-DNIT-FXC-60/85	27,93	26361	0,212	0,521	3,127	0,339	10000	52,58	360,94

Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

Fonte: Autora (2019)

Tabela 15 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura após ciclo 2

Mistura	E*						WLF		
	E00	E0	K	h	$\delta$	$\tau E$ (s)	$\beta$	C1	C2 (°C)
U1-DAER-FXA-50/70	11,78	34305	0,176	0,536	2,561	0,024	10000	30,94	211,64
U2-DAER-FXB-50/70	10,00	33664	0,200	0,551	2,729	0,043	10000	34,50	246,34
U2-DNIT-FXC-60/85	10,00	35459	0,187	0,514	2,557	0,042	1004,	25,81	186,38
U2-DNIT-FXC-65/90	26,42	36231	0,195	0,504	2,100	0,018	7655,	30,08	232,44
U3-DAER-FXB-ECO	10,00	21909	0,251	0,557	2,468	0,012	10000	48,84	354,46
U4-DNIT-FXC-50/70	43,51	30521	0,176	0,572	2,291	0,039	6734,	21,61	152,07
U4-DNIT-FXB-50/70	10,00	35681	0,156	0,552	2,327	0,046	10000	20,20	152,23
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	10,00	28426	0,212	0,578	3,49	0,009	10000	24,34	184,19
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	78,80	33229	0,178	0,521	2,252	0,037	5256,	38,42	282,08
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	18,18	30876	0,189	0,496	2,39	0,013	10000	21,33	153,73
U6-DNIT-FXC-60/85	32,29	27562	0,164	0,516	2,26	0,041	6972,	20,17	155,43
U7-DNIT-FXC-60/85	14,08	23944	0,147	0,449	2,34	0,116	10000	15,29	119,70
U8-DNIT-FXB-50/70	47,33	40438	0,176	0,592	2,433	0,046	1517,	36,13	259,41
U8-DNIT-FXC-50/70	10,00	36149	0,185	0,552	2,041	0,028	10000	21,05	151,84
U9-DNIT-FXC-60/85	20,97	31179	0,212	0,573	2,901	0,071	1510,	37,75	271,83
U9-DNIT-FXC-TLAF	44,98	30791	0,197	0,540	2,970	0,200	5983	31,97	240,37
U10-DNIT-FXC-50/70	14,31	35451	0,185	0,549	2,223	0,049	10000	23,66	171,56
U11-DAER-FXA-50/70	12,79	30183	0,172	0,607	3,035	0,034	1530,	15,30	113,04
U12-DAER-FXB-60/85	23,42	25436	0,205	0,512	2,404	0,032	10000	21,82	171,35
U12-DAER-FXC-60/85	49,86	31246	0,186	0,544	1,961	0,023	6333,	24,45	189,75
U13-DNIT-FXB-50/70	30,77	28596	0,187	0,576	3,041	0,051	6239,	24,67	172,38
U14-DNIT-FXC-50/70	10,00	30493	0,184	0,605	3,003	0,046	4352,	25,26	176,79
U14-DNIT-FXB-50/70	30,62	26477	0,200	0,582	4,079	0,101	3666	22,96	159,46
U14-DNIT-FXC-60/85	66,65	26793	0,193	0,599	4,798	0,388	1108,	18,44	132,19

Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

Fonte: Autora (2019)

O espaço Cole Cole apresenta a parte real E1, no eixo das abscissas, e a parte imaginária E2, no eixo das ordenadas, e é semelhante a um arco de círculo. Com E1 pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E2 o comportamento viscoso irreversível do material devido a dissipação de energia.

Na Figura 39 estão plotadas as médias das amostras dos valores de referência em (a), a média para as amostras após ciclo 1 (C1) em (b) e a média para amostras após o ciclo 2 (C2) de danificação por umidade em (c). Por meio das figuras fica claro que os dados formam curvas de formato semicircular, o qual era esperado para o Cole-Cole.

Faccin (2018) ao analisar o plano Cole-Cole com todas as misturas notou diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante. Esse padrão de comportamento se mantém após a ciclagem. O autor ainda destaca o valor mais baixo de E2 e E1 da mistura U7-DNIT-FXC-60/85,

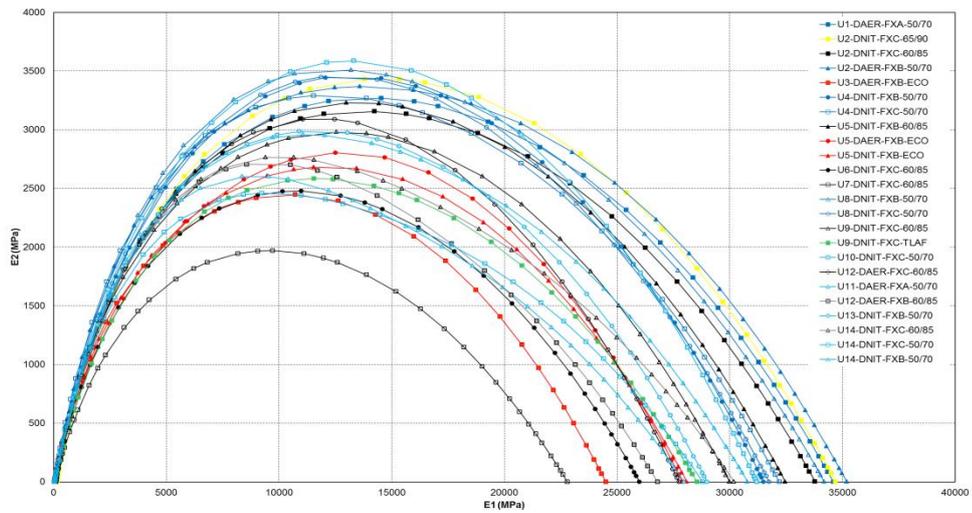
indicando uma menor tendência viscosa da mistura em relação às demais (há relativamente menos energia dissipada sob carga), inferindo que a mesma apresenta maior capacidade de atenuação dos esforços e retorno às condições iniciais.

Após a ciclagem, de modo geral, todas as misturas apresentaram queda no valor de E2, sendo esta queda mais acentuada após o primeiro ciclo. Após a ciclagem o valor de E2 e E1 continuou sendo o mais baixo para a mistura U7-DNIT-FXC-60/85. A mistura U14-DNIT-FXC-50/70 apresenta queda mais acentuada no valor de E2 após o primeiro ciclo, em relação à ordem de grandeza de queda das outras misturas, ou seja, se distanciando um pouco mais, o que indica que essa mistura apresenta mobilização do esqueleto mineral, bem como maior dissipação de energia. Já as misturas com ligante AMP 65/90, com asfalto borracha e TLA Flex apresentaram menor variação de E2 após ciclagem.

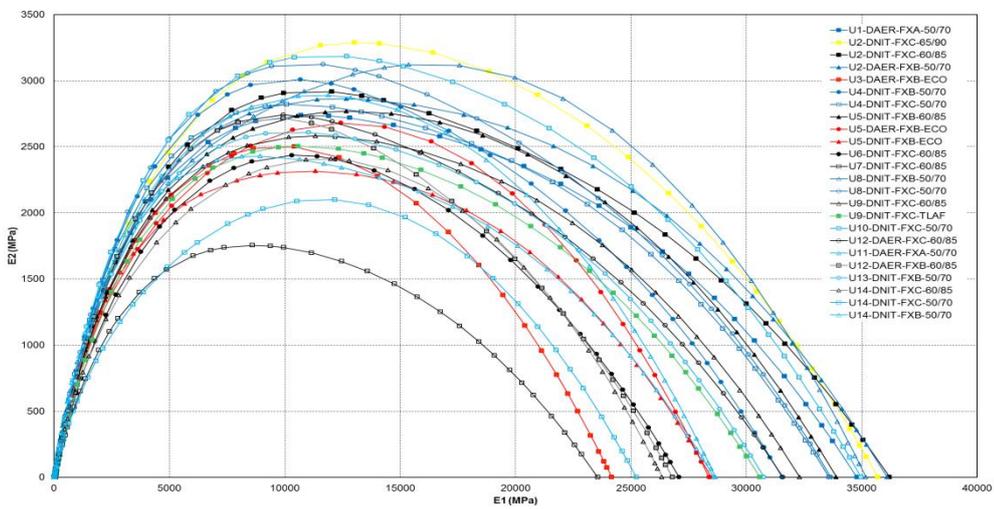
Assim como para Faccin (2018), ao se analisar a parte real E1, não fica claro uma tendência das misturas em função do tipo de ligante. Assim como para o E2, nota-se elevada variação de E1 para misturas com ligante modificado e CAP 50/70, demonstrando que além do tipo de ligante, as características da mistura e agregado também contribuem no comportamento reológico.

De modo geral misturas com ligante modificado apresentam um menor comportamento viscoso irreversível que misturas com ligante convencional, ou seja, ao se deformar retornam ao seu estado original com maior facilidade. Misturas com ligante convencional o esqueleto mineral é mais solicitado e ocorre uma maior dissipação de energia por atrito interno, o que representa uma situação considerada de maior severidade.

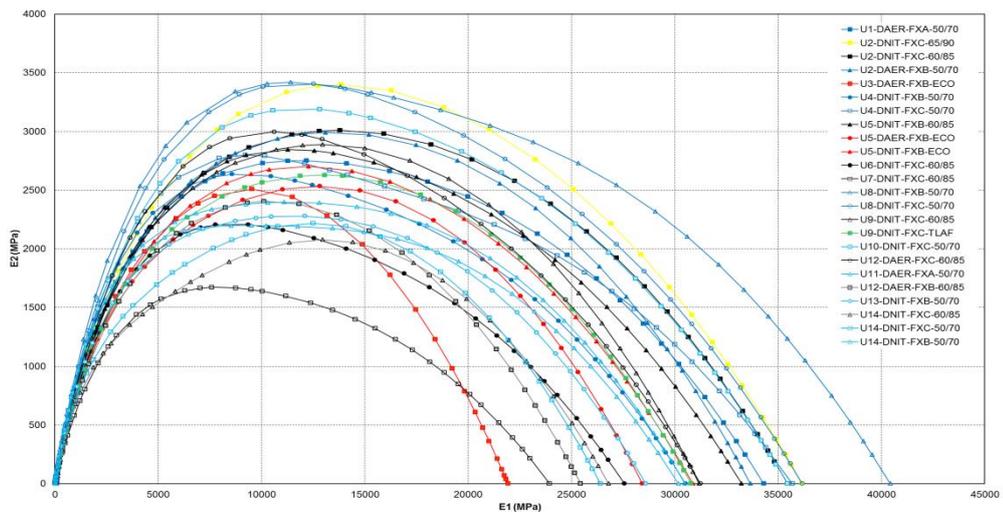
Figura 39 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora, (2019).

A Figura 40 apresenta a representação gráfica dos resultados no Diagrama Black de todas as misturas, comparando os resultados obtidos por meio da modelagem 2S2P1D das referências de Faccin (2018) em (a) e após os ciclos de danificação, C1 (b) e C2 (c). A partir da análise dos dados no diagrama Black é possível verificar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase para diferentes temperaturas.

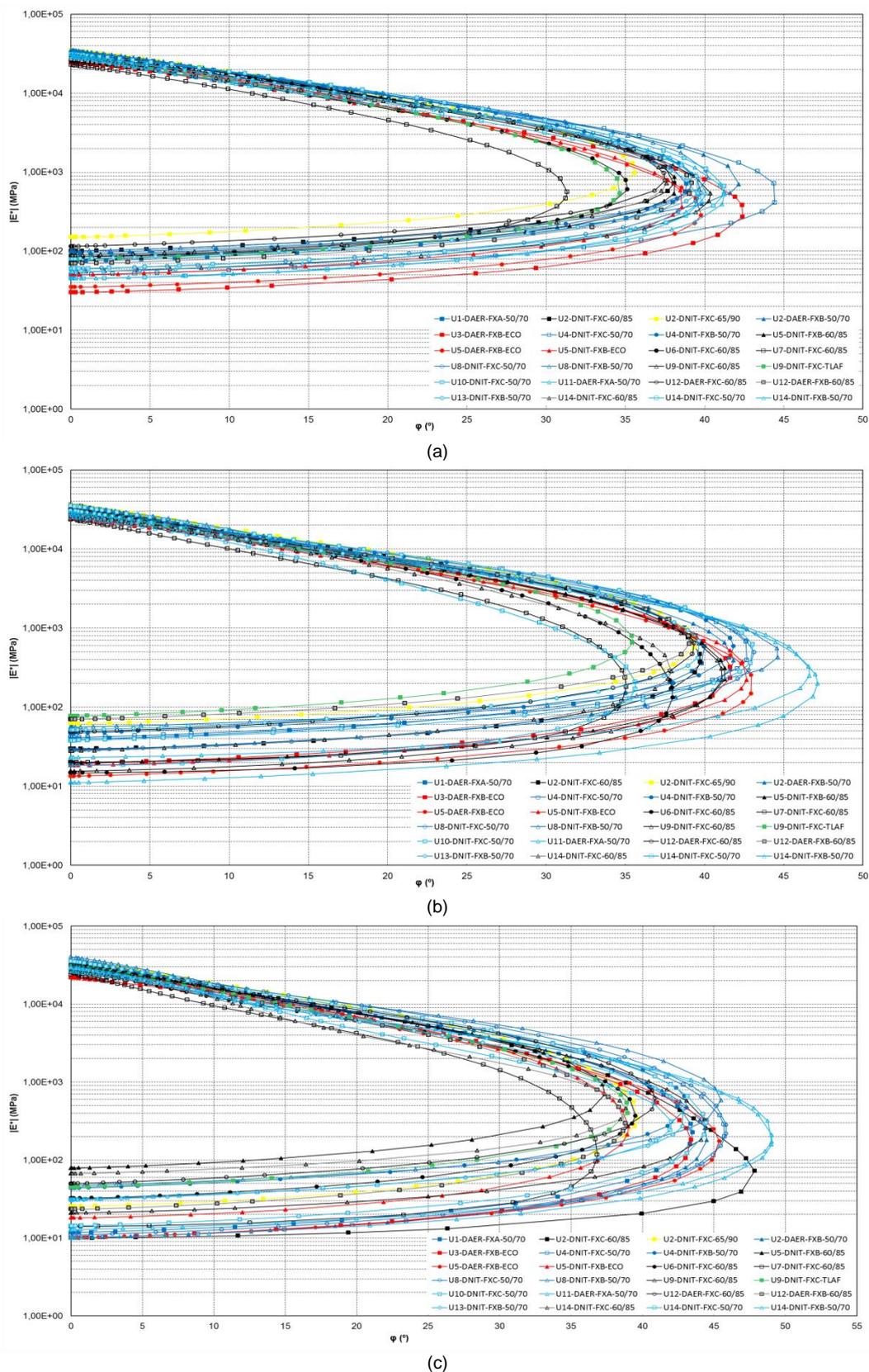
É possível perceber que até 37°C a temperatura tem efeito de aumento no ângulo de fase. A partir desse ponto, ou seja, para temperaturas superiores (54°C), o valor do ângulo de fase ( $\varphi$ ) passa a diminuir. Pode-se compreender também, com análise do gráfico, que com o aumento da temperatura o módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) diminui.

Como constatado por Faccin (2018), os resultados indicam que as misturas com CAP 50/70 apresentam, em geral, maiores ângulos de fase em relação às misturas com asfaltos modificados, sinalizando que no comportamento dessas misturas a parcela viscosa é mais atuante que a elástica. Tal comportamento se mantém após os ciclos de danificação por umidade induzida, onde as misturas com CAP 50/70 ainda apresentam maiores valores de ângulo de fase. Faccin (2018) ainda observa que os menores ângulos de fase para as misturas com asfalto modificado, exceção às com asfalto borracha, demonstram que a adição de polímeros aumenta a parcela elástica da mistura, inferindo-se que as mesmas apresentam em campo uma maior resistência à deformação permanente.

Para maioria das misturas estudadas percebe-se que o aumento mais significativo do valor do ângulo de fase ocorre após o primeiro ciclo de danificação por umidade induzida, após o segundo ciclo o aumento no ângulo de fase foi menos expressivo. Já as misturas com asfalto borracha e TLA Flex após o primeiro ciclo praticamente mantiveram seus valores máximos de ângulo de fase, apenas após o segundo ciclo de danificação é possível observar um aumento significativo de ângulo de fase para estas misturas.

Pode-se afirmar, de maneira geral, que as misturas em utilização no estado do RS apresentam diferentes comportamentos no domínio viscoelástico linear, o que pode ser explicado devido às diferentes características das curvas granulométricas, agregados e tipo de ligante.

Figura 40 - Diagrama Black, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade



Fonte: Autora, (2019).

Para descrever e representar as características viscoelásticas de ligantes e misturas asfálticas, pesquisadores têm se utilizado das curvas mestras, pois estas permitem que se façam observações de uma ampla faixa de temperaturas e frequências. Tendo em vista o comportamento termo reológico das misturas, a partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, foram construídas curvas mestras, através do princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP - *Time-Temperature Superposition Principle*). As curvas foram ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D.

De maneira geral, verifica-se que o módulo dinâmico cresce com o aumento da frequência, independentemente do tipo de mistura asfáltica. Nas altas frequências, ocorre um menor tempo de carregamento, limitando a manifestação de deformações viscoelásticas, ou seja, praticamente só existem deformações elásticas no material. Nas baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, e faz revelar deformações viscoelásticas do material. A avaliação do comportamento viscoelástico das misturas é válida para a faixa de temperatura de realização do ensaio, ou seja, de -10 a 54°C.

As análises nas altas frequências correspondem às baixas temperaturas, e nas baixas frequências às altas temperaturas. Às altas frequências estão relacionadas a avaliação do dano por trincamento térmico no revestimento asfáltico, incomum no Brasil devido ao clima tropical. As temperaturas muito baixas podem levar o revestimento asfáltico ao trincamento por retração, e ainda, a um grande enrijecimento, de tal forma que, se a camada asfáltica possui pouca espessura e é construída sobre materiais muito deformáveis, pode acelerar o processo de fadiga do revestimento. Às baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformação permanente na mistura asfáltica, enquanto nas temperaturas intermediárias, ao dano por fadiga.

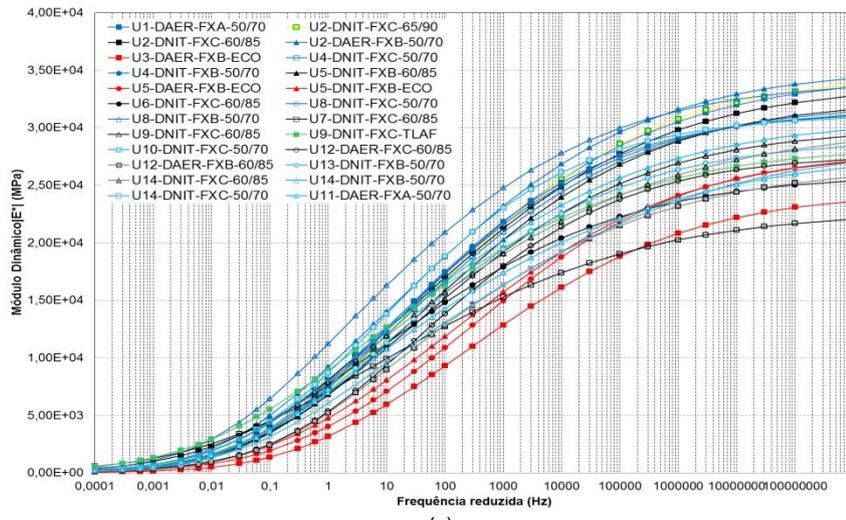
A Figura 41 apresenta as curvas mestras de módulo dinâmico obtidas pela modelagem 2S2P1D, para cada uma das 24 misturas referências de Faccin (2018) em (a), após o primeiro ciclo C1 em (b) e após o segundo ciclo de dano por umidade induzida em (c). A temperatura de referência é 21°C. Ao observar os gráficos, é possível perceber que o módulo dinâmico cresce em função da frequência. Tal crescimento ocorre devido a menor exposição à carga quando aumentada a frequência, isto é, não há tempo para ocorrerem manifestações de deformações viscoelásticas das misturas asfálticas. Ademais, nas altas frequências, só ocorrem

deformações elásticas no material, fazendo com que os módulos atinjam seus maiores valores. Nas baixas frequências as deformações viscoelásticas costumam se manifestar em sua totalidade, já que o tempo de carregamento é maior, acarretando menores valores de módulo dinâmico.

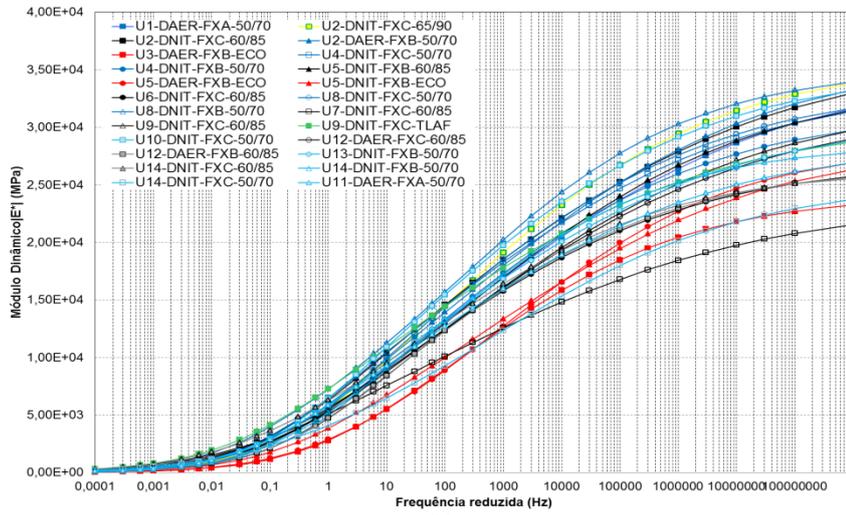
Conforme analisou Faccin (2018) para as baixas frequências é visível que as misturas com asfalto borracha apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, são menos rígidas nestas condições de temperatura e para frequências abaixo de 0,1Hz, indicando pior desempenho frente à deformação permanente. Nessas frequências, pode-se perceber que a mistura com ligante TLA Flex apresenta a maior rigidez, inferindo que esta apresentará melhor comportamento para deformação permanente dentre as misturas analisadas. Após os dois ciclos de danificação por umidade este padrão observado por Faccin (2018) se manteve. Ressalta-se que quanto maior a rigidez da mistura, melhor a distribuição das tensões que um revestimento transfere para as camadas subjacentes.

Contudo, para outras frequências, não é possível identificar uma tendência apenas em função do ligante. Assim como para Faccin (2018), nas demais misturas com CAP 50/70 e ligantes modificados, mesmo após os ciclos de danificação por umidade induzida, não foi possível identificar variações consideráveis ou um padrão de aumento ou diminuição de módulo dinâmico tanto para misturas com CAP 50/70 como para as com ligante modificado.

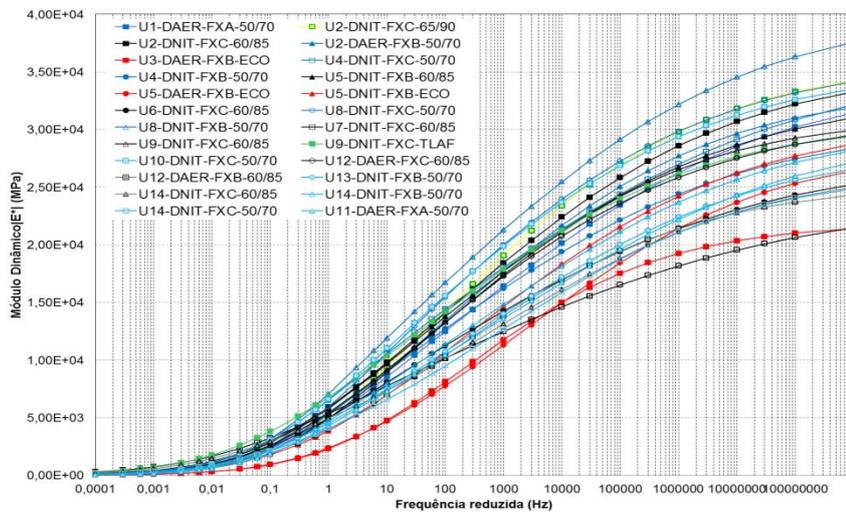
Figura 41 - Curvas mestras de módulo dinâmico, para todas as misturas, obtidas com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade (@21°C)



(a)



(b)



(c)

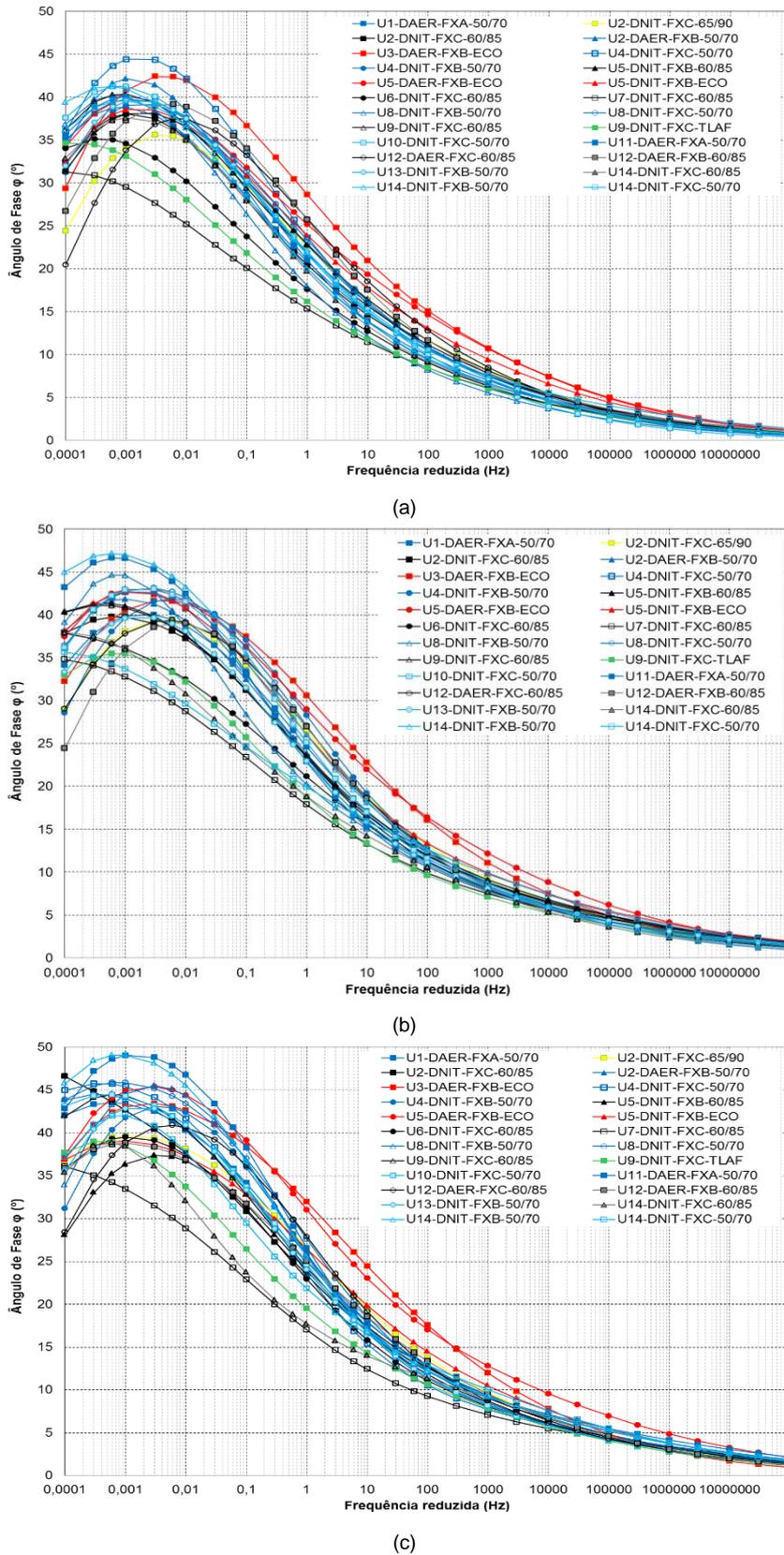
Fonte: Autora, (2019).

O ângulo de fase está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, sendo um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o efeito da modificação por polímero. Ao se analisar as curvas mestras de ângulo de fase, obtidas na modelagem 2S2P1D, na Figura 42, verifica-se que de (a) para (b) houve um aumento de aproximadamente  $5^\circ$  para todas as misturas, após o segundo ciclo (c) ainda há um aumento no ângulo de fase, porém um pouco menor.

Na análise das curvas mestras do ângulo de fase obtidos na modelagem 2S2P1D Faccin (2018) observou que a maioria das misturas com os maiores valores de ângulos de fase são as com ligante 50/70, o que representa uma menor elasticidade e resistência à deformação permanente. Já os menores valores são identificados para as misturas com ligante modificado, indicando maior resistência à deformação permanente. Tal comportamento se mantém, mesmo após os ciclos de dano por umidade induzida, nas baixas frequências.

A partir da frequência 0,02Hz, ainda para as misturas de referência, os maiores valores de ângulo de fase passam a ser das misturas com asfalto borracha. Após o primeiro ciclo de dano por umidade induzida esta mesma inversão de valores ocorre a partir da frequência 0,1, mantendo-se este comportamento para o segundo ciclo. A partir dessas frequências as misturas com ligante 50/70 passam a figurar na faixa intermediária dos valores de ângulo de fase e as misturas com ligantes modificados, com exceção das misturas com asfalto borracha, continuam tendo menores valores de ângulo de fase.

Figura 42 - Curvas mestras de ângulo de fase, para todas as misturas, obtidas com a modelagem 2S2P1D (a) Referência (Faccin, 2018), (b) após Ciclo 1 e (c) após Ciclo 2 de danificação por umidade (@21°C)



De modo a tornar mais clara a influência do efeito deletério da água sobre as diferentes misturas optou-se por apresentar os resultados de cada uma das misturas separadamente, ou seja, comparando os resultados de referência obtidos por Faccin (2018), com os resultados obtidos após os dois ciclos de danificação por umidade induzida C1 e C2 dentro de um mesmo gráfico.

Nas Figuras 43 (a) a 66 (a), apresentam-se os gráficos Cole-Cole, obtidos por meio da modelagem 2S2P1D, estão plotadas a média das amostras dos valores de referência de Faccin (2018), a média dos resultados para as amostras após o ciclo 1 (C1) e a média para as amostras após o ciclo 2 (C2) de danificação por umidade.

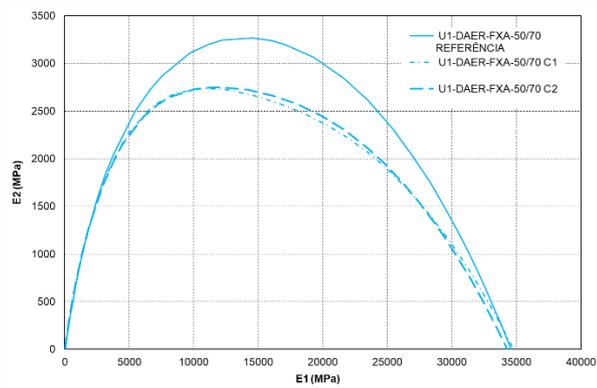
As Figuras 43 (b) a 66 (b) apresentam a representação gráfica dos resultados no Diagrama Black de todas as misturas, comparando os resultados obtidos por meio da modelagem 2S2P1D das referências de Faccin (2018) e após os ciclos de danificação, C1 e C2.

As Figuras 43 (c) a 66 (c) mostram as curvas mestras de módulo dinâmico obtidas pela modelagem 2S2P1D, para cada uma das 24 misturas referências comparadas com seus dois ciclos de danificação por umidade induzida. A temperatura de referência é 21°C.

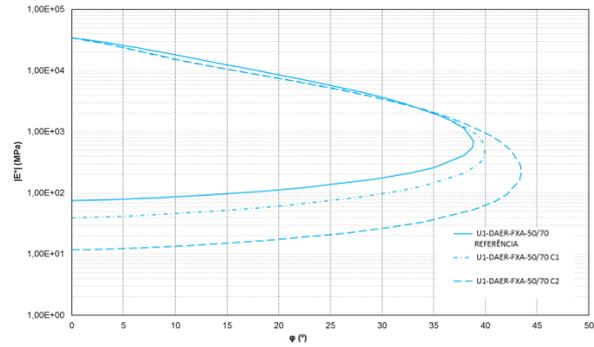
As Figuras 43 (d) a 66 (d) mostram as curvas mestras de ângulo de fase obtidas pela modelagem 2S2P1D, para cada uma das 24 misturas referências comparadas com seus dois ciclos de danificação por umidade induzida. A temperatura de referência é 21°C.

Utilizando os valores de referência obtidos por Faccin (2018) para o módulo dinâmico e ângulo de fase e os valores obtidos nesta pesquisa após os ciclos de danificação por umidade foram montados os gráficos apresentados nas Figuras 43 (e) e (f) a 66 (e) e (f) onde foram calculados os valores de módulo retido  $|E^*r|$  e ângulo de fase retido  $(\varphi^*r)$  para 6 frequências escolhidas, são elas: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10 e 100Hz.

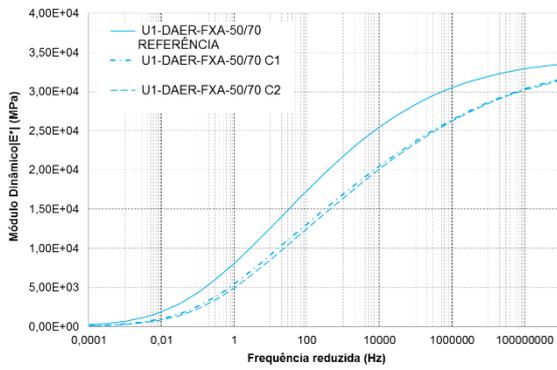
Figura 43 - Propriedades viscoelásticas da mistura U1-DAER-FXA-50/70 frente ao efeito deletério da água



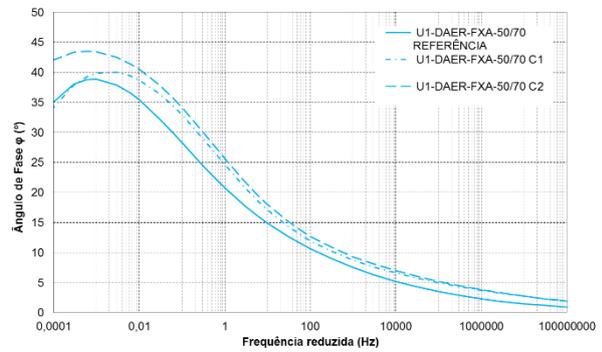
(a) Espaço Cole-Cole



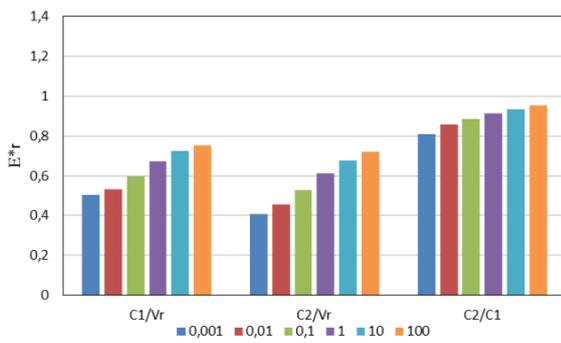
(b) Diagrama Black



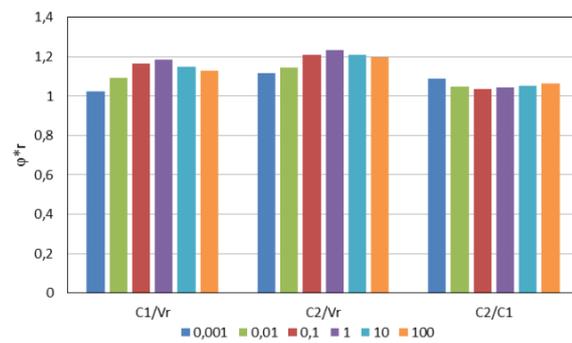
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



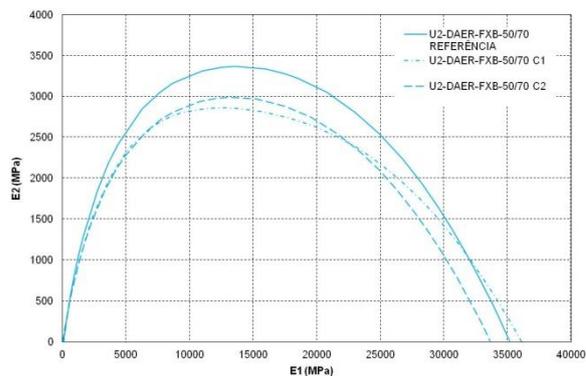
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



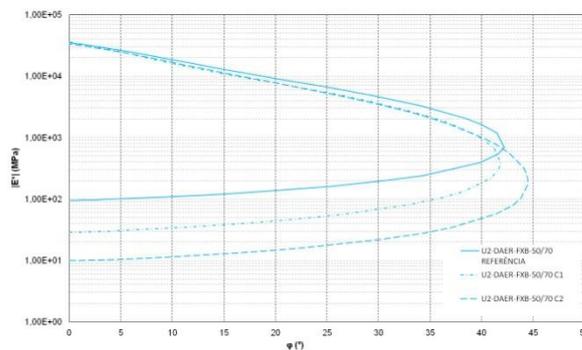
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

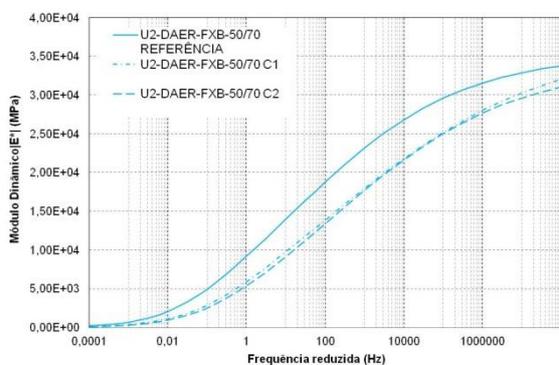
Figura 44 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DAER-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água



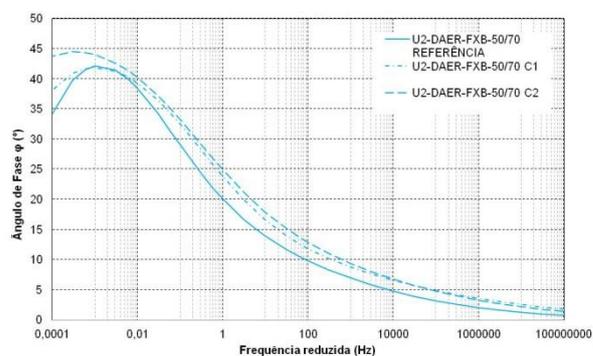
(a) Espaço Cole-Cole



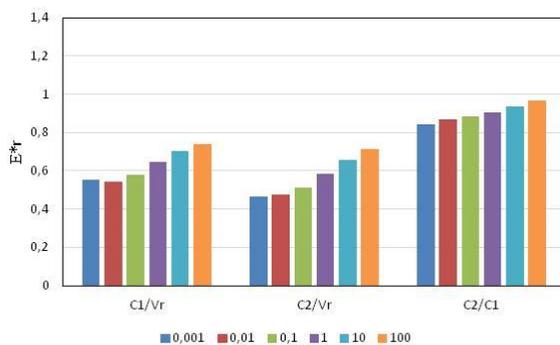
(b) Diagrama Black



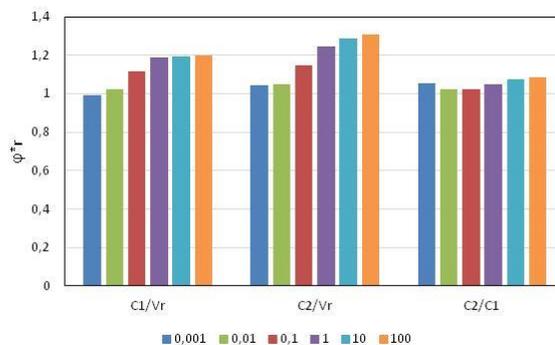
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



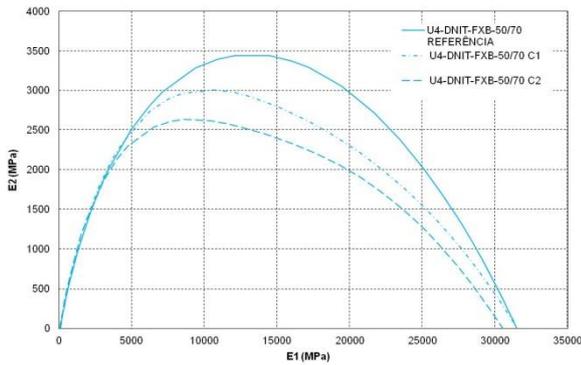
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



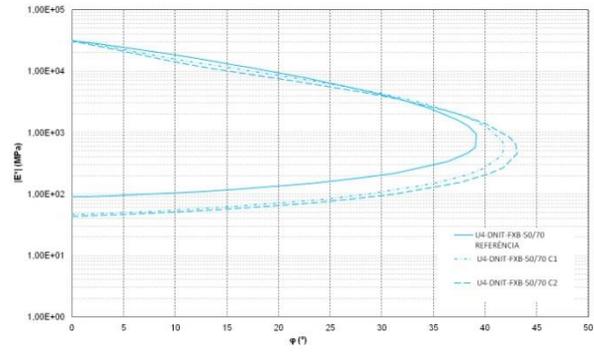
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

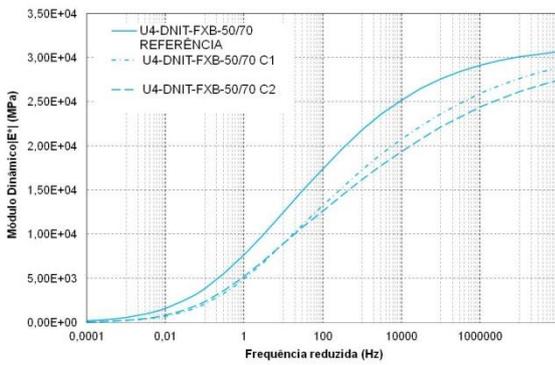
Figura 45 - Propriedades viscoelásticas da mistura U4-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água



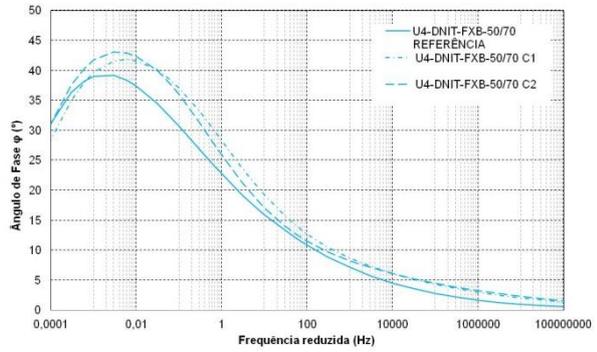
(a) Espaço Cole-Cole



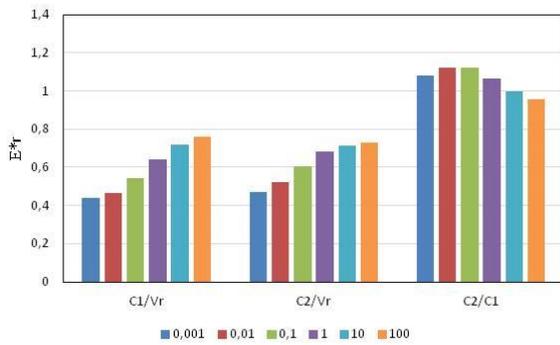
(b) Diagrama Black



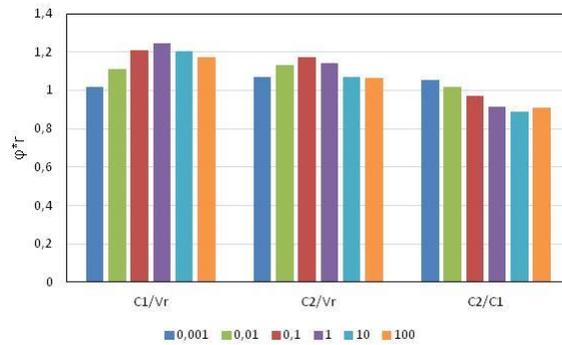
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



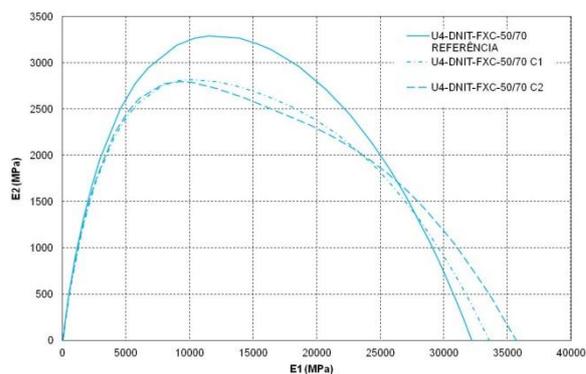
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



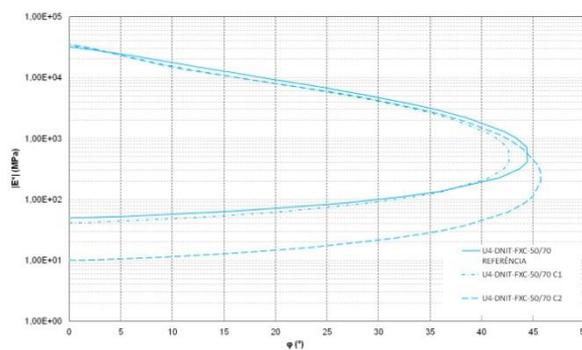
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

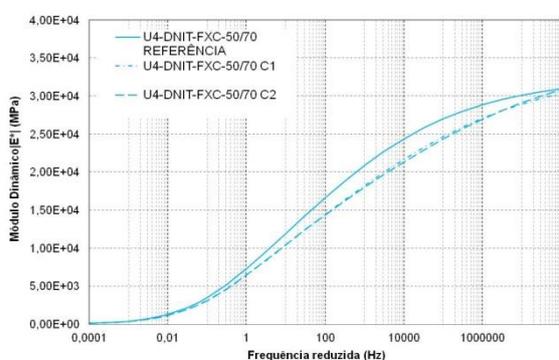
Figura 46 - Propriedades viscoelásticas da mistura U4-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água



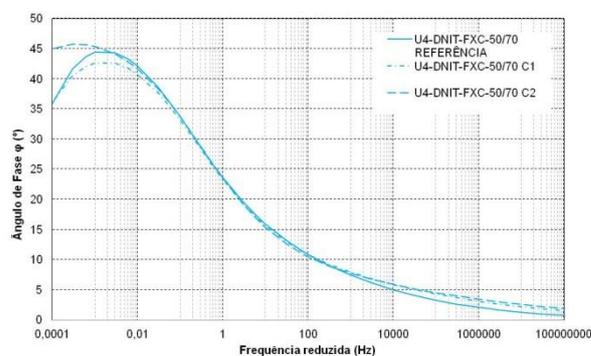
(a) Espaço Cole-Cole



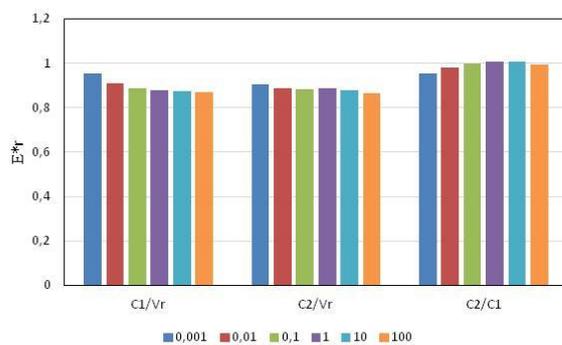
(b) Diagrama Black



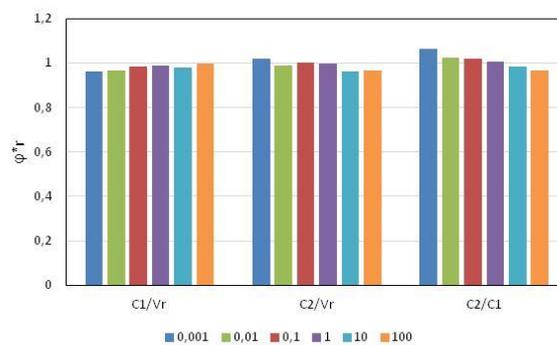
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



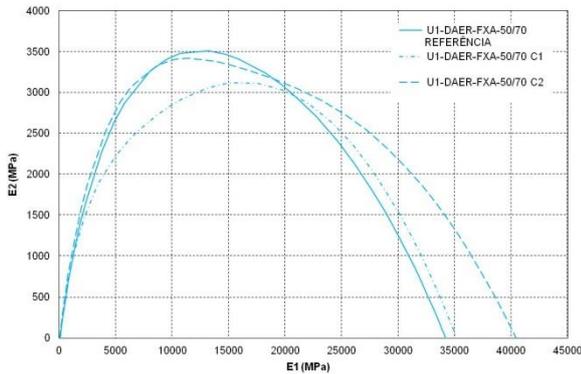
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



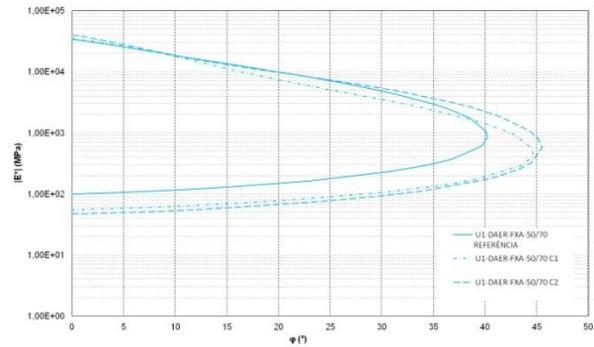
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

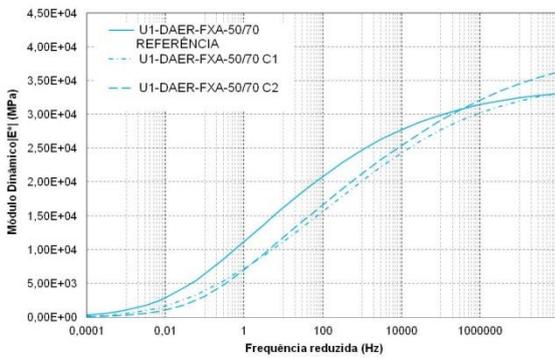
Figura 47 - Propriedades viscoelásticas da mistura U8-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água



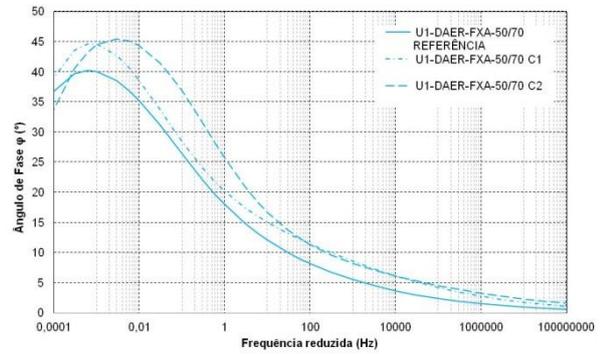
(a) Espaço Cole-Cole



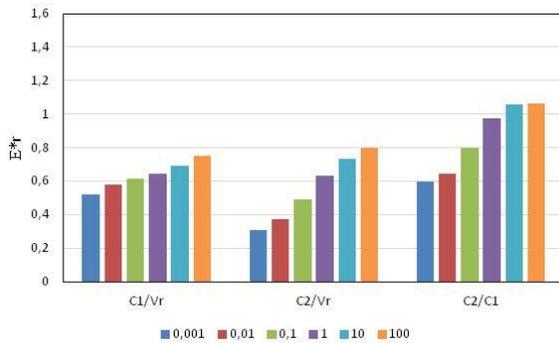
(b) Diagrama Black



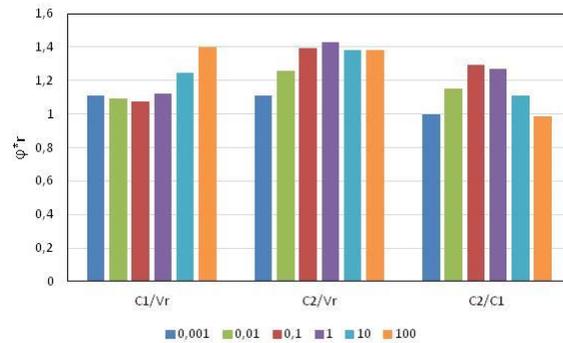
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



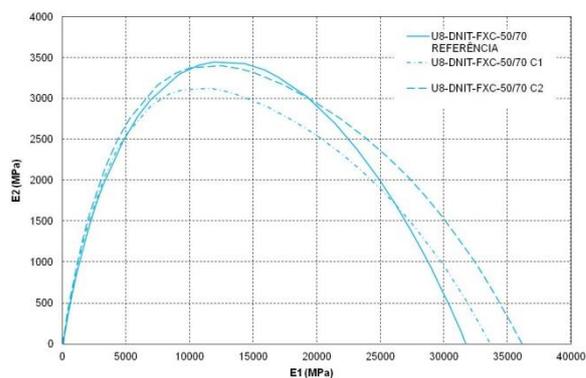
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



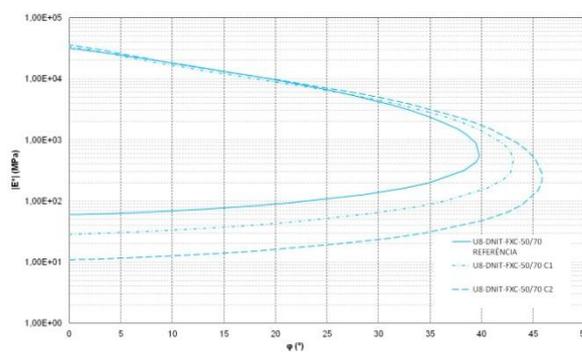
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

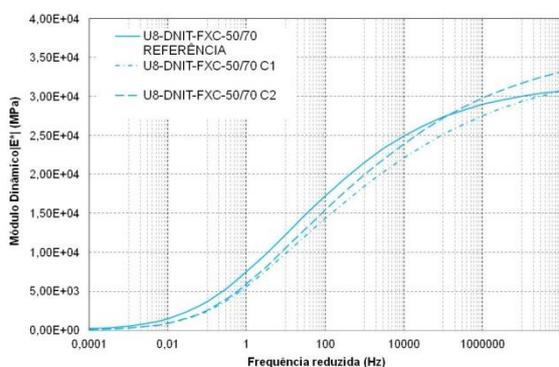
Figura 48 - Propriedades viscoelásticas da mistura U8-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água



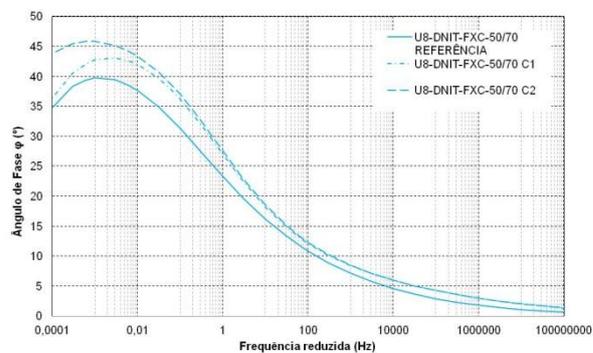
(a) Espaço Cole-Cole



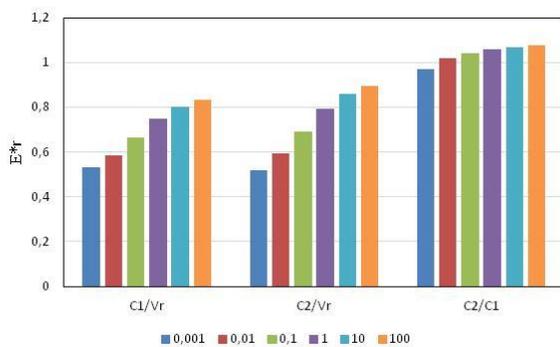
(b) Diagrama Black



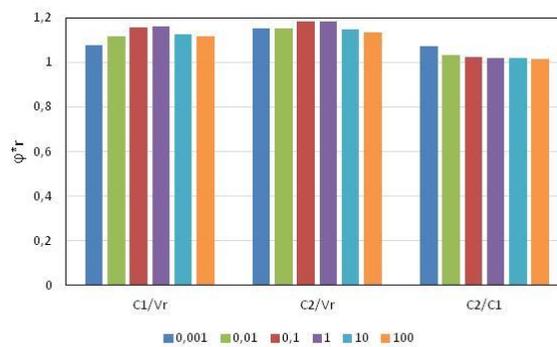
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



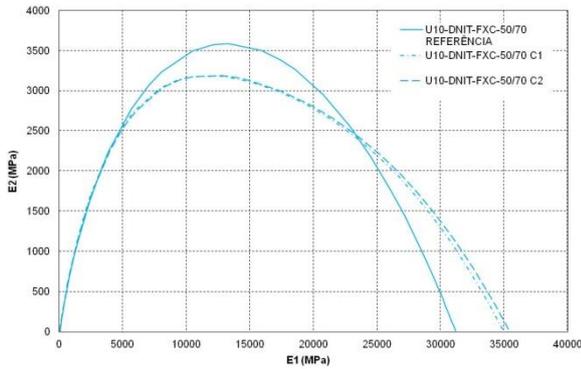
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



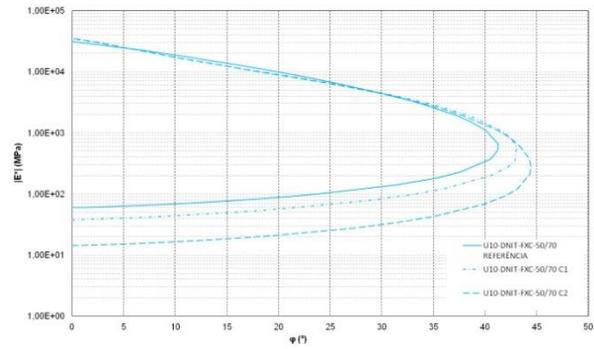
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

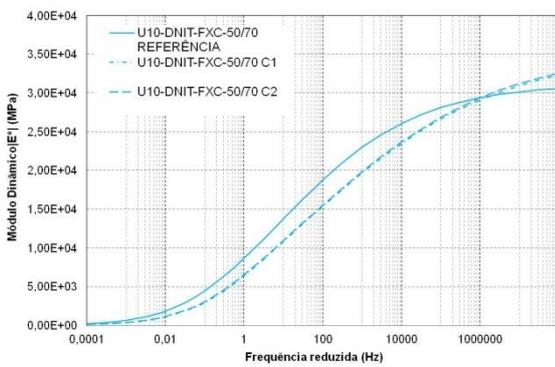
Figura 49 - Propriedades viscoelásticas da mistura U10-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água



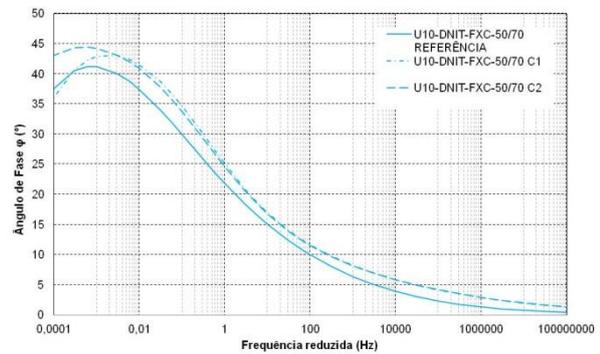
(a) Espaço Cole-Cole



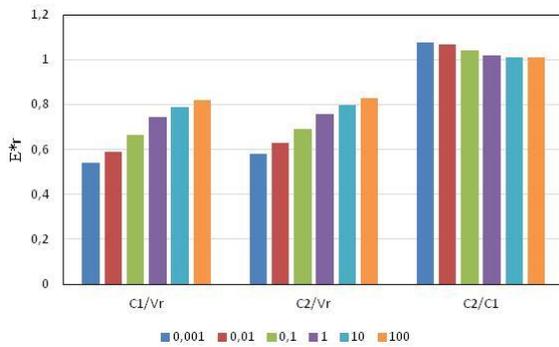
(b) Diagrama Black



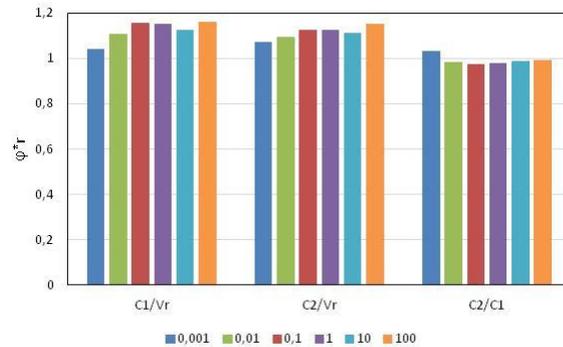
(c) Curva Mestra de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestra de Ângulo de Fase (@21°C)



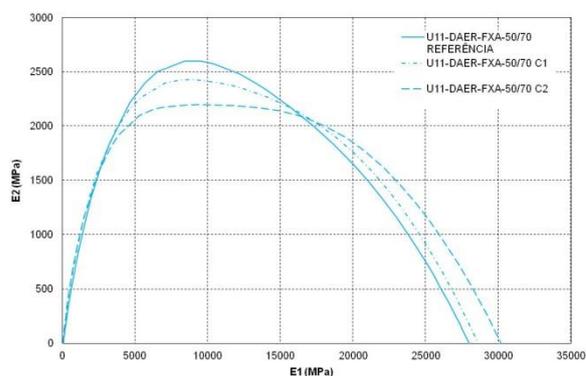
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



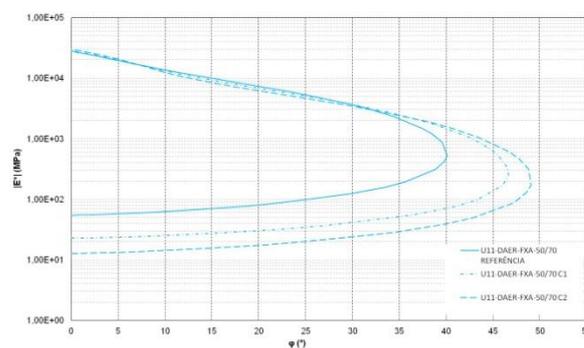
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

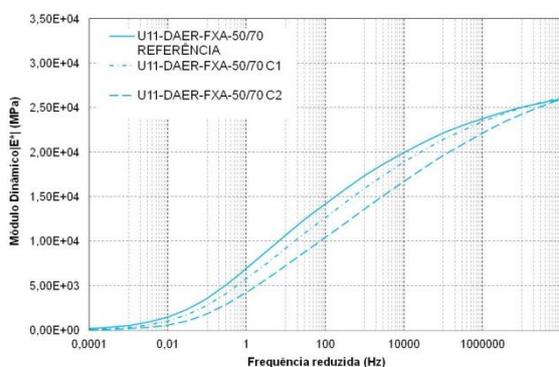
Figura 50 - Propriedades viscoelásticas da mistura U11-DAER-FXA-50/70 frente ao efeito deletério da água



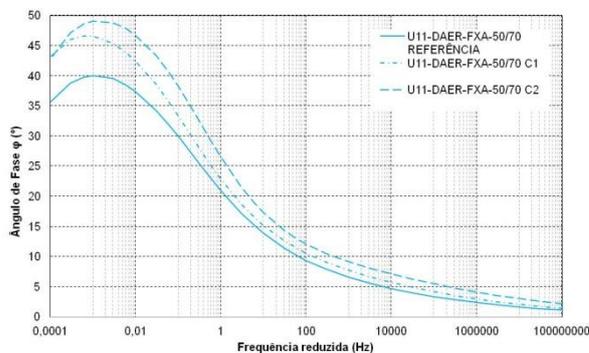
(a) Espaço Cole-Cole



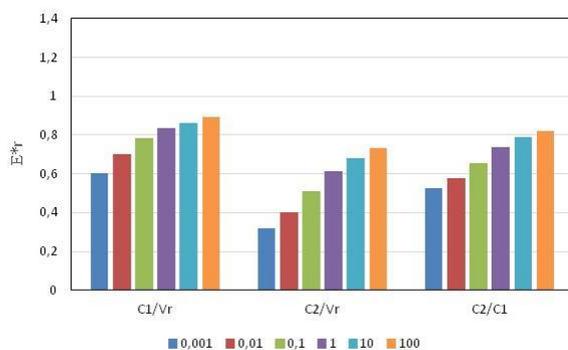
(b) Diagrama Black



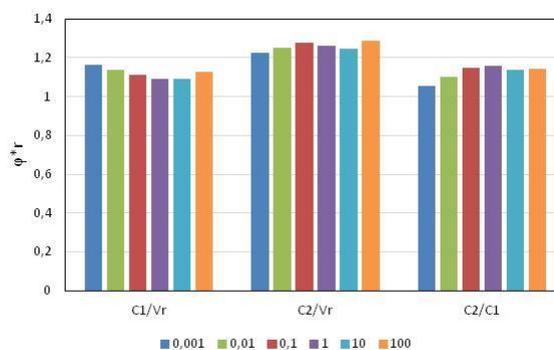
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



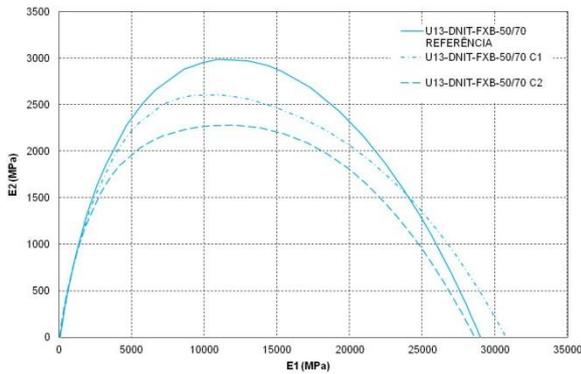
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



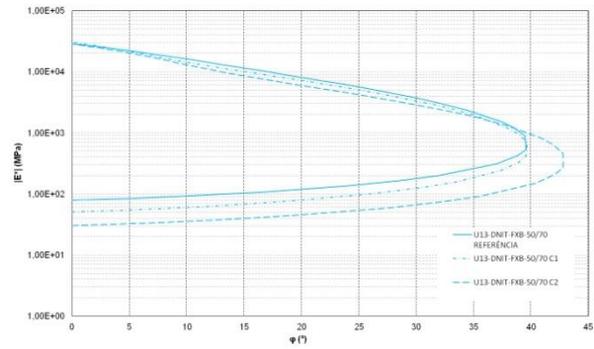
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

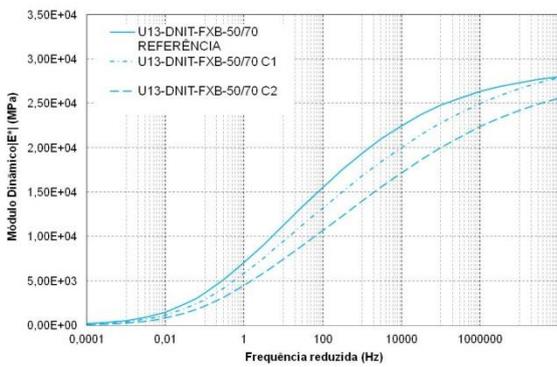
Figura 51 - Propriedades viscoelásticas da mistura U13-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água



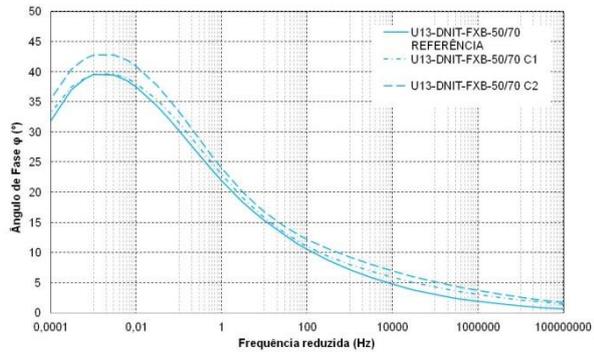
(a) Espaço Cole-Cole



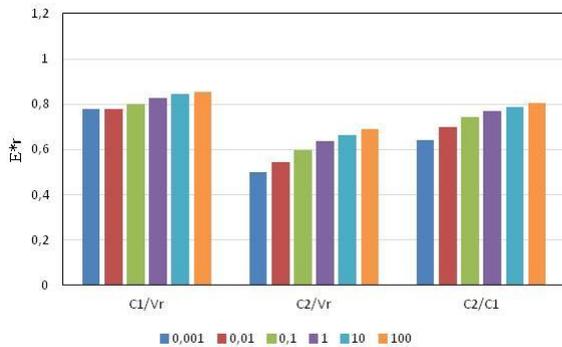
(b) Diagrama Black



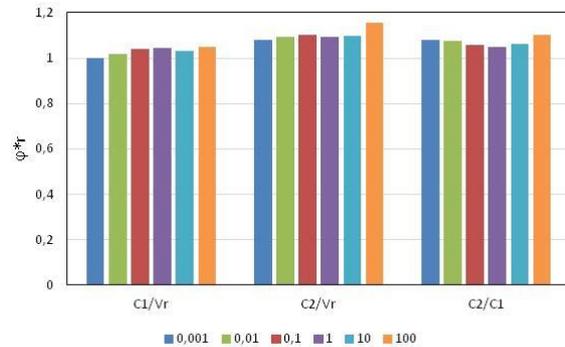
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



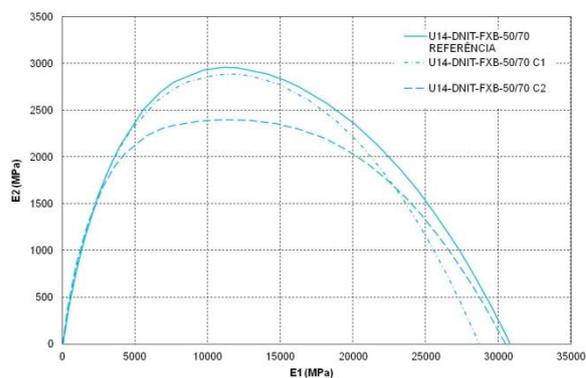
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



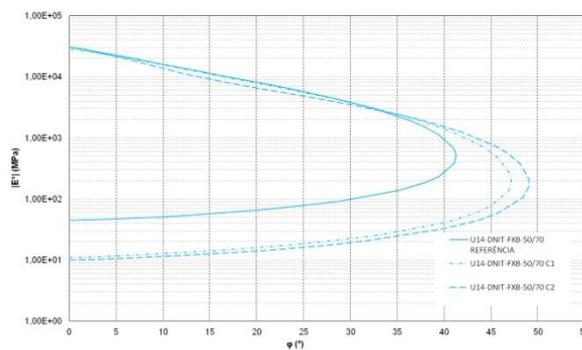
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

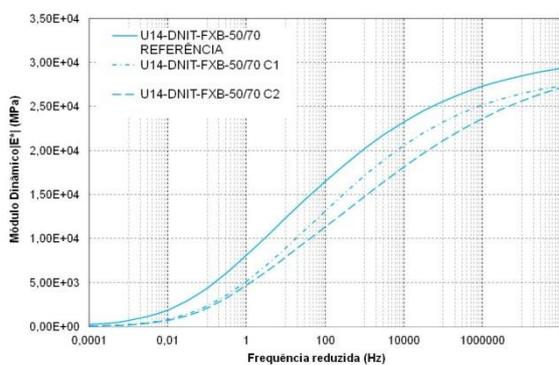
Figura 52 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXB-50/70 frente ao efeito deletério da água



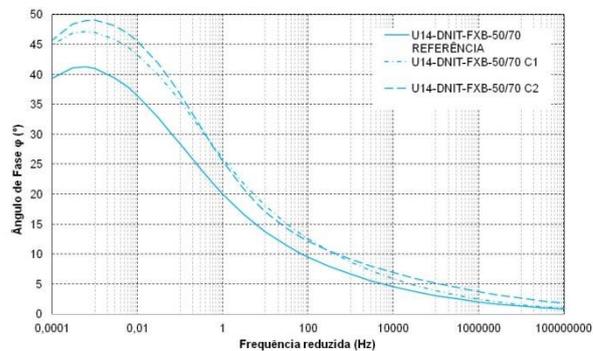
(a) Espaço Cole-Cole



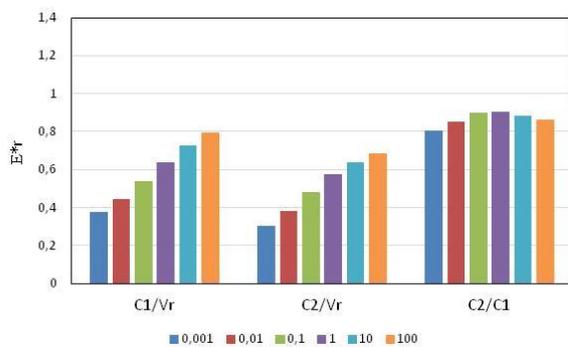
(b) Diagrama Black



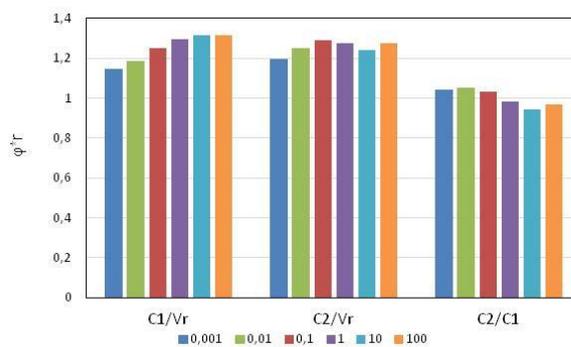
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



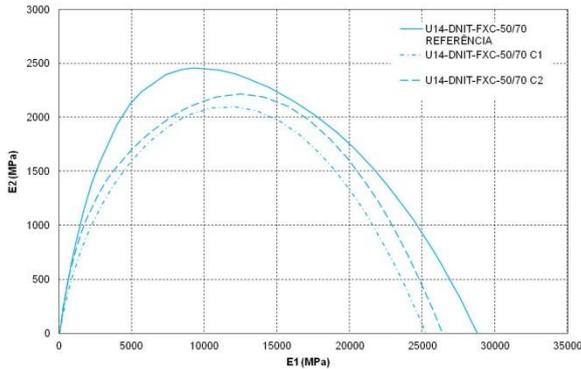
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



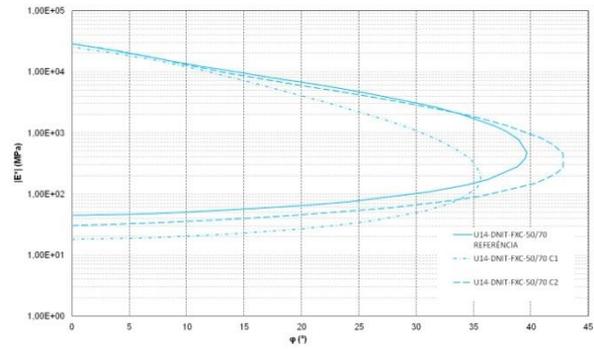
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

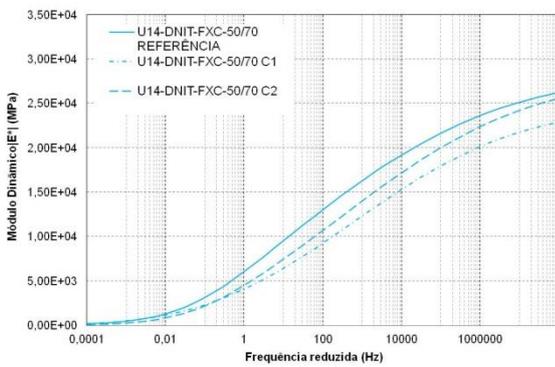
Figura 53 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXC-50/70 frente ao efeito deletério da água



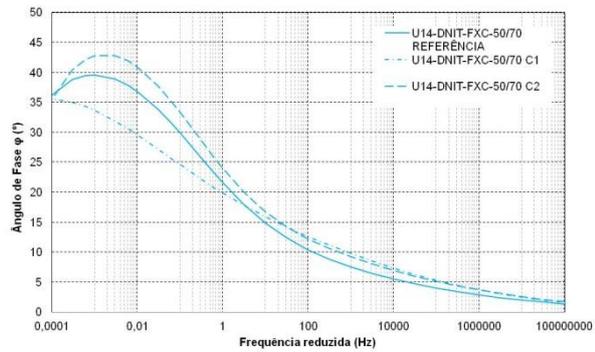
(a) Espaço Cole-Cole



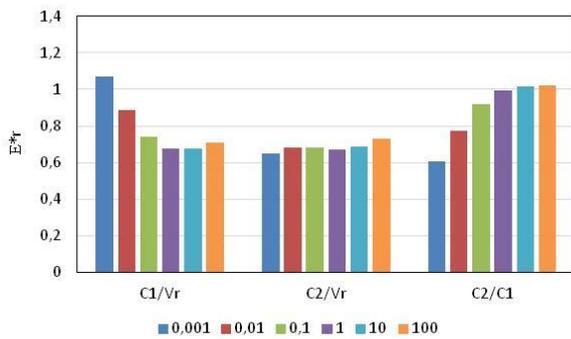
(b) Diagrama Black



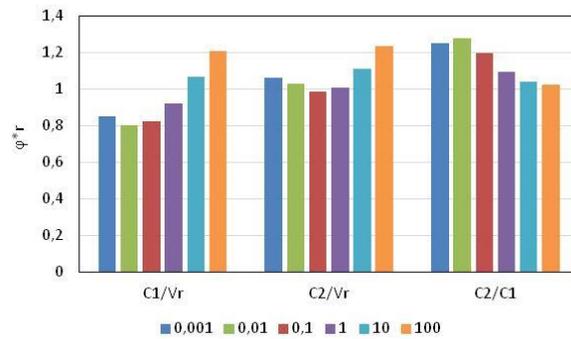
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

Os valores retidos, em relação ao módulo, indicam o quanto do módulo original ficou retido na amostra após os ciclos de danificação. Por exemplo, se uma amostra obtém, após o C1, o valor de 0,6 significa que a amostra teve 60% do módulo retido

em relação ao original após este ciclo. Ou seja, quanto maior o valor encontrado, maior a resistência da amostra ao dano por umidade.

Em altas frequências, o ângulo de fase está relacionado com a parcela elástica do material, e nas baixas com a parcela viscosa. Assim para o ângulo de fase retido, valores acima de um indicam que a mistura teve seu comportamento elástico ou viscoso reduzido em relação aos valores obtidos antes dos ciclos.

Estes gráficos foram obtidos através das Equações (14) e (15) para o módulo e o ângulo de fase, respectivamente:

$$E_r^* = \frac{E_{Ci}^*}{E_{ref}^*} \quad (14)$$

Onde:

$E_r^*$  = Módulo Retido;

$E_{Ci}^*$  = Valor de Módulo após Ciclo de danificação (1 ou 2);

$E_{ref}^*$  = Valor de Módulo referência.

$$\varphi_r^* = \frac{\varphi_{Ci}^*}{\varphi_{ref}^*} \quad (15)$$

Onde:

$\varphi_r^*$  = Ângulo de fase Retido;

$\varphi_{Ci}^*$  = Valor de ângulo de fase após Ciclo de danificação (1 ou 2);

$\varphi_{ref}^*$  = Valor de ângulo de fase referência.

Nas Figuras 43 (e) a 53 (e) estão plotados os gráficos de módulo retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram o ligante CAP 50/70. Em sua maioria o módulo retido para baixas frequências após o ciclo 1 ficou entre 40 a 60%, nas frequências maiores entre 60 e 80%. Após o ciclo 2, o módulo retido caiu para 30 a 50% as baixas frequências e se manteve entre 60 e 80% nas frequências mais altas.

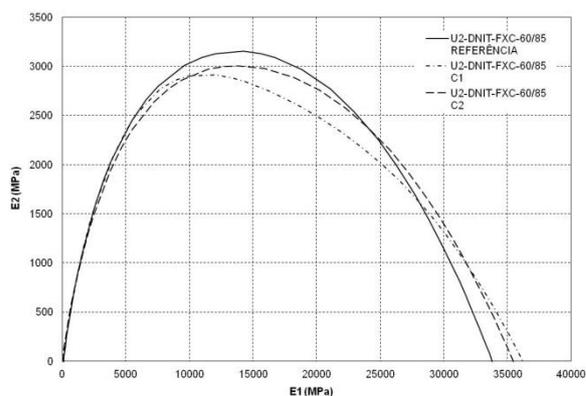
Observa-se um comportamento distinto para mistura U4-DNIT-FXC-50/70 e U14-DNIT-FXC-50/70, Figuras 46 (e) e 53 (e), onde o módulo retido para baixas

frequências após o primeiro ciclo encontra-se entre 95% e 110% e cai com o aumento da frequência. Após o segundo ciclo o módulo retido diminui, porém não varia consideravelmente com o aumento da frequência.

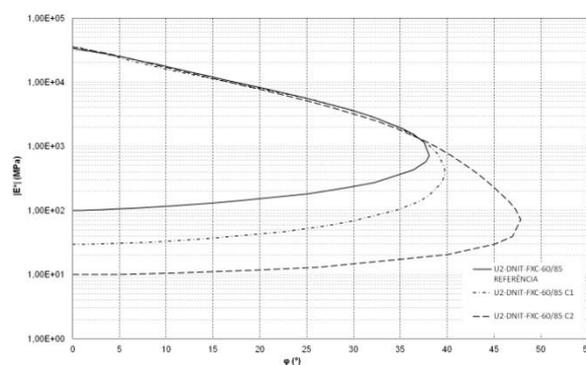
Nas Figuras 43 (f) a 53 (f) estão plotados os gráficos de ângulo de fase retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram o ligante CAP 50/70. Na grande maioria os valores de ângulo de fase retido ficaram acima de um e aumentam com o aumento da frequência, o que sinaliza que as misturas tiveram seu comportamento elástico e viscoso reduzidos.

Assim como para o módulo retido, observa-se um comportamento distinto para mistura U4-DNIT-FXC-50/70 e U14-DNIT-FXC-50/70, Figuras 46 (f) e 53 (f). Ambas apresentaram valores de ângulo de fase retidos menores que um para baixas frequências, e crescimento nos valores com aumento da frequência, porém para U4-DNIT-FXC-50/70 este crescimento nunca ultrapassa os 100%, já para a mistura U14-DNIT-FXC-50/70 nas frequências mais altas (10 e 100 Hz) o ângulo de fase retido ultrapassa valor de um, indicando comportamento elástico reduzido.

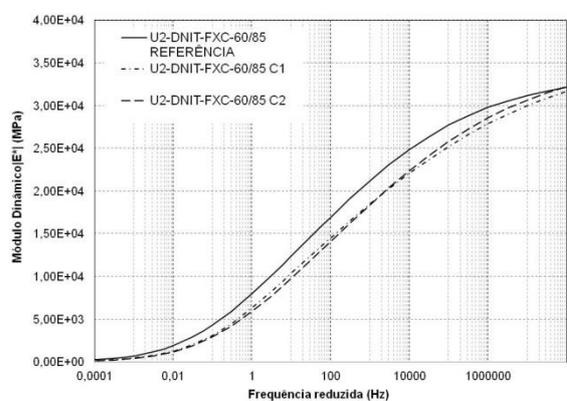
Figura 54 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



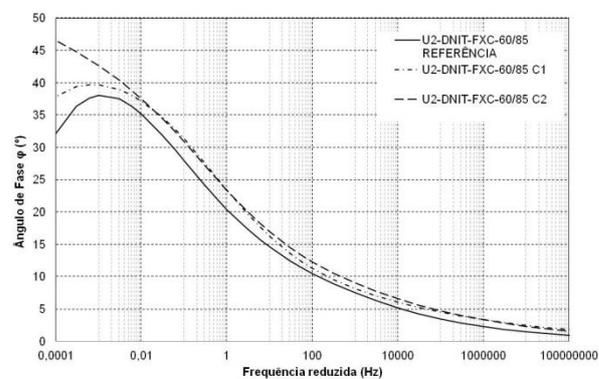
(a) Espaço Cole-Cole



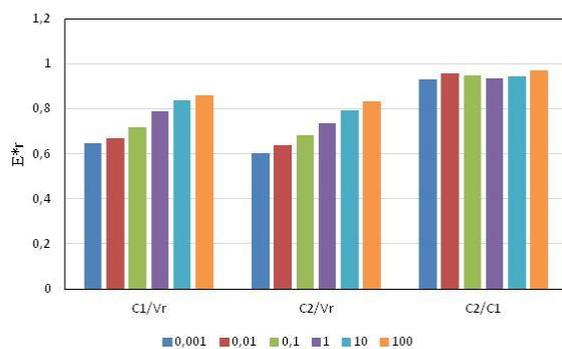
(b) Diagrama Black



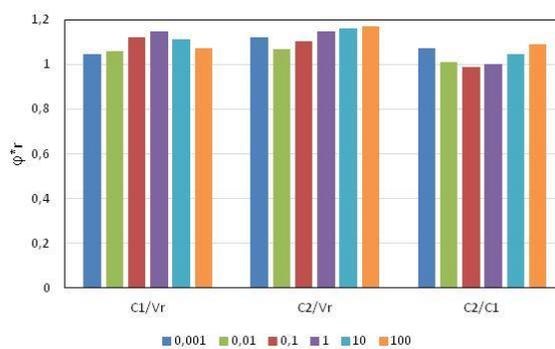
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



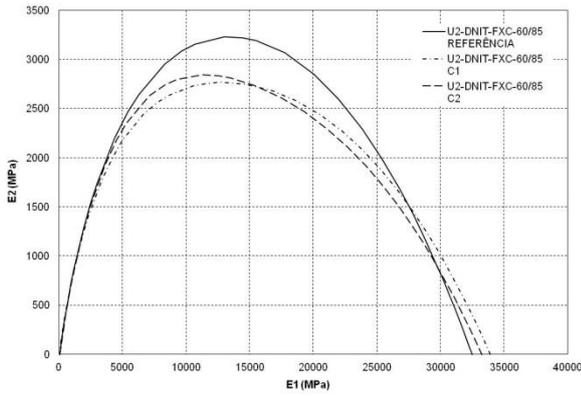
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



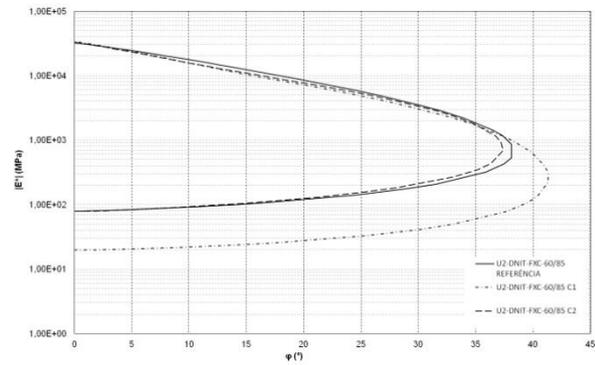
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

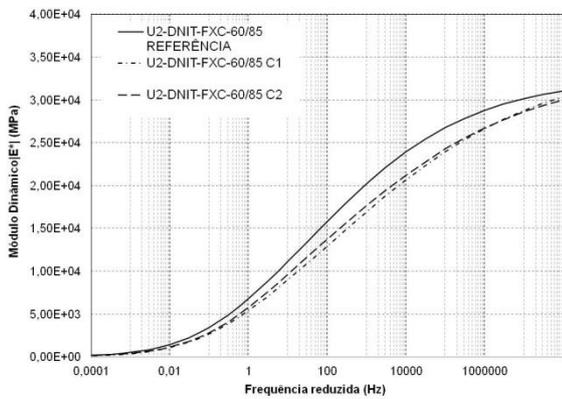
Figura 55 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DNIT-FXB-60/85 frente ao efeito deletério da água



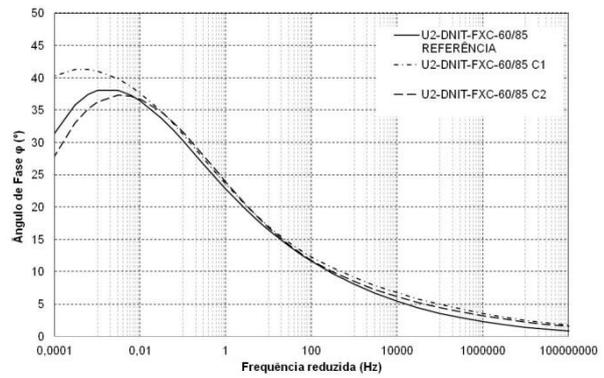
(a) Espaço Cole-Cole



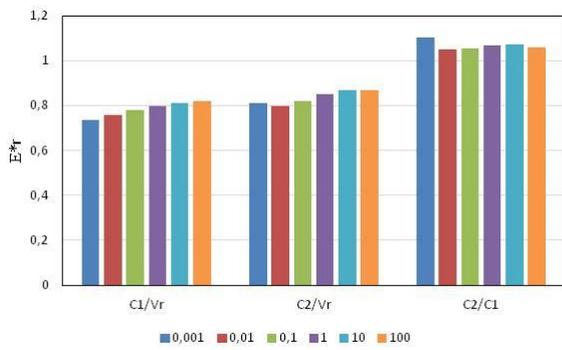
(b) Diagrama Black



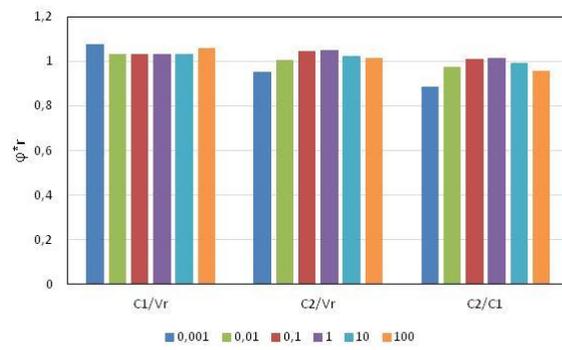
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



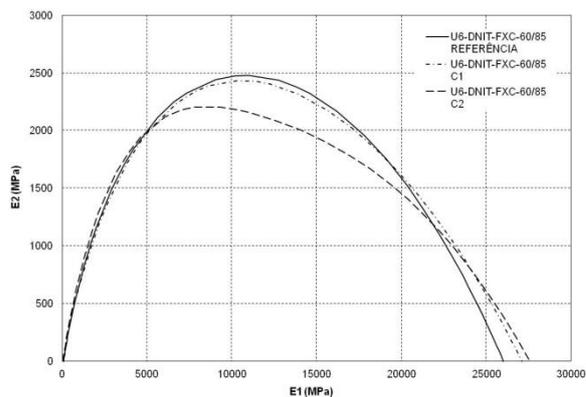
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



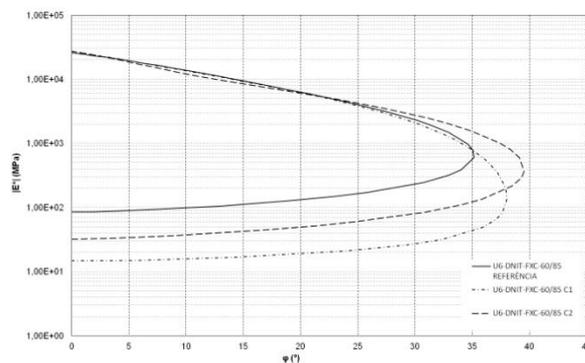
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

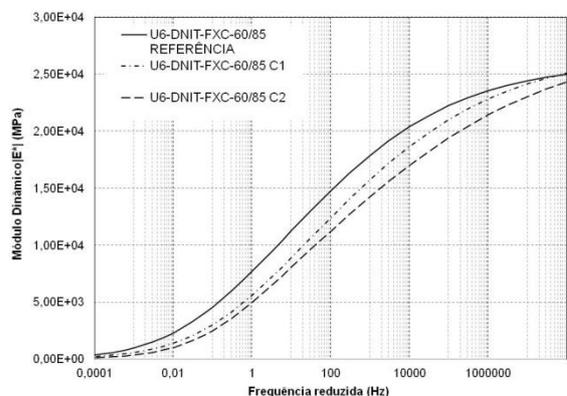
Figura 56 - Propriedades viscoelásticas da mistura U6-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



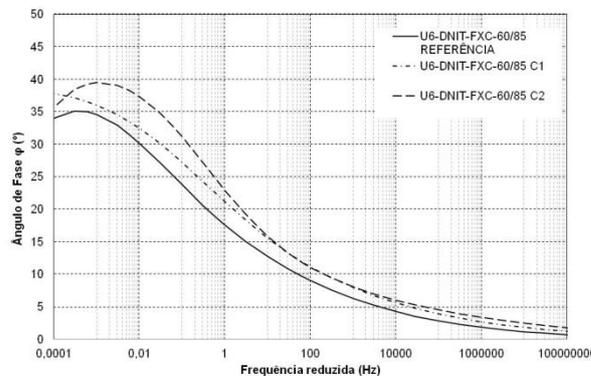
(a) Espaço Cole-Cole



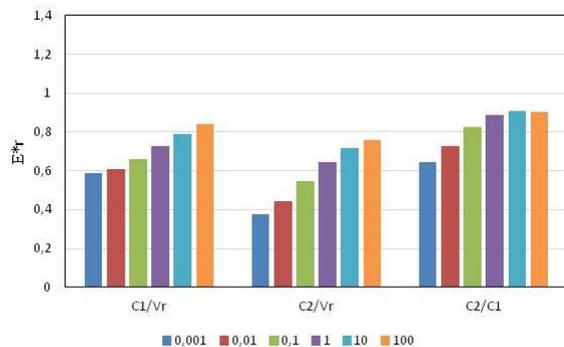
(b) Diagrama Black



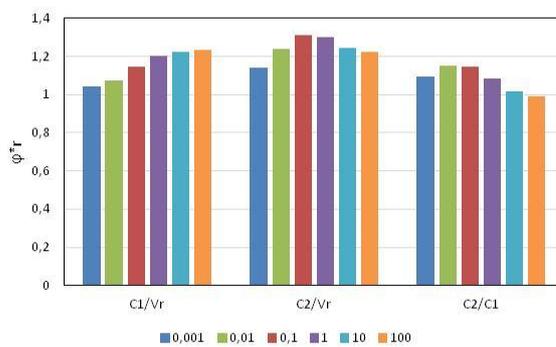
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



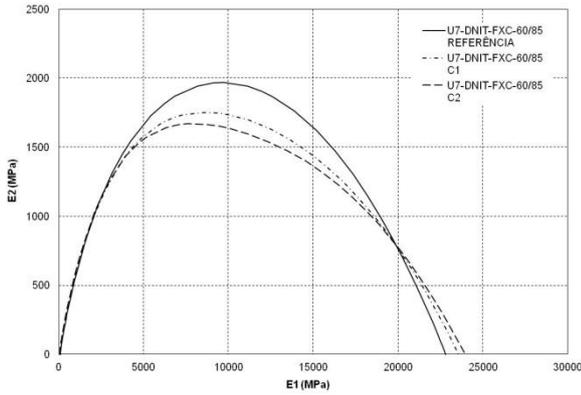
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



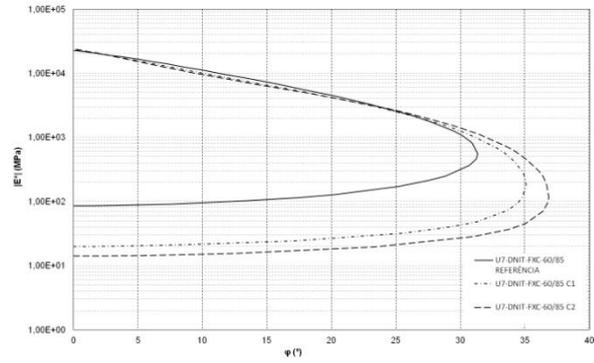
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

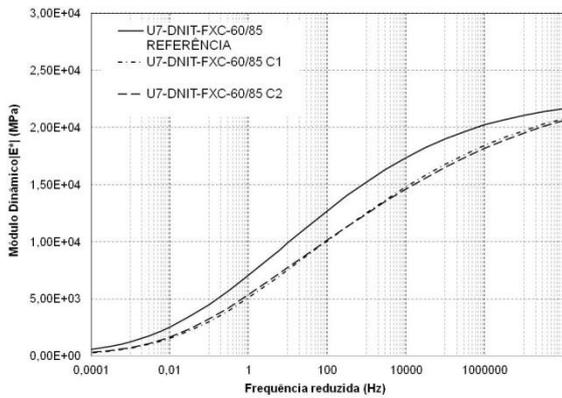
Figura 57 - Propriedades viscoelásticas da mistura U7-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



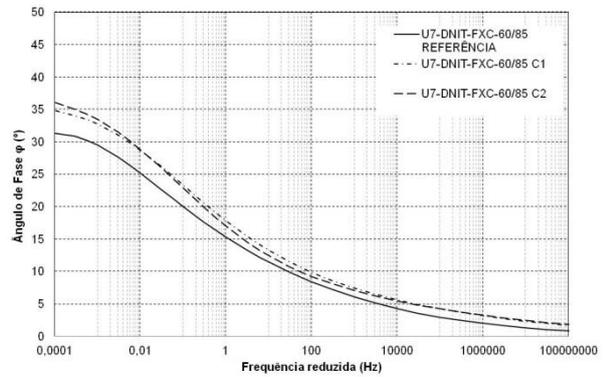
(a) Espaço Cole-Cole



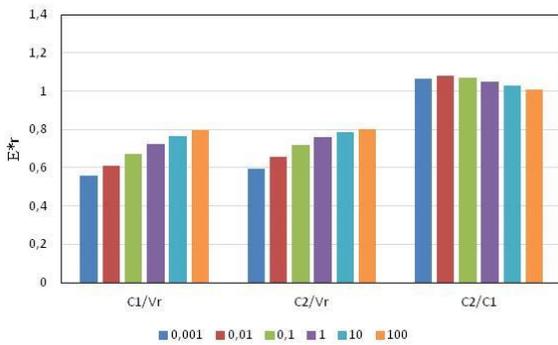
(b) Diagrama Black



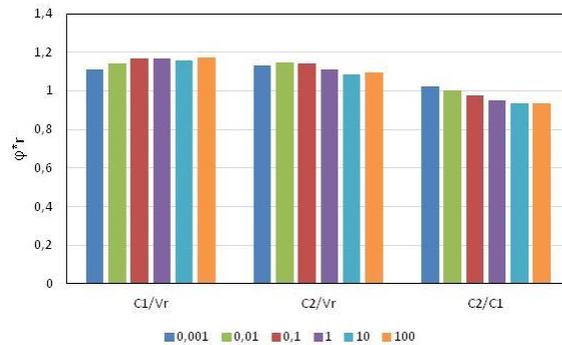
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)

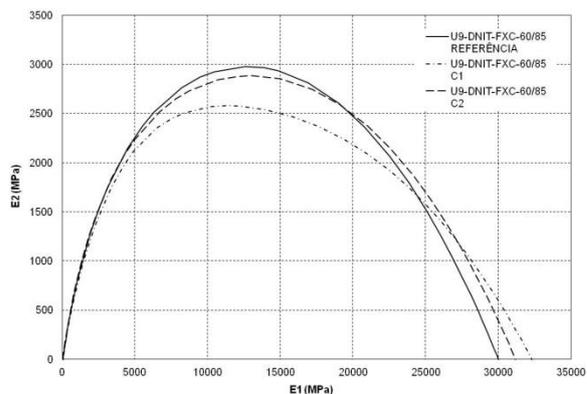


(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)

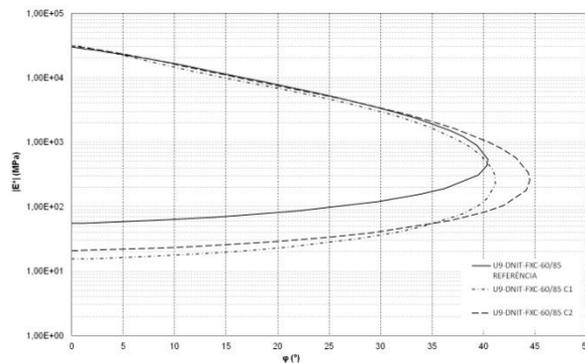


(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências (@21°C)

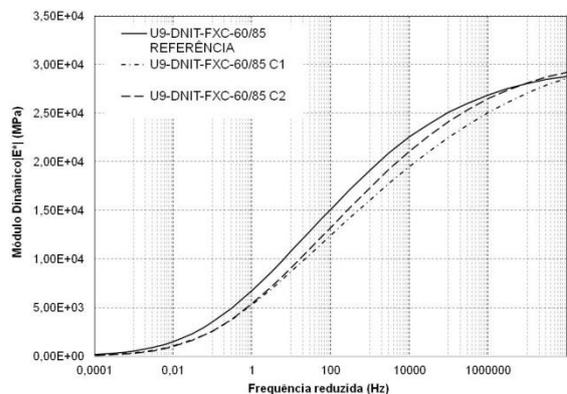
Figura 58 - Propriedades viscoelásticas da mistura U9-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



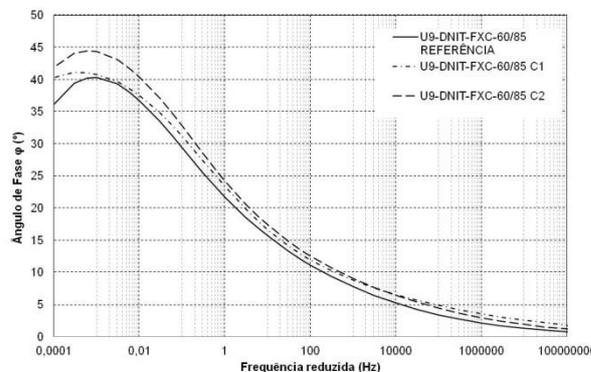
(a) Espaço Cole-Cole



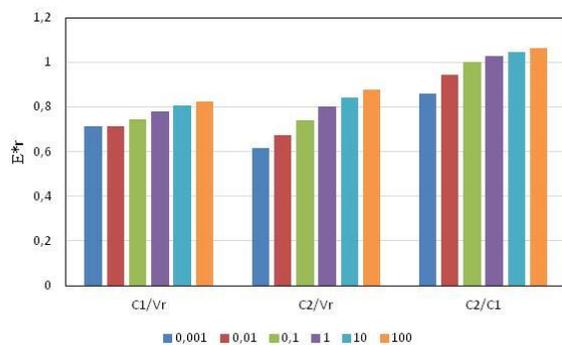
(b) Diagrama Black



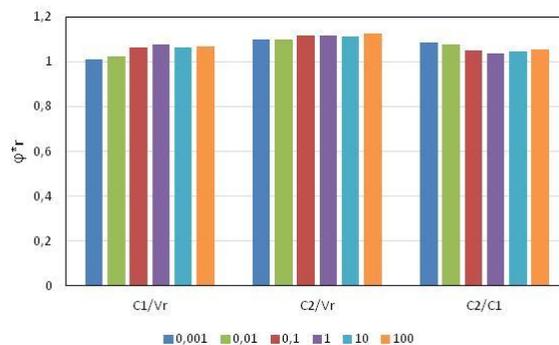
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



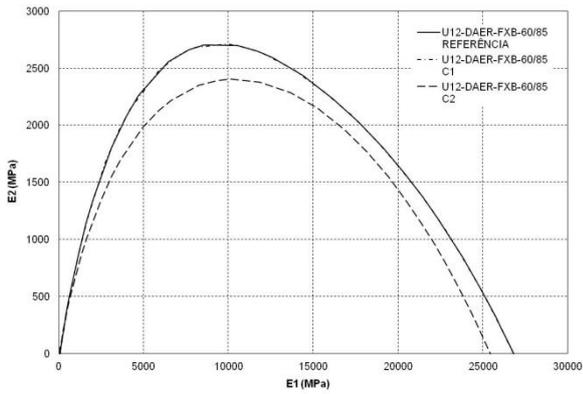
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



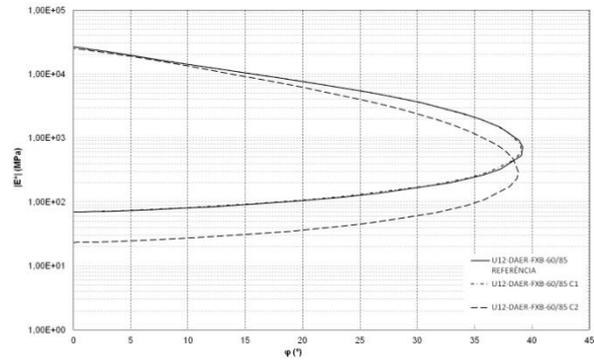
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

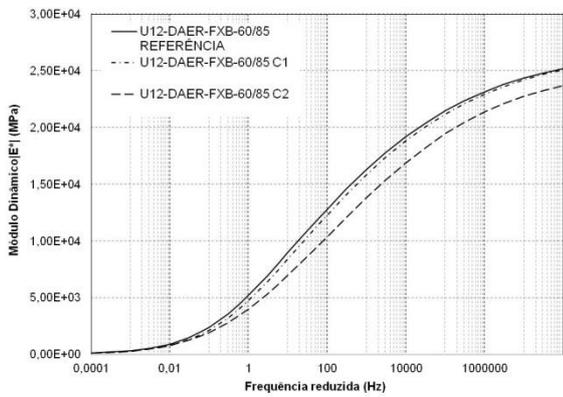
Figura 59 - Propriedades viscoelásticas da mistura U12-DAER-FXB-60/85 frente ao efeito deletério da água



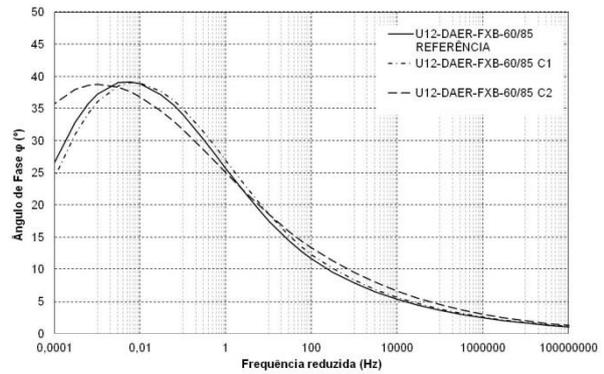
(a) Espaço Cole-Cole



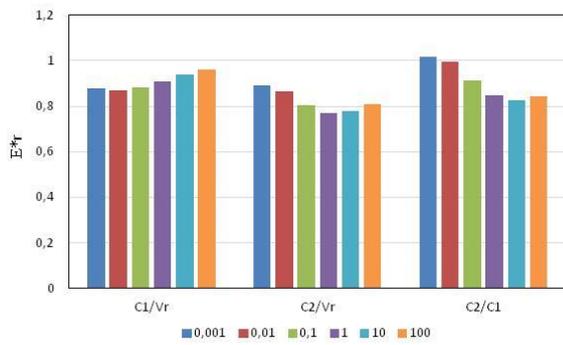
(b) Diagrama Black



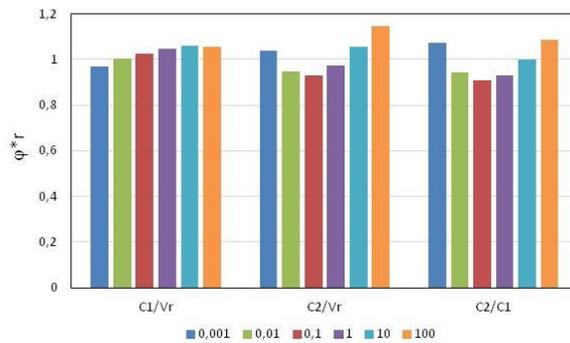
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)

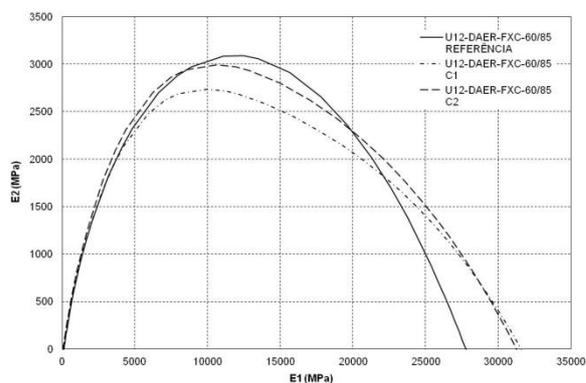


(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)

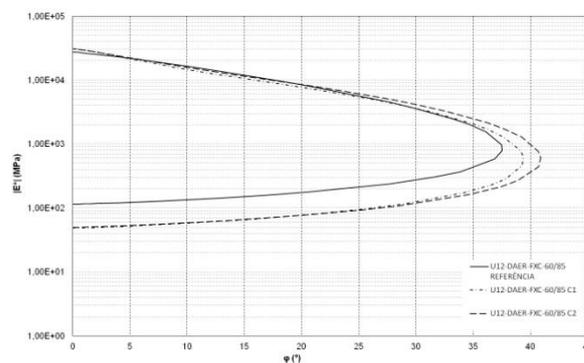


(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

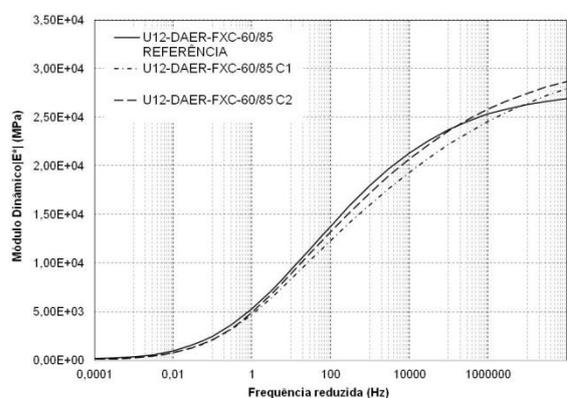
Figura 60 - Propriedades viscoelásticas da mistura U12-DAER-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



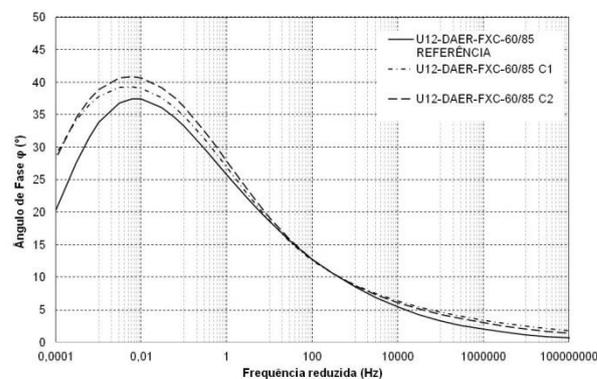
(a) Espaço Cole-Cole



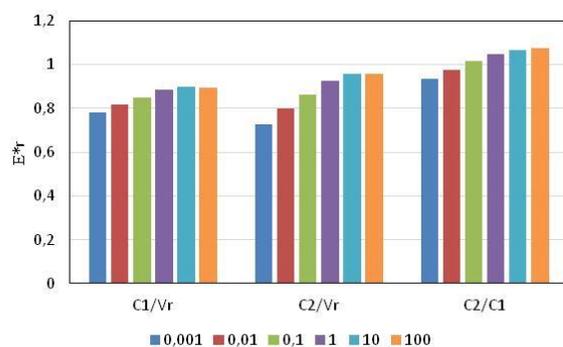
(b) Diagrama Black



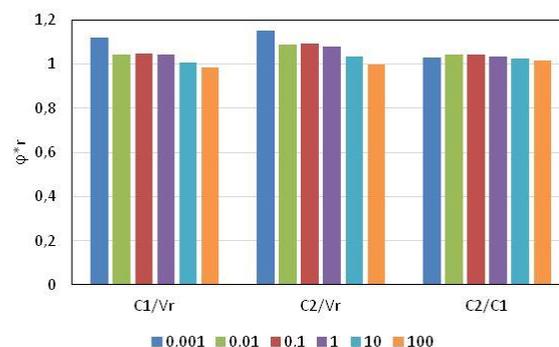
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



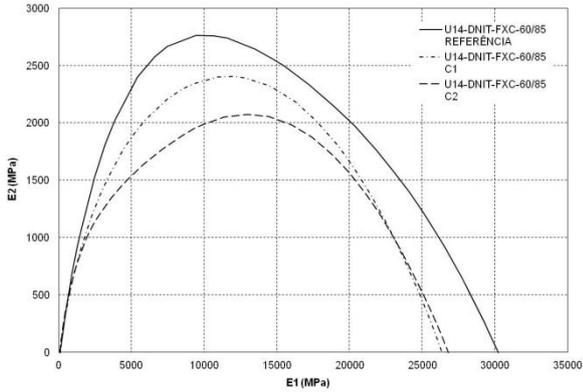
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



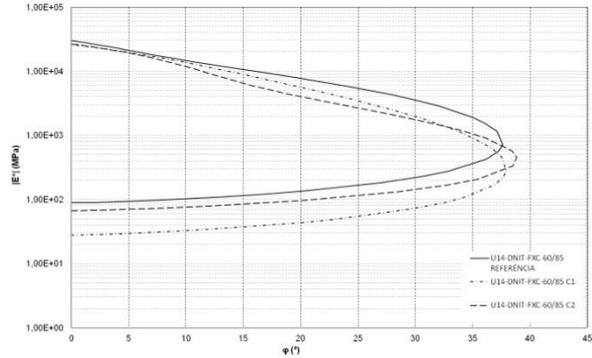
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

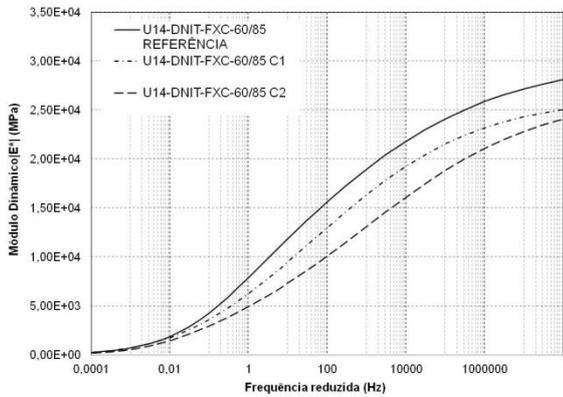
Figura 61 - Propriedades viscoelásticas da mistura U14-DNIT-FXC-60/85 frente ao efeito deletério da água



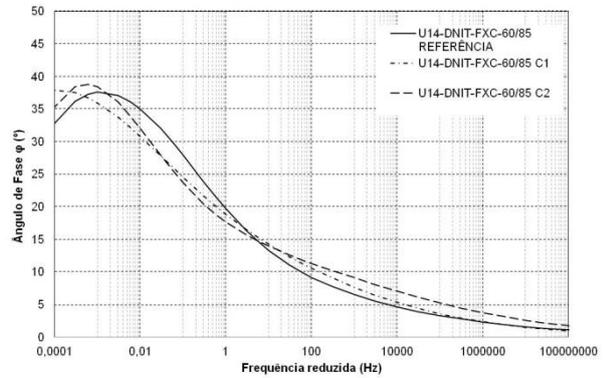
(a) Espaço Cole-Cole



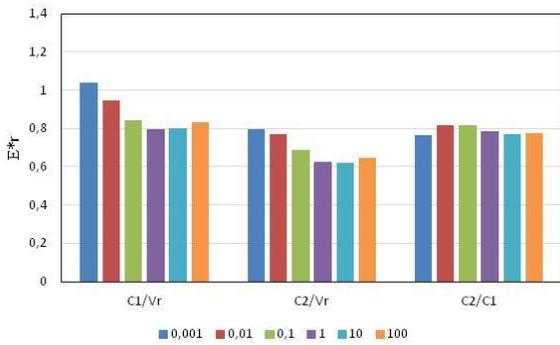
(b) Diagrama Black



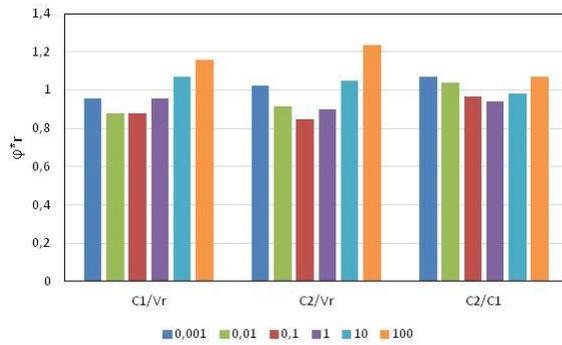
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

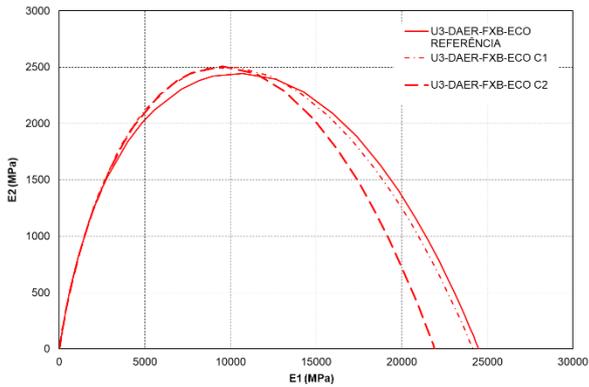
Fonte: Autora, 2019.

Nas Figuras 54 (e) a 61 (e) estão plotados os gráficos de módulo retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram o ligante AMP 60/85. Em sua grande maioria o módulo retido para baixas frequências após o ciclo um ficou acima

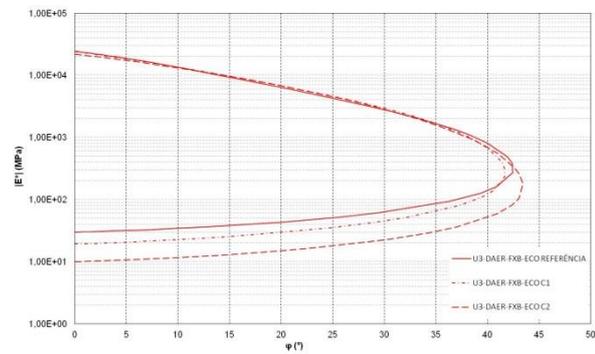
de 60%. Após o segundo ciclo houve uma queda nos valores de módulo retido, quando comparado ao primeiro ciclo, para as misturas U2-DNIT-FXC-60/85 de 5%, U6-DNIT-FXC-60/85 de 22%, U9-DNIT-FXC-60/85 10% e U12-DAER-FXC-60/85 de 3%. A mistura U12-DAER-FXB-60/85 apresentou uma mudança de comportamento do primeiro para o segundo ciclo, onde o módulo retido cresce após o primeiro ciclo das baixas para as altas frequências e decresce após o segundo ciclo das baixas para as altas frequências, com valores de módulo retidos sempre superiores a 80%. Já as misturas U5-DNIT-FXB-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85 apresentaram valores de módulo retido mais alto após o segundo ciclo de dano por umidade induzida quando comparados ao primeiro, sendo esta variação da ordem de 2 a 5%. Já a mistura U14-DNIT-FXC-60/85 apresentou um comportamento distinto das outras misturas com ligante modificado 60/85, pois apresentou queda no valor de módulo retido com o aumento da frequência após ambos os ciclos. Após o primeiro ciclo o valor de módulo retido é superior a 80% em todas as frequências, após o segundo ciclo o valor de módulo retido decresce da menor para maior frequência de 80 para 60%.

Nas Figuras 54 (f) a 61 (f) estão plotados os gráficos de ângulo de fase retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram o ligante AMP 60/85. Na grande maioria os valores de ângulo de fase retido ficaram acima de um ou muito próximos desse valor, variando muito pouco com o aumento da frequência e os diferentes ciclos de dano por umidade induzida. Apenas a mistura U14-DNIT-FXC-60/85 apresentou valores inferiores a um nas frequências baixas e intermediárias, sendo maiores que um apenas nas altas frequências, indicando queda na elasticidade da mistura após ser submetida ao dano por umidade induzida.

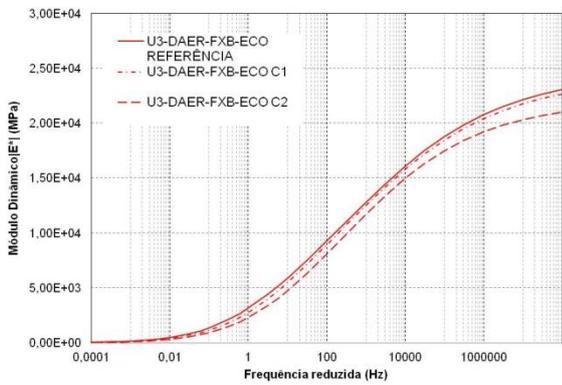
Figura 62 - Propriedades viscoelásticas da mistura U3-DAER-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água



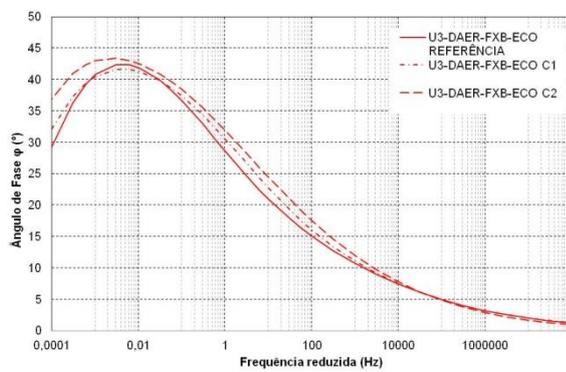
(a) Espaço Cole-Cole



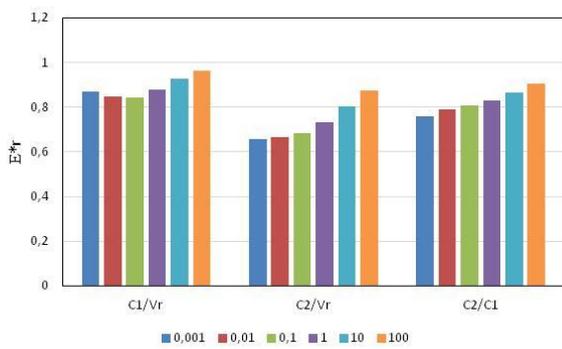
(b) Diagrama Black



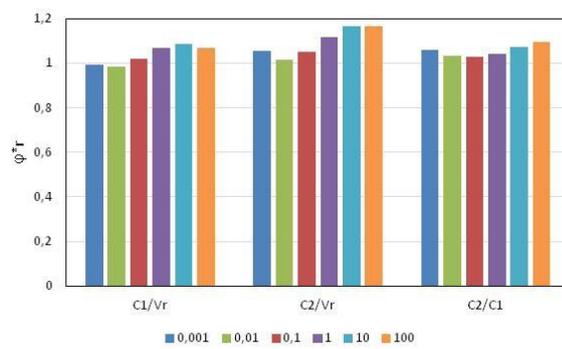
(c) Curva Mestra de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestra de Ângulo de Fase (@21°C)



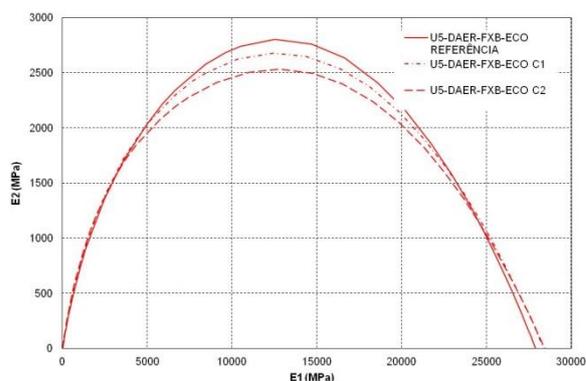
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



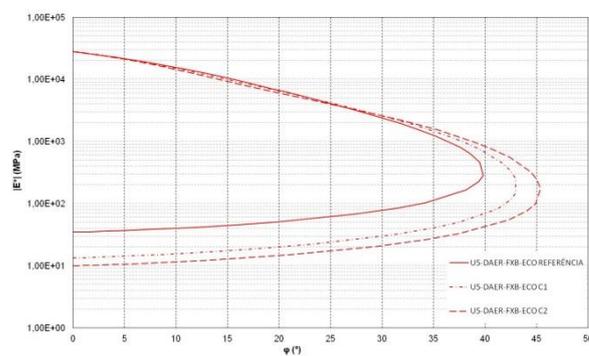
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

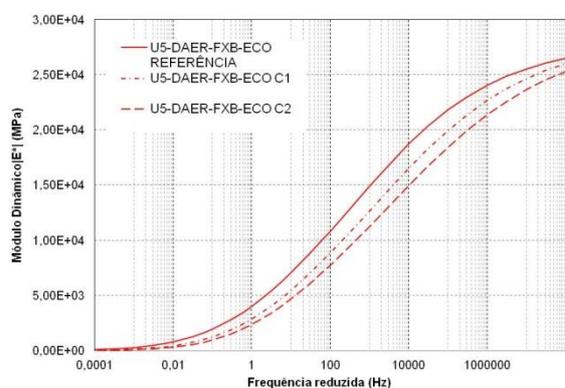
Figura 63 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DAER-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água



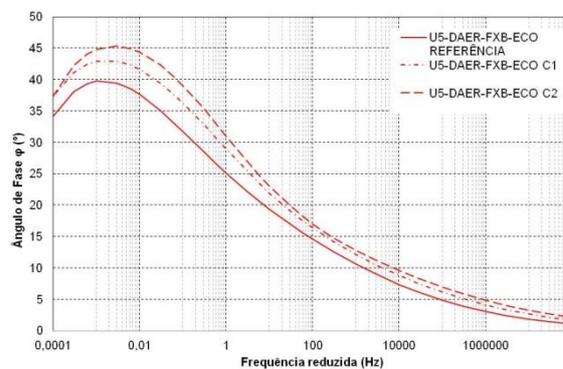
(a) Espaço Cole-Cole



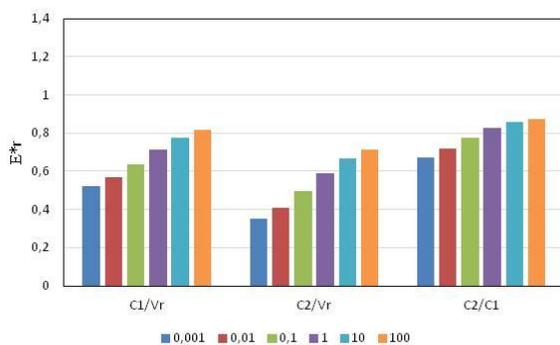
(b) Diagrama Black



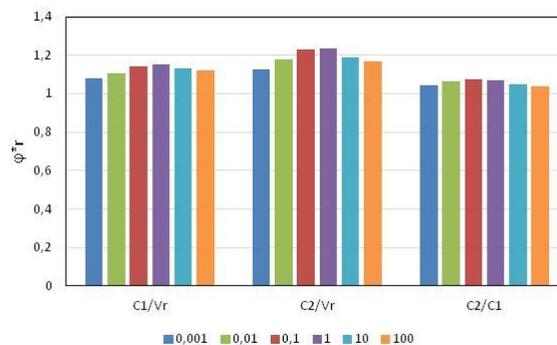
(c) Curva Mestra de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestra de Ângulo de Fase (@21°C)



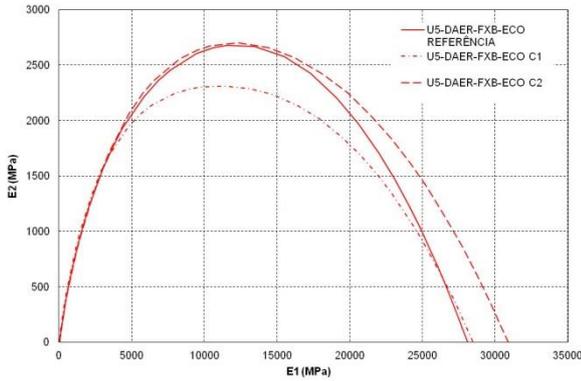
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



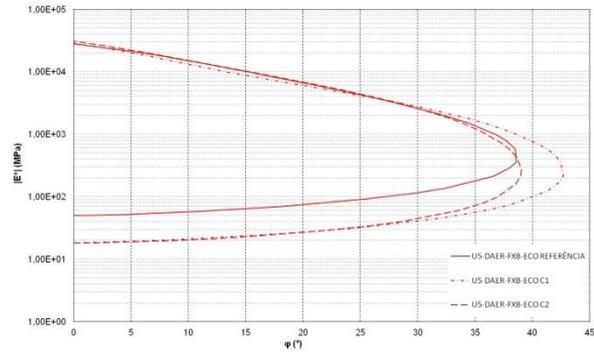
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

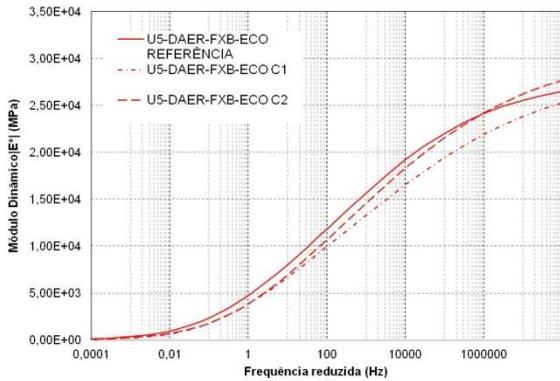
Figura 64 - Propriedades viscoelásticas da mistura U5-DNIT-FXB-ECO frente ao efeito deletério da água



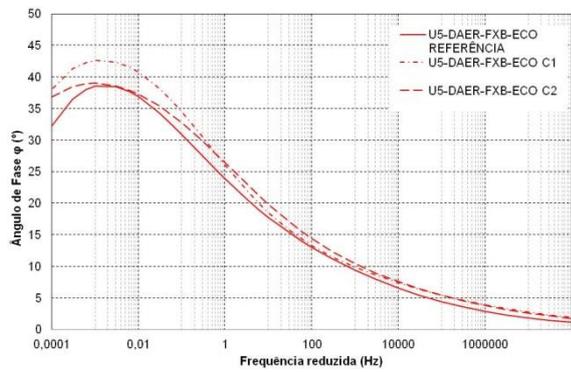
(a) Espaço Cole-Cole



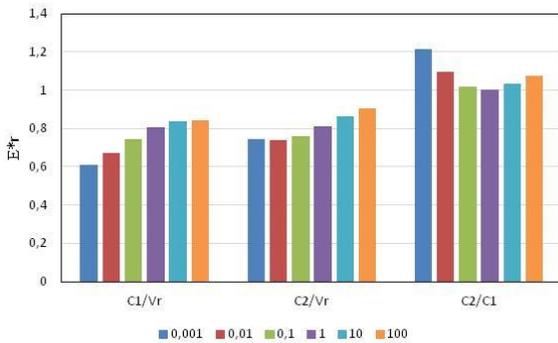
(b) Diagrama Black



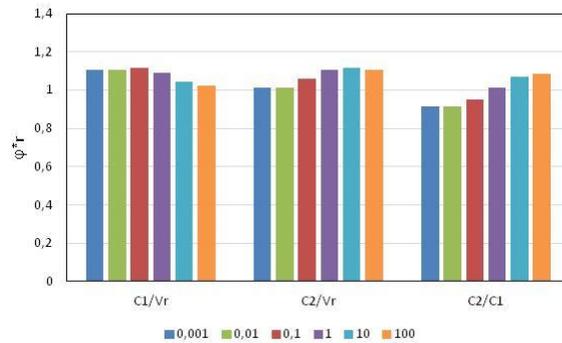
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

Nas Figuras 62 (e) a 64 (e) estão plotados os gráficos de módulo retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram ligante modificado por borracha (ECOFLEX AB-08). Observa-se na Figura 62 (e) que a mistura U3-DAER-FXB-ECO

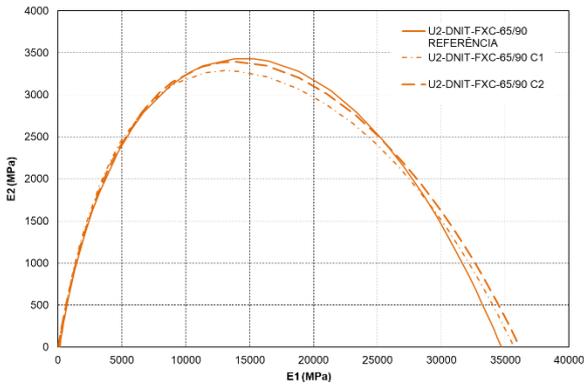
reteve, em média, nas baixas frequências, aproximadamente 80% do seu módulo original após o C1 e aproximadamente 95% nas altas frequências e, após o C2, a mistura passou a reter cerca de 60% do seu valor de módulo original nas baixas frequências e 85% nas altas frequências.

Na Figura 63 (e) a mistura U5-DAER-FXB-ECO reteve, em média, nas baixas frequências, aproximadamente 50% do seu módulo original após o C1 e aproximadamente 80% nas altas frequências e, após o C2, a mistura passou a reter cerca de 35% do seu valor de módulo original nas baixas frequências e 70% nas altas frequências, indicando que esta mistura tem uma maior tendência de sofrer danos pela ação da água.

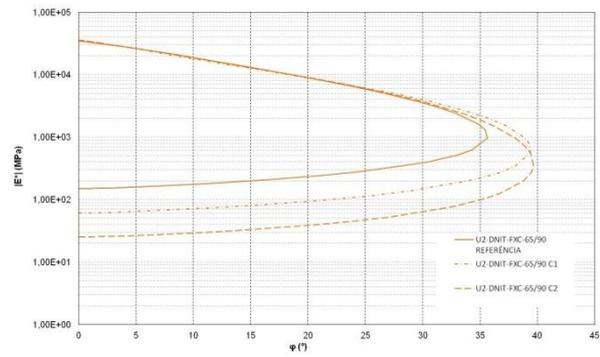
Na Figura 64 (e) a mistura U5-DNIT-FXB-ECO reteve, em média, nas baixas frequências, aproximadamente 60% do seu módulo original após o C1 e aproximadamente 80% nas altas frequências e, após o C2, a mistura apresentou comportamento distinto das outras misturas com asfalto borracha, passando a reter cerca de 75% do seu valor de módulo original nas baixas frequências e 90% nas altas frequências.

Nas Figuras 62 (e) a 64 (e) estão plotados os gráficos de ângulo de fase retido pelas frequências escolhidas das misturas que utilizaram ligante modificado por borracha (ECOFLEX AB-08). Nas três misturas os valores de ângulo de fase retido ficaram acima de 1 ou muito próximos desse valor, variando muito pouco com o aumento da frequência, após o primeiro ciclo. Após o segundo ciclo de dano por umidade há um aumento no ângulo de fase retido, aumentando conforme se aumenta o valor da frequência, indicando comportamento elástico reduzido.

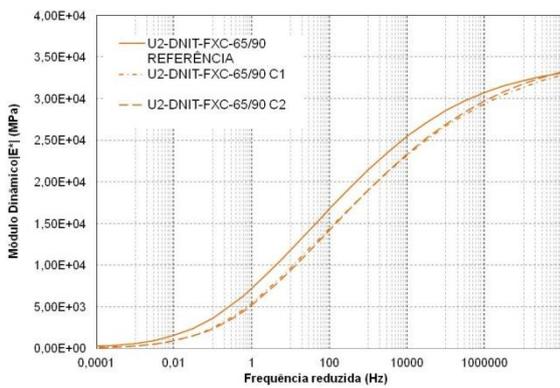
Figura 65 - Propriedades viscoelásticas da mistura U2-DNIT-FXC-65/90 frente ao efeito deletério da água



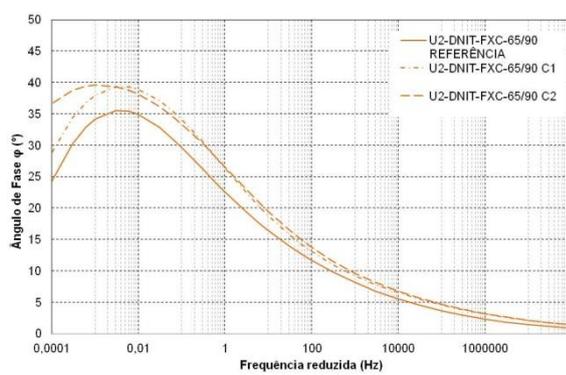
(a) Espaço Cole-Cole



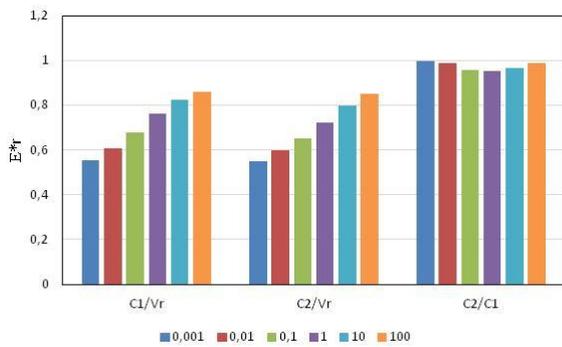
(b) Diagrama Black



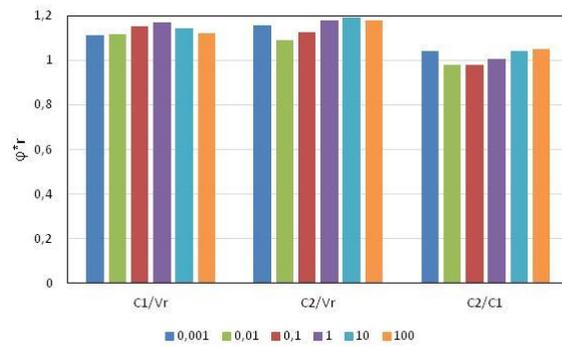
(c) Curva Mestra de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestra de Ângulo de Fase (@21°C)



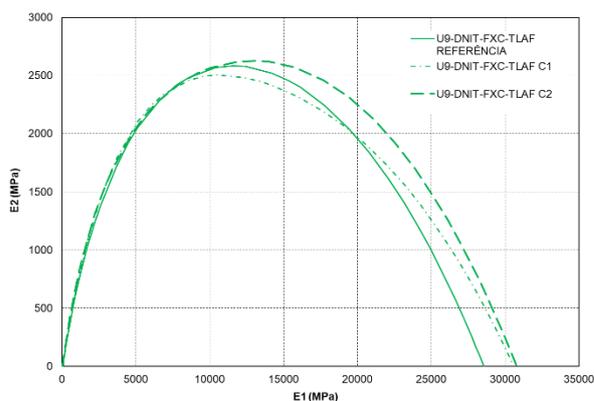
(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



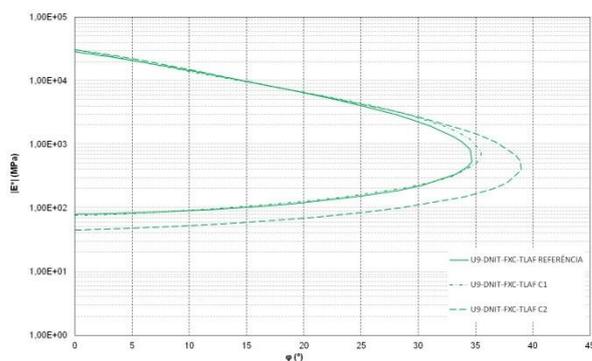
(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

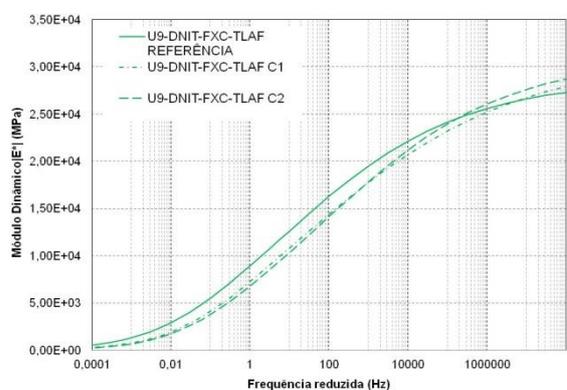
Figura 66 - Propriedades viscoelásticas da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF frente ao efeito deletério da água



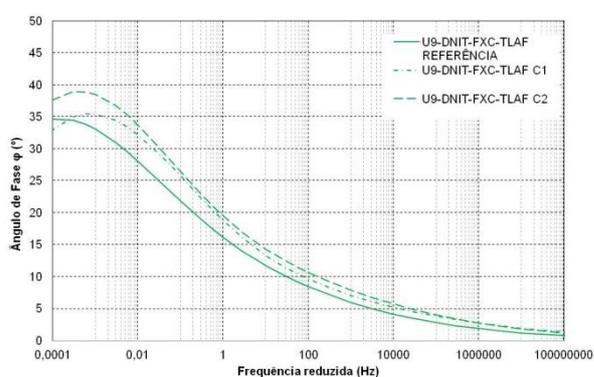
(a) Espaço Cole-Cole



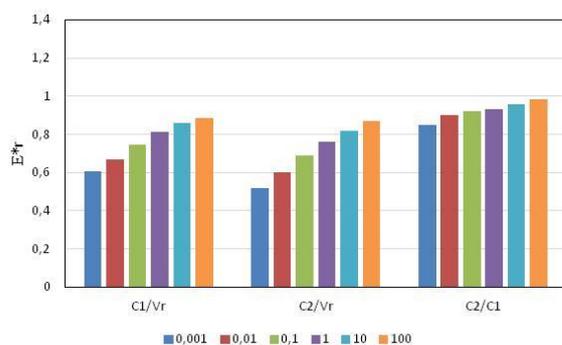
(b) Diagrama Black



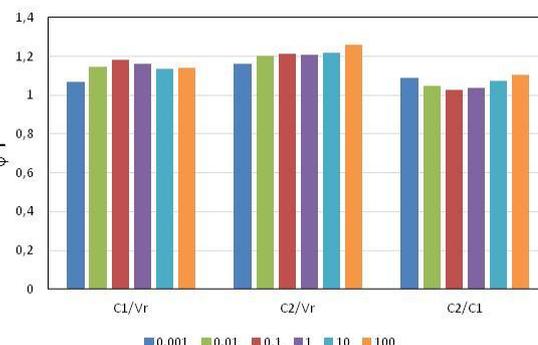
(c) Curva Mestre de Módulo Dinâmico (@21°C)



(d) Curva Mestre de Ângulo de Fase (@21°C)



(e) Módulo Dinâmico retido para diferentes frequências (@21°C)



(f) Ângulo de fase retido para diferentes frequências a (@21°C)

Fonte: Autora, 2019.

Nas Figuras 65 (e) a 65 (f) estão plotados os gráficos de módulo e ângulo de fase retido, respectivamente, pelas frequências escolhidas da mistura com o ligante AMP 65/90. Observa-se na Figura 65 (e) que a mistura U2-DNIT-FXC-65/90 reteve,

em média, nas baixas frequências, aproximadamente 60% do seu módulo original após o C1 e aproximadamente 85% nas altas frequências e, após o C2, a mistura manteve o mesmo padrão de valores e comportamento. Na Figura 65 (f), nota-se que todos os valores de ângulo de fase retidos ficaram acima de um, variando muito pouco com o aumento das frequências e aplicação dos ciclos de dano por umidade, indicando que tanto comportamento viscoso como o elástico foram reduzidos.

Nas Figuras 66 (e) a 66 (f) estão plotados os gráficos de módulo e ângulo de fase retido, respectivamente, pelas frequências escolhidas da mistura com o ligante TLA FLEX. Observa-se na Figura 66 (e) que a mistura U9-DNIT-FXC-TLAF reteve, em média, nas baixas frequências, aproximadamente 60% do seu módulo original após o C1 e aproximadamente 90% nas altas frequências e, após o C2, a mistura passou a reter cerca de 50% do seu valor de módulo original nas baixas frequências e 80% nas altas frequências. Na Figura 66 (f), nota-se que todos os valores de ângulo de fase retidos ficaram acima de um, variando muito pouco com o aumento das frequências e aplicação dos ciclos de dano por umidade.

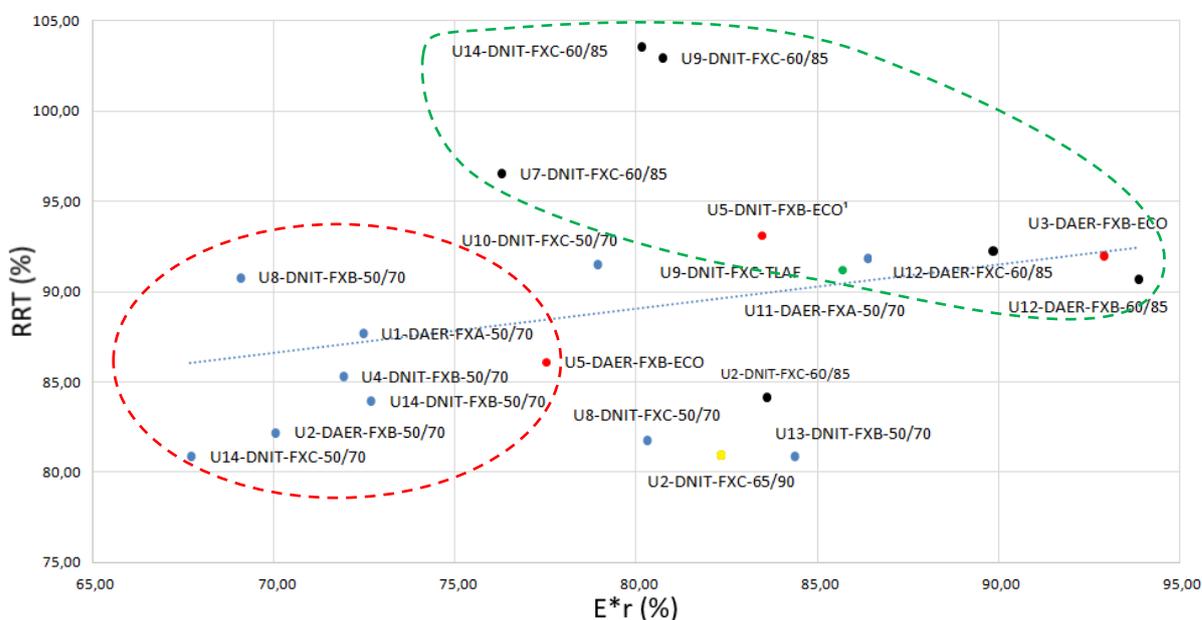
De maneira geral, o que se observa nas Figuras 43 a 66 é que após os ciclos de danificação por umidade induzida: no plano Cole-Cole, item (a), a mistura referência apresenta menor tendência viscosa em relação às demais, indicando maior capacidade de atenuação dos esforços e retorno às condições iniciais, também se observa queda no valor de  $E_2$  indicando menor mobilização do esqueleto mineral e menor dissipação de energia; no Diagrama Black, item (b), há aumento do ângulo de fase e conseqüente diminuição da rigidez; na curva mestra de  $|E^*|$ , item (c), há uma diminuição no valor de módulo dinâmico, indicando novamente queda na rigidez; na curva mestra de  $\varphi$ , item (d), há aumento no ângulo de fase, indicando perda da viscoelasticidade, alertando para a diminuição da capacidade do ligante dentro da mistura causada pela perda de ligação entre os componentes, modificando completamente a distribuição de esforços dentro da estrutura.

Visualmente, nota-se também um maior afastamento de todas as curvas após os ciclos de dano por umidade induzida nas misturas que utilizaram CAP 50/70, sendo o distanciamento da curva de referência para a curva que representa a mistura após o ciclo 1 mais expressivo. De maneira geral as misturas com ligantes modificados tiveram um menor afastamento entre as curvas de referência e as curvas após os

ciclos de dano por umidade, indicando que estas misturas são menos suscetíveis à ação deletéria da água.

Com o intuito de verificar tendências algumas correlações diretas entre parâmetros foram testadas como por exemplo a Si versus RRT, Si versus módulo retido, entre outras, porém os resultados eram bastante dispersos e não apresentavam tendências conclusivas. Uma das relações plotadas foi a de RRT versus módulo retido à 10 Hz, tal gráfico, apresentado na Figura 67, mostra uma tendência dos melhores valores de RRT apresentarem menores quedas no módulo, ou seja, as misturas encontradas na parte superior e à direita do gráfico. Pode-se observar que ali se encontram as misturas que levam ligante modificado por polímero e as misturas com asfalto borracha. Também é possível observar a tendência das misturas com ligante convencional apresentarem menores valores de RRT e maiores quedas no módulo retido, encontradas na parte inferior à esquerda do gráfico. A dispersão dos dados ainda é elevada, fato talvez explicado pela concentração de resultados de RRT acima de 80%.

Figura 67 - Gráfico do RRT pelo  $E^*r$  a 10 Hz



Fonte: Autora, (2019).



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção final serão apresentadas as conclusões observadas no decorrer desta pesquisa. Posteriormente serão elencadas sugestões relevantes acerca de estudos futuros que se mostraram pertinentes ao longo desta pesquisa.

### 5.1 CONCLUSÕES

Apresentam-se, a seguir, as conclusões referentes aos objetivos esperados no presente trabalho. Ressalta-se que as conclusões obtidas se limitam ao universo dos materiais estudados, aos resultados do programa experimental executado e suas respectivas análises. De acordo com o delinear metodológico deste trabalho e os resultados obtidos, conclui-se que:

- a) Das 12 amostras de rochas, avaliadas e classificadas pelo ensaio de lâmina petrográfica, foram identificados os seguintes tipos de rocha que foram então apresentados em uma sequência de classificação química (quantidade de sílica): primeiramente as rochas ígneas vulcânicas básicas (P1, P2, P9, P4) e as ígneas hipabissais (P13 e P15); rochas intermediárias: ígneas vulcânicas (P14 e P6/P7/P8); rochas ácidas: ígneas vulcânicas (P3) ígneas plutônicas (P10 e P5) e por último a rocha metamórfica (P11/P12).
- b) O ensaio de Fluorescência de Raios-X determinou a composição química dos agregados, fornecendo percentuais de elementos químicos importantes para auxiliar na classificação quanto a acidez das rochas.
- c) A adesividade ao ligante betuminoso apenas é satisfatória para amostra da pedreira P1, para as outras 11 pedreiras deste estudo o resultado foi considerado não satisfatório para o ligante CAP 50/70 sem dope.
- d) Análise comparativa a partir dos resultados dos ensaios de lâmina petrográfica, FRX e adesividade ao ligante betuminoso resultou na criação de um *ranking* para classificação quanto a adesividade visual, que vai do excelente ao péssimo. Foi possível perceber a forte correlação entre o teor de sílica (Si) e a qualidade do ensaio de adesividade. Isto quer dizer, rochas com elevado teor de Si foram classificadas como intermediárias e ácidas, apresentando pior desempenho no ensaio de adesividade visual. As relações

Fe/Si e Ca/K também aparecem como bons indicadores para prever o comportamento dos agregados quando avaliada a adesividade ao ligante betuminoso.

- e) No ensaio de Dano por Umidade induzida (DUI) todas as misturas apresentaram valores que indicam perda de resistência por umidade induzida. Porém todas elas atendem o limite de RRT estabelecido por Hicks (1991) e pela metodologia Superpave, indicando não haver grandes problemas nas misturas produzidas no estado em termos de efeito deletério da água.
- f) Ao analisar a rigidez por meio do ensaio de módulo complexo com protocolo de danificação por umidade induzida, a modelagem 2S2P1D mostrou-se adequada na avaliação do comportamento reológico das misturas e também na compreensão do efeito deletério da água. Notaram-se diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante após a ciclagem. Após os ciclos de danificação por umidade induzida observa-se um aumento do ângulo de fase e diminuição nos valores de módulo indicando queda na rigidez, ou seja, perda da viscoelasticidade, alertando para a diminuição da capacidade do ligante dentro da mistura causada pela perda de ligação entre os componentes, modificando completamente a distribuição de esforços dentro da estrutura.
- g) Notou-se ainda o afastamento de todas as curvas após os ciclos de dano por umidade induzida, mais expressivo nas misturas que utilizaram CAP 50/70 do que nas misturas com ligantes modificados. Este distanciamento da curva de referência para a curva que representa a mistura após o ciclo 1 foi mais significativo, indicando que misturas com ligante convencional são mais suscetíveis à ação deletéria da água do que as com ligante modificado.
- h) O cálculo de módulo retido pode ser uma boa alternativa em substituição ao ensaio de RRT para prever o comportamento das misturas frente à ação deletéria da água.
- i) Os menores valores de módulo retido, tanto nas baixas quanto nas altas frequências, são encontrados para as misturas com ligante convencional, CAP 50/70, indicando maior suscetibilidade ao dano por umidade dessas misturas quando comparadas com as misturas com ligantes modificados.

- j) A maioria dos valores de ângulo de fase retidos ficaram acima de um, variando muito pouco com o aumento das frequências e aplicação dos ciclos de dano por umidade, indicando que tanto comportamento viscoso como o elástico foram reduzidos.
- k) Pode-se dizer que o ciclo que mais alterou o comportamento das misturas foi o Ciclo 1, após o Ciclo 2 não houve alteração significativa nos valores das misturas de maneira geral.

## 5.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Em função dos temas abordados durante o estudo e da análise dos resultados obtidos através dos ensaios realizados, compreendeu-se a importância que novas pesquisas podem trazer para o melhor entendimento acerca do tema proposto neste trabalho. Sugerem-se então linhas de abordagem futuras que o autor achou pertinente durante este estudo, sendo elas:

- a) Estudar a interação rocha/ligante do ponto de vista das ligações químicas e das propriedades periódicas que indicam a tendência de um átomo, numa ligação química, em atrair ou repelir elétrons, aprofundando assim os conhecimentos sobre adesividade;
- b) Estudar o comportamento das misturas à fadiga quando submetidas ao efeito deletério da água;
- c) Estudar o efeito deletério da água nas demais camadas do pavimento;
- d) Realizar mais ciclos de danificação por umidade para melhor estudar o comportamento das misturas frente à ação da água;
- e) Avaliar as variações de propriedades mecânicas para ensaios realizados com misturas produzidas em laboratório e em usina de asfalto.

## REFERÊNCIAS

AASHTO, 2002, **Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO R 30, Washington, D. C.

AASHTO. **Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 342 11, Washington, D. C., 2005.

\_\_\_\_\_. **Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. AASHTO T 283-14. Washington, D. C., 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida**. ABNT/NBR 15617:2011. Rio de Janeiro, 2011.

AIREY, G. D.; BROWN, S. F. **Rheological performance of aged polymer modified bitumens proceedings**. Association of Asphalt Paving Technologists, v. 67, p. 66-87. 1998.

AIREY, G. D., et al. **The influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage**. Construction and Building Materials. Vol. 22, pp. 2015-2024. 2008.

ALEXANDRE T. L.; BUENO, M. I. M. S. Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. X-ray spectrometry, v. 35, n.4, p. 257-260, 2006.

ALIMANI, M. **Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux**. Thèse de Docteur. Université Pierre et Marie CURIE. Paris, France. 1987.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. – Santa Maria. Junho. 2016

Almeida Jr.P. O. B. et al. **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Revista Transportes. ISSN: 2237-1346. DOI:10.14295/transportes.v26i2.1407. 2018.

AL-QADI, I.L., ELSEIFI, M., CARPENTER, S.H. **Reclaimed Asphalt Pavement – A literature review**. Project Report FHWA-ICT-07-001. Illinois Center for Transportation. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, 2007.

ANDERSON, D.A.; BAHIA, H.U; DONGRE, R. **Rheological properties of mineral filler-asphalt mixtures**. Association of Asphalt Paving Technologists, v.42, p 37-66. USA. 1992.

ANITELLI, Andre. **Estudo do Dano por Umidade de Misturas Densas com Ligantes Asfálticos Convencional e Modificado com Polímero SBS**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transporte – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

ARAMBULA, E. M. **Influence of Fundamental Material Properties and Air voids Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes**. Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, Texas. 2007.

ARAÚJO, M. de F. A. de S. **Efeito de radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente**. Dissertação de Mestrado. UFOP. 2007.

ARCHILHA, N.; CEIA, M.; MISSÁGIA, R.; NETO, I. L. Comparação entre as constantes elásticas estimadas pelas velocidades e pela composição mineral de rochas carbonáticas. In: V Simpósio Brasileiro de Geofísica. [S.l.: s.n.], 2012.

AZEVEDO, P. N. e FILHO, A. F. S. **Asfalto Modificado com Polímero SBS**. Universidade Católica de Salvador, UCSal Salvador – BA, 2009.

BACK, A. H. **Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do estado do RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U. y KIGGUNDU, B. M. **Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures**. International Journal of Pavement Engineering, 2005, vol. 6, núm. 4, pp. 229-239.

BAHIA, H. et al. Nonlinear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. **J. Assoc. Asphalt Paving Tech**, v. 68, p. 1-34. 1999.

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

BARBOZA JR, V dos S. **Efeito deletério da água em misturas asfálticas com adição de ligante modificado com polímero e de cal**. Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria – RS. 2018.

BARRA, B. S. **Avaliação do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Utilizando Materiais do Estado do Pará com o Emprego de Pó Calcário**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2005.

BARRA, B. S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC. 2009.

BASTOS, G. A. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis**. 2010. 247 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BERNUCCI, L. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. reimp. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010. 504 f.

BOCK. André Luiz. **Desempenho à Fadiga de Misturas em Concreto Asfáltico com Diferentes Formas de Incorporação de Cal**. 2009. 88 p. Trabalho de conclusão de curso, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

BOCK. André Luiz. **Efeitos da Incorporação de Cal Hidratada em Concretos Asfálticos Elaborados com Ligante Convencional e Modificado**. 2012. 142 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2012.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2014.

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

BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Artliber Editora, 2ª edição, São Paulo, 277 p. 2006.

CASTAÑEDA, E. **Contribution de Methodes Non Destructives a l'Evaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux**. Thèse de Doctorat. Université de Nantes. 2004.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of viscoelasticity: an introduction**. Academic Press, 1ª edição, New York. 1971.

CHRISTENSEN, R.M. **Theory of Viscoelasticity**. 2ª ed. New York: Academic.1982.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília, 2017. 406 p. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 07 de novembro 2017.

CORREA, B. **Efeito deletério da água na rigidez de misturas asfálticas recicladas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

CORTIZO, M. S. et al. **Polymer Degradation and Stability**. 86:275-82. 2004.

COSME, R. L. **Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória de Aciaria (EMA)**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES. 2015.

CUI, X.; ZHANG, J.; ZHANG, N.; ZHOU, Y.; GAO, Z.; SUI, W. **Laboratory simulation tests of effect of mechanical damage on moisture damage evolution in hot-mix asphalt pavement**. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 16 N° 8, pp. 699-709. 2015.

DAS, P.K.; KRINGOS, N. **Coupling of oxidative ageing and moisture damage in asphalt mixtures**. Road Materials and Pavement Design. Vol. 16, Supplement 1, Special Issue: EATA 2015, pp. 265-279. 2015.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]**. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007

DE LA ROCHE, C. **Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux: Expérimentations et Nouvelles Perspectives d'Analyse**. 1996. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Ecole Centrale de Paris, Paris, 1996.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER/RS – ES-P 16/91** – Concreto asfáltico. Porto Alegre, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 78/94** - Método de Ensaio. Misturas Betuminosas – Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso. Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-IE 006/94**. Instrução de Ensaio. Materiais rochosos usados em rodovias – Análise petrográfica. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT TER 005**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **DNIT 136/2018-ME**: Misturas Asfálticas – Determinação de resistência à tração por compressão diametral – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT 180/2018 – ME**: Misturas Asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Método de ensaio. Rio de Janeiro – RJ. 2018.

DI BENEDETTO, H. et al. Mechanical testing of bituminous mixtures. In: PARTL, M. N. et al. (Eds.). **Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials**: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB Series. Dordrecht: Springer, 2013. p. 143-256.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges**. Paris: Hermes-Lavoisier. 2005

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. **Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes**. Road Materials and Pavements Design. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 2004. 41p

DIAB, A.; YOU, Z. **Development of a realistic conditioning and evaluation system to study moisture damage of asphalt materials**. Airfield and Highway Pavement, pp. 1008-1017. 2013.

EPPS, J.A. et al. **Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design**. NCHRP Report 444. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 2000.

EPPS, J. A.; LITTLE, D.N. **The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Prepared for National Lime Association, 48p. 2001.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2018.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 318 p. Tese de Doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental. São Paulo – SP. 2002.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. Dissertação de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. 2015.

FURLAN, A.P. Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2006.

FURLAN, A. P; DOS SANTOS, C. R. G; GIGANTE, A. C. & FABBRI, G. T. P. **Algumas considerações acerca de ensaios para avaliação do dano por umidade em mistura asfáltica densa**. 35ª RAPv. Rio de Janeiro. 2004.

GOUVEIA, L. T., FURLAN, A. P., PARREIRA, A. B., FERNANDES JUNIOR, J. L., FABBRI, G. T. P., **Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade**. Anais do XVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Florianópolis, SC, 2004.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Área dos Transportes) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2006.

GRATTAN-BELLEW, P.E. **Péetrographie and technological methods for evaluation of concrete aggregates**. In: Ramachandran, V.S. e Beaudoin, J.J. (editors), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, techniques, and applications, Noyes Publications, EUA: 63-230. 2001.

HICKS, R. P. **Moisture damage in asphalt concrete**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991, 91p.

HOSSAIN, M.; FAGER, G.; MAAG, R. G. **Superpave volumetric mixture design and analysis handbook**. Kansas State University Manhattan, Kansas. USA. 2016

HUANG, Y.H. **Pavement Analysis and Design**. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, EUA. 2004.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell bitumen handbook**. 6ª edition. London, UK. 2015.

JENSEN, V.; SIBBICK, T. **RILEM Péetrographie method: practical use and comparison with other péetrographie methods in use**. Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens: 579-586. 2001.

JOHNSON, D. R.; FREEMAN, R. B. **Rehabilitation Techniques for Stripped Asphalt Pavements**. Western Transportation Institute. Bozeman, Montana, Report No. FHWA/MT-002-003/8123. 2002.

JOLIVET .Y.; MALLOT,M. **Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator**. 2º Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.

KANDHAL, P. S.; COOLEY, L. A. Jr. **Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer**. NCHRP Report 508. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 2003.

KANITPONG, K. y BAHIA, H. U. **Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance**. International Journal of Pavement Engineering. 2008, vol. 9, núm. 1, pp. 9-17.

KENNEDY, T. W.; ROBERTS, F. L.; LEE, K. W. **Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures** - Transportation Research Record 911, p. 134 - 143. Washington, DC. 1983.

KESTENBAC, H.J.; BOTA FILHO W.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

KIM, Y. R.; KHOSLA, N. P. KIM, N. **Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete**. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. Special Technical Publication STP 1147, American Society of Materials (ASTM), p. 310-328. Meininger, R. C., editor, Philadelphia. 1992.

KIM, R. Y.; **Modeling of asphalt concrete**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2009. 460p.

KIGGUNDU, B. e ROBERTS, F. **Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-art and Critical Review of Test Methods**. National Center for Asphalt Technology. 1988.

KINLOCH, A. **Adhesion and Adhesives**. University of London. Ed. Chapman and Hall. London, UK.1990.

KLOMPEN, E.T.J.; GOVAERT, L.E. **Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Thermorheologically Complex Materials**. Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 3, No 1, p. 49-69. 1999.

LEE, S.; MUN, S.; KIM, Y.R. **Fatigue and rutting performance of lime-modified hot-mix asphalt mixtures**. Construction and Building Materials. Vol. 25, pp. 4202-4209. 2011.

LIBERATORI, L. A.; Constantino, R. S. **Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas - Estado da Arte**. 18º Encontro de Asfalto - Rio de Janeiro RJ. 2006.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. **The benefits of hydrated Lime in hot mix asphalt**. Report for National Lime Association, 2006. 80p.

LOTTMAN, R. P. **NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete**, Transportation Research Board, National Research Council, 24p. Washington, D.C. 1978.

MAHBOUB, K.; LITTLE, D.N. **Improved Asphalt Concrete Design Procedure**. Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute.1998.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures**. Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-01-02, 2004.

MAJIDZADEH, K. e BROVOLD, F. N. **State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures**, Highway Research Board, Special Report No. 98, 77p. 1968.

MALLICK, R.; GOULD, J.; BHATTARJEE, S.; REGIMAND, A.; JAMES, L.; BROWN, E. **Development of a Rational Procedure of Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Paving Mixes**. 82nd Annual TRB Meeting. Washington, D.C. 2003.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 638 p.

MEHRARA, A & KHODAI, A. **A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete**. Construction and Building Materials. Vol. 38, pp. 423-442. 2013.

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MELO, J. V. S. de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2014.

MENEGAT, R. et al. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1998.

MINHOTO, M. J. da C. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal. 329 f. 2005.

MOHAMED, E. H. H. **Debonding location in asphalt concrete associated with moisture damage**. Journal of Materials in Civil Engineering. 1993, vol. 5, núm. 4, pp. 497-509.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP). 1998.

MONISMITH, C. L.; EPPS, J. A; FINN, F. N.; **Improved asphalt mix design**. Proceeding association of asphalt paving technologists. Vol 54. 1985

MOREIRA, L. S. **Avaliação de Mistura Asfáltica Utilizada na Malha Rodoviária Paraense: Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade da Amazônia, Belém, PA. 2009.

Moura, E. **Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2001.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 2010. 299 F. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2010.

MURAYA, P. M. **Permanent Deformation of Asphalt Mixtures**. Dissertação de PhD. Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology. Holanda. 2007.

NADA, M. H. **Scanning Electron Microscopy**. BAOJ Microbio 1: 005. Department of Chemistry, University of Iowa, USA. 2015. Disponível em: <<https://bioaccent.org/microbiology/microbiology05.php>> Acessado em: 10 de outubro de 2017.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. 2008. 204f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University, 2015.

NASCIMENTO-DIAS, B. L. do; OLIVEIRA, D. F.; ANJOS, M. J. dos. **A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X**. Revista Brasileira de Ensino Física. vol.39, n.4, e4308, 2017. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S180611172017000400409&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S180611172017000400409&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 16 de setembro de 2018.

NEVES FILHO, A. S.; PINTO; S. & CARNEIRO, L. A. V. **Influência da adição de dopes na adesividade em misturas asfálticas a quente**. 38ª RAPv / 12º ENACOR. Manaus, AM – Brasil. 2007.

OLARD, F. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à bases températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé**. 221 f. Tese (Doutorado). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État. 2003.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. **Road Material sand Pavement Design**, v. 4, n. 2, p. 185-224, 2003.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H.; DONY, A.; VANISCOTE, J. C.; **Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics**. Material sand structure, Vol 38. p 121-126. Janeiro 2005.

OLIVEIRA, A. M. dos S.; DE BRITO, A. N. S.; **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 2004.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. **Pavement design and materials**. 542p. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008.

PARREIRA, P. Metodologia de ed-xrf e aplicações com um sistema portátil. Publicação Técnica PT, v. 1, n. 07, 2007.

PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. M. S. Determinação de arsênio em águas contaminadas usando fluorescência de raios-x por Energia dispersiva. Química Nova, v. 28, n. 4, n. 579-582, 2005.

PEREIRA, M. M. L. **Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento**. 2012. 143 f. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (doutorado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1991.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil** – Cachoeira do Sul (folha SH.22-Y-A), Porto Alegre, CPRM, 2000.

POSSEBON, E. P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2018.

POWER, T.O., HAMMERSLEY, G.P. **Practical concrete petrography**. Concrete, Vol. 12 (8), The Concrete Society: 27-31. 1978.

PRONK, A. C. **The Huet-Sayegh model**: a simple and excellent rheological model for master curves of asphaltic mixes. ASCE. Baton Rouge, Louisiana. 2005.

- QUINTANA, H. A. R. & ANSELMINI, L. A. M. **Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante.** Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 14 (2): 297-312, julio-diciembre de 2010. ISSN 0123-2126.
- RENAUD, C. L. R. S. A. **Module de rigidité et comportement em fatigue desenrobés bituminuex. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse.** Tese de Doutorado – Ecole Centrale Paris.1996.
- RIVIÈRE, N. **Comportement en fatigue des enrobés bitumineux.** Tese (Doutorado). Université de Bordeaux I. Bordeaux. 1996.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction.** 1. ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.
- ROBERTS, F. L.; Kandhal, P. S. e Brown, E. R.; Lee D. Y. e Kennedy T. W. Hot Mix Asphalt Materials, **Mixture Design and Construction.** NAPA Research and Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996, 2 edição. NCAT.
- RONDÓN-QUINTANA, H. A.; HERNÁNDEZ-NOGUERA, J. A.; REYES-LIZCANO, F. A. **A review of warm mix asphalt technology: Technical, economical and environmental aspects.** Ingeniería e Investigación, vol. 35, núm. 3, diciembre, 2015, pp. 5-18. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2015
- ROSSATO, F. P. 2015. 221f. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- SABOURI, M. A., KIM, Y. R. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2447, 117–125. <https://doi.org/10.3141/2447-13>, 2014.
- SANT'ANA, W. C. **Estudo de Misturas de Areia-Asfalto a Quente para o Estado do Maranhão.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP). 1992.
- SANTOS, E. S.; GAMA, E. M.; SOUZA, A.; MATOS, R. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. Enciclopédia Biosfera, v. 9, p. 17, 2013.
- SANTOS, J. P. L. **Análise de modelos reológicos viscoelásticos através da formulação mista em elementos finitos.** 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- SASSI, M. M. ; SPECHT, L. P. **Levantamento das usinas de concreto asfáltico em operação no Estado do Rio Grande do Sul.** Revista Estradas (Porto Alegre), v. 21, p. 58-61, 2016.

SAYEGH, G. **Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux.** Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de Paris. 1965.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo.** 2018. 270f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

SEPLAG – Secretaria do Planejamento, Gestão e Participação Cidadã. **Situação dos transportes de carga no Rio Grande do Sul. Porto Alegre,** 2013. Disponível em : <<http://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201512/15134118-20150928173641rs-2030-tr-3-situacao-dos-transportes-de-cargas-no-rs-03-12.pdf>>. Acesso em: 08 set 2017

SIMS, I., BROWN, B. **Concrete aggregates.** In Peter C. Hewlett (Editor), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Arnold. London: 903-1011. 1998.

SIMS, I.; SMART, S.; HUNT, B. **Practical petrography - the modern assessment of aggregates for AAR potential.** Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 493-502. 2000.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. Fundamentos de Química Analítica. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002

SMITH, M.R.; COLLIS, L. **Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes.** 3rd edition, Revised by Fookes, P.G., Lay, J., Sims, I., Smith, M.R., West, G., Geological Society Engineering Geology Special Publication N° 17, London, 339 p. 2001.

SOLAIMANIAN, M.; HARVEY, J.; TAHMORESSI, M.; TANDON, V. **Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminar.** San Diego, California Washington DC: National Academies Press. 2003.

SOMÉ, S. C.; GAUDEFROY, V.; PAVOINE, A. Viscoelastic behavior of fluxed asphalt binders and mixes. In: CONGRÈS FRANÇAIS DE MÉCANIQUE, 22., 2015, Lyon. **Anais...** Lyon: CEREMA/L'UNAM, 2015.

SOUSA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C. L. **Summary report on permanent deformation in asphalt concrete.** Strategic Highway Research Program – SHRP-A/IR-91-104. Washington, EUA, 1991. 125 p.

SOUZA, J. B., HARVEY, J., OAINTE, L., et al. **Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt - Aggregate Mixtures.** In: Report n° SHRPAUWP - 91-523, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., EUA. 1991.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

STASTNA, J.; ZANZOTTO, L.; HO, K. **Fractional complex modulus manifested in Asphalt.** In: Rheologica Acta, vol. 33, p. 344-354, 1994.

TAIRA, C.; FURLAN, A.P.; FABRI, G.T.P. **Avaliação do Efeito do Asfalto Modificado com Polímero nas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas.** XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes ANPET, Rio de Janeiro, RJ. 2003.

TAPSOBA, N. **Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite** Tese de doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-en-Velin, 2011.

TAREFDER, R.; AHMAD, M.; **Evaluating the relationship between permeability and moisture damage of asphalt concrete pavements.** J. Mater. Civ. Eng. Vol. 27 N° 5, 04014172. 2015.

TARRER, A. R.; WAGH, V. **The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding.** SHRP, National Research Council, Washington, D.C. 1991.

TAYLOR, M.A.; KHOSLA, N.P. **Stripping on asphalt pavement: State of the art,** TRR 911. 1983.

VIERO, Ana Cláudia. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul /** Organização Ana Cláudia Viero e Diogo Rodrigues Andrade da Silva. Porto Alegre: CPRM, 2010.

WITCZAK, M. W. et al. **Simple performance test for Superpave mix design, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465,** Washington, D. C., EUA, 2002.

WHITEOAK, D. **The Shell bitumen handbook.** 1 ed. Cambridge, 1990

WOLDEKIDAN, M. F. **Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar.** Tese de Doutorado. Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2011.

YODER, E. J. & WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 1975.

YOON, H. H.; TARRER, A. R. **Effect of aggregate properties on stripping.** Transportation Research Record 1171, p. 37-43. Washington, D.C. 1988.

ZANIEWSKI, J.; VISWANATHAN, A. G. **Investigation of Moisture Sensivity of Hot Mix Asphalt Concrete.** Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia University. 2006. Disponível em:

<https://web.statler.wvu.edu/~wwwasph/wvdohreports/Moisture%20Sensitivity%20of%20HMAC-Viswanathan%2005-2006.pdf> Acessado em: 23/08/17.

ZANZOTTO, L.; STASTNA, J.; HO, K **Characterization of regular and modified bitumens via their complex modulus.** In: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 59, p.1897-1905, 1996.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – IMAGENS DAS 12 AMOSTRAS ANALISADAS E RESULTADOS COMPLETOS REFERENTES AO ENSAIO DE LÂMINA PETROGRÁFICA

Figura 68 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P1



Tabela 16 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P1

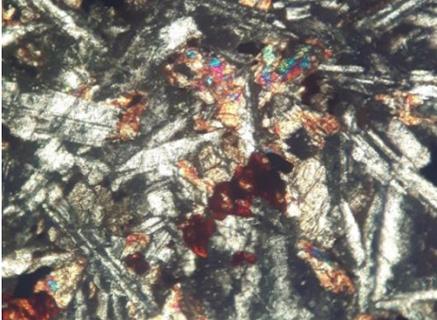
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P1	<b>Classificação:</b> Basalto
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> Plagioclásio (45%), piroxênio (35%) e minerais opacos (20%)	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e apresenta textura fanerítica fina inequigranular porfirítica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Observa-se na amostra microscópica a presença de óxidos de coloração avermelhada	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P1 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P1 (b) Amostra P1 observada a nicóis cruzados com aumento 10X	
 (a)	 (b)

Figura 69 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P2



Tabela 17 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P2

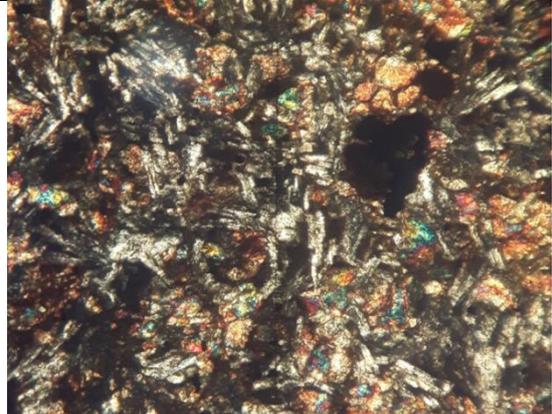
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P2	<b>Classificação:</b> Basalto com olivina
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> Plagioclásio (40%), piroxênio-augita (40%), minerais opacos (18%).	
<b>Minerais acessórios:</b> Olivina (2%)	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra possui uma descontinuidade que é presente em toda extensão do corpo, e caracteriza-se por textura fanerítica inequigranular muito fina a fina porfírica.	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A amostra está fraturada e apresenta sinais de alteração na superfície como oxidação, vista principalmente nas parcelas amareladas da amostra	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P2 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P2 (b) Amostra P2 observada a nicóis cruzados com aumento 10X	
	
(a)	(b)

Figura 70 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P9



Tabela 18 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P9

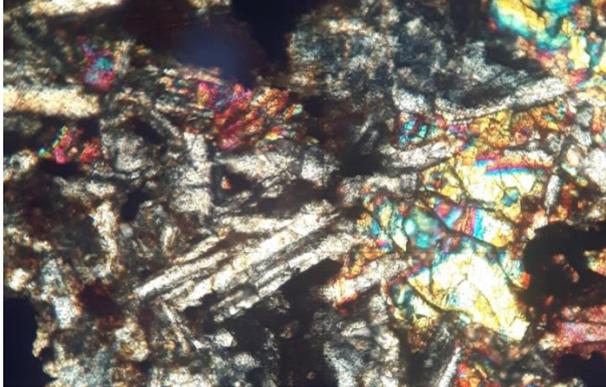
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P9	<b>Classificação:</b> Olivina Basalto
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> plagioclásio (42%), piroxênio (30%), opacos (15%) e olivina alterada (13%).	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça com textura fanerítica muito fina inequigranular porfirítica com fenocristais de plagioclásio e matriz afanítica.	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A rocha apresenta alteração superficial contendo calcita. Além disso, existe a presença da olivina alterada, apresentando coloração avermelhada e óxidos de piroxênio.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P9 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P9 (b) Amostra P9 observada a nicóis cruzados com aumento 10X	
	
(a)	(b)

Figura 71 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P4

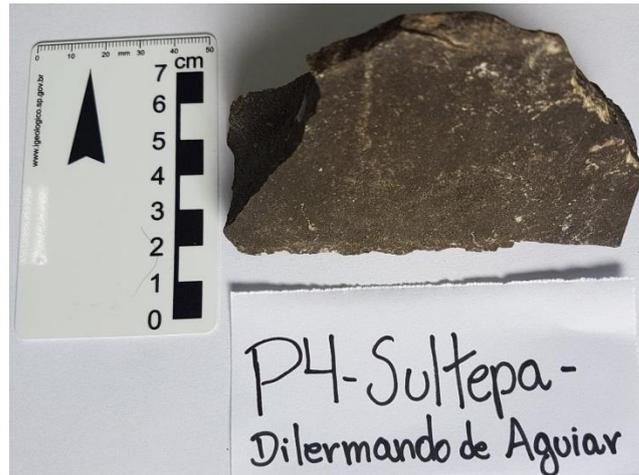


Tabela 19 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P4

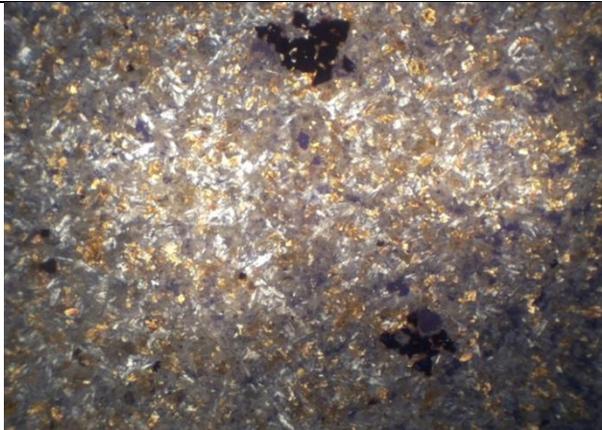
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P4	<b>Classificação:</b> Basalto
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> 55% de plagioclásio e 41% de piroxênios	
<b>Minerais acessórios:</b> 4% de opacos	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e possui textura fanerítica muito fina inequigranular	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A amostra apresenta alterações superficiais de coloração esverdeadas, sugerindo ser argilominerais.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P4 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P4 (b) Fotografia da lâmina da amostra P4 obtida do microscópio petrográfico (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes).	
	
(a)	(b)

Figura 72 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P13



Tabela 20 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P13

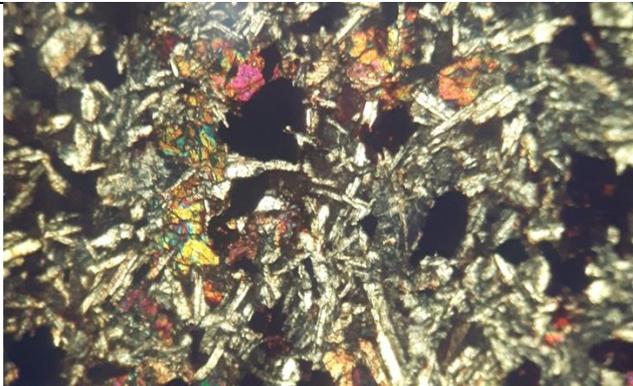
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P13	<b>Classificação:</b> Olivina-Diabásio
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> Plagioclásio (42%), piroxênio (30%), minerais opacos, (15%), olivina alterada (13%)	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça, com textura fanerítica inequigranular porfirítica muito fina a fina, com matriz afanítica.	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A amostra contém a presença de vidro vulcânico, com cristais com pequenas dimensões além disso, o vidro possui baixa temperatura de fusão o que pode causar um diferente comportamento ao longo do teste. Vale destacar, a suscetibilidade magnética, sugerindo que uma parte dos minerais opacos seja magnetita.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P13 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P13 (b) Amostra P13 observada a nicóis cruzados com aumento 5X	
	
(a)	(b)

Figura 73 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P15



Tabela 21 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P15

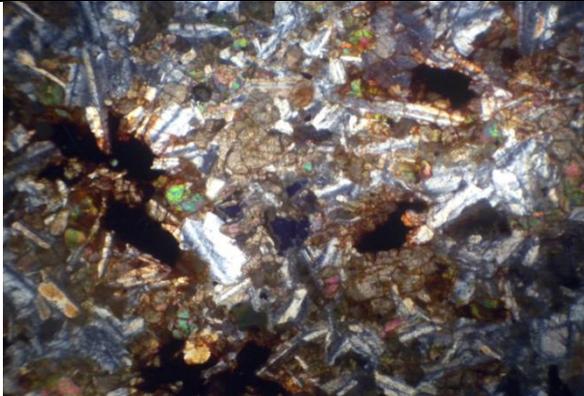
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P15	<b>Classificação:</b> Diabásio
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> 50% de plagioclásio e 44% de piroxênio	
<b>Minerais acessórios:</b> 6% de minerais opacos	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza escuro com tons avermelhados	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro com tons avermelhados	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e caracteriza-se como textura fanerítica fina a média inequigranular porfírica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A amostra apresenta alterações superficiais de coloração esverdeadas a esbranquiçada, além de tons avermelhados, que sugerem ser alteração.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P15 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P15 (b) Fotografia da lâmina da amostra P15 obtida do microscópio petrográfico destacando as ripas de plagioclásios e textura fanerítica fina a média (Luz Polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)	
	
(a)	(b)

Figura 74 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P14



Tabela 22 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P14

<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P14	<b>Classificação:</b> Andesito
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> fenocristais de plagioclásio (50%), alterados. Piroxênio augita (30%) minerais opacos possivelmente magnetita (10%)	
<b>Minerais acessórios:</b> Quartzo (10%)	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Marrom avermelhado escuro com tons de cinza	
<b>Cor estado úmido:</b> Marrom avermelhado escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra possui estrutura vesicular amigdalóide, com textura fanerítica inequigranular porfírica fina a média, predominando fina com matriz afanítica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> A amostra apresenta amídalas preenchidas por quartzo em pequena quantidade e algumas pequenas ocorrências de estruturas, que se assemelham ao preenchimento de fraturas.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P14 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica em lupa digital (b) Amostra P14 observada a nicóis cruzados com aumento 5X	
 (a)	 (b)

Figura 75 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P6/P7/P8



Tabela 23 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P6/P7/P8

<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P6/P7/P8	<b>Classificação:</b> Dacito
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> Plagioclásio (40%), quartzo (25%), piroxênio (25%) e minerais opacos (10%)	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza claro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e apresenta textura fanerítica fina inequigranular porfirítica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Alguns óxidos foram observados em cristais de piroxênio	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P6/P7/P8 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P6/P7/P8 (b) Amostra P6/P7/P8 observada a nicóis cruzados com aumento 10X	
 (a)	 (b)

Figura 76 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P3

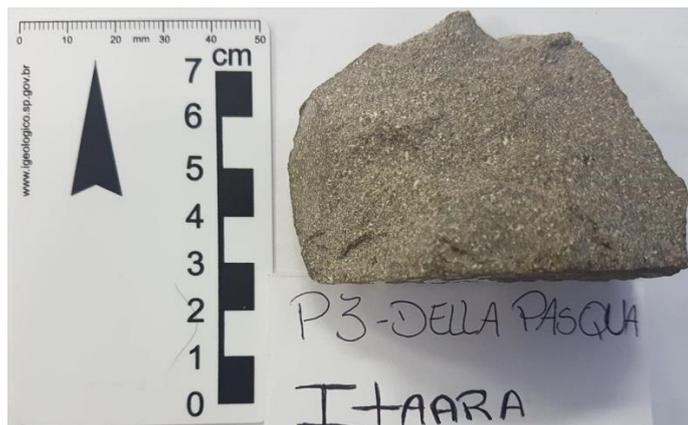


Tabela 24 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P3

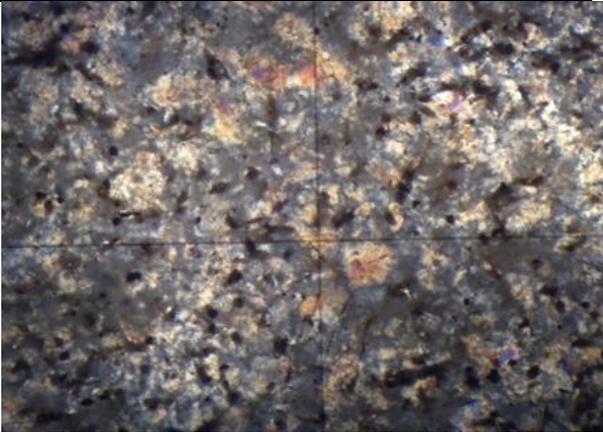
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P3	<b>Classificação:</b> Riodacito
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> 35% de feldspato, 32% de quartzo, 25% de piroxênio	
<b>Minerais acessórios:</b> 8% de minerais opacos	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza claro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e caracteriza-se como textura fanerítica muito fina inequigranular porfíritica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Em algumas porções da matriz observar-se desvitrificação com formação de argilomineral	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P3 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P3 (b) Fotografia da lâmina da amostra P3 obtida do microscópio petrográfico destacando as ripas de plagioclásios e textura fanerítica fina a média (luz polarizada, aumento de 2,5x8x04vezes)	
	
(a)	(b)

Figura 77 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P10



Tabela 25 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P10

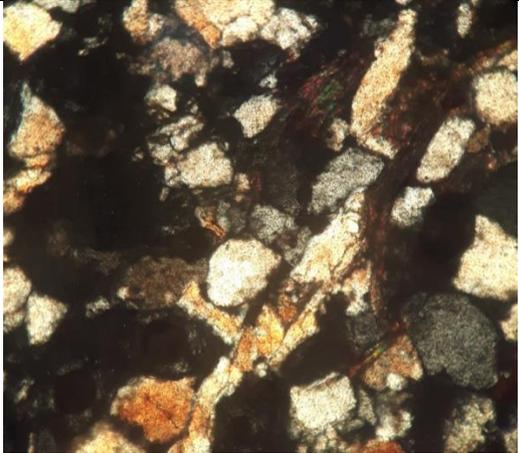
<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P10	<b>Classificação:</b> Sienogranito
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> Quartzo (30%), plagioclásio (20%), feldspato alcalino (40%) e anfibólio (10%)	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Não apresenta	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Rosa avermelhado	
<b>Cor estado úmido:</b> Vermelho Claro	
<b>Estrutura textura:</b> Maciça em amostra de mão e apresenta textura fanéritica grossa inequigranular porfírica com fenocristais de feldspato alcalino.	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Observa-se alteração superficial no feldspato, com coloração esbranquiçada e amarelada sugerindo ser caulinita. Além disso, verifica-se faturamento preenchidos nos cristais por um mineral sugere-se ser quartzo, principalmente no feldspato.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P10 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P10 (b) Amostra P10 observada a nicóis cruzados com aumento 10X	
 (a)	 (b)

Figura 78 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P5

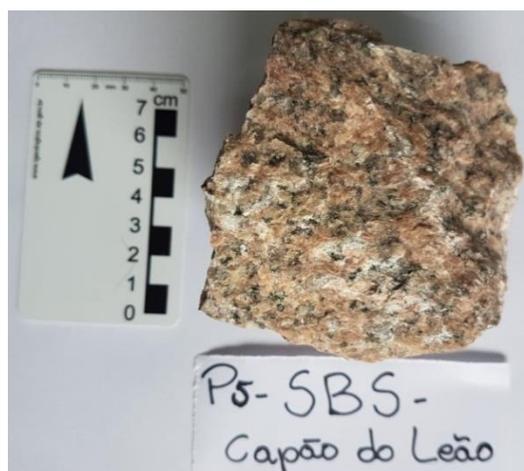


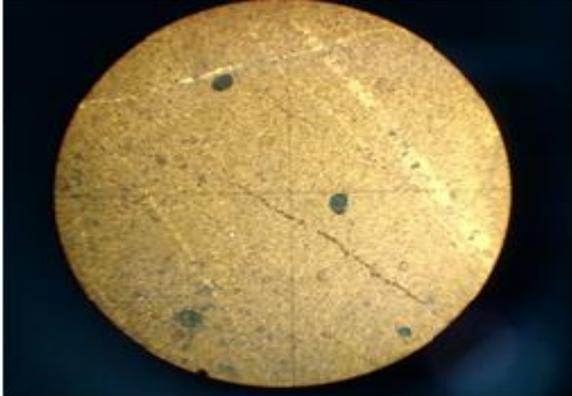
Tabela 26 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P5

<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P5	<b>Classificação:</b> Sienogranito
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> 45% de feldspato, 20% de quartzo, 15% de piroxênio	
<b>Minerais acessórios:</b> 8% de óxidos	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Não apresenta	
<b>Minerais deletérios:</b> Óxidos	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Rosa avermelhada	
<b>Cor estado úmido:</b> Vermelho claro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça e caracteriza-se como textura fanerítica muito fina inequigranular porfirítica	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha muito coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Os plagioclásios são predominantes e apresentam-se bastante alterados por argilização. É visível, em alguns pontos, sinais de processos hidrotermais. Possui microfaturas, clorita e são preenchidos por óxidos.	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P5 (a) Foto em detalhe da amostra macroscópica P5 (b) Amostra P5 observada a nicóis cruzados com aumento 5X	
	
(a)	(b)

Figura 79 - Amostra de fragmento de mão da rocha da pedreira P11/P12



Tabela 27 - Análise petrográfica da rocha proveniente da pedreira P11/P12

<b>Análise Petrográfica</b>	
<b>Pedreira:</b> P11/P12	<b>Classificação:</b> Mármore Dolomítico
<b>Composição mineralógica</b>	
<b>Minerais essenciais:</b> 60% dolomita, 30% calcita, 10% óxidos	
<b>Minerais acessórios:</b> Não apresenta	
<b>Minerais carbonáticos:</b> Presentes	
<b>Minerais deletérios:</b> Óxidos de ferro	
<b>Características</b>	
<b>Cor estado seco:</b> Cinza claro	
<b>Cor estado úmido:</b> Cinza escuro	
<b>Estrutura textura:</b> A amostra é maciça com veios preenchidos por carbonatos (calcita) e caracteriza-se como textura muito fina	
<b>Estado de alteração:</b> Rocha pouco alterada	
<b>Propriedades físico-mecânicas:</b> Rocha coerente	
<b>Observações adicionais:</b> Identificaram-se diferentes tipos de preenchimentos das fraturas, sendo a calcita a mais abundante, seguida de quartzo, plagiocásio e óxidos	
<b>Detalhes da textura da rocha</b>	
Detalhes da textura da rocha da P11/P12 (a) Destaque para os veios de calcita e microfraturas (aumento de 100 vezes em lupa digital); (b) Destaque para as fraturas preenchidas (luz polarizada - aumento 2,5/0.08)	
	
(a)	(b)

**APÊNDICE B – RESULTADOS COMPLETOS DO ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)**

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P1</b>	Fe	38,20%
	Si	25,05%
	Ca	20,39%
	Al	6,84%
	Ti	2,83%
	K	2,47%
	Mg	2,00%
	Cl	0,71%
	Mn	0,65%
	Sr	0,23%
	Cu	0,12%
	Zr	0,11%
	P	0,08%
	Zn	0,06%
	Ni	0,05%
	Cr	0,04%
	Te	0,02%
	Y	0,02%
	Sn	0,02%
	Cd	0,02%
Ga	0,02%	
Sb	0,02%	
Rb	0,01%	
Ag	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P2</b>	Fe	41,26%
	Si	24,91%
	Ca	17,13%
	Al	6,63%
	Ti	4,11%
	K	3,06%
	Cl	0,75%
	Mn	0,72%
	S	0,35%
	Sr	0,21%
	Pb	0,19%
	Zr	0,17%
	Cu	0,14%
	Zn	0,06%
	Ni	0,04%
	Cr	0,04%
	Ba	0,04%
	Y	0,03%
	Te	0,02%
	Rb	0,02%
	Sn	0,02%
	Cd	0,02%
Ga	0,02%	
Sb	0,02%	
Ag	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P3</b>	Si	38,44%
	Fe	24,22%
	K	13,99%
	Ca	9,48%
	Al	6,44%
	Ti	2,57%
	Cl	1,20%
	Mg	0,90%
	Ba	0,62%
	Mn	0,52%
	Zr	0,51%
	Rb	0,25%
	Sr	0,11%
	Zn	0,08%
	Te	0,07%
	Cs	0,07%
	I	0,06%
	Cr	0,06%
	Sb	0,05%
	Pb	0,05%
	Sn	0,04%
	Nb	0,04%
	Cd	0,04%
	Cu	0,03%
	Hg	0,03%
	Ag	0,03%
	Ni	0,02%
	Y	0,02%
	Ga	0,02%
	In	0,01%
Bi	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P4</b>	Si	33,86%
	Fe	29,86%
	Ca	21,17%
	Al	8,58%
	K	2,26%
	Ti	1,78%
	Mg	1,40%
	Mn	0,57%
	Sr	0,14%
	Zr	0,08%
	Cu	0,06%
	Zn	0,05%
	Ni	0,04%
	Cr	0,03%
	Rb	0,02%
	Ga	0,02%
	Y	0,02%
	Cd	0,01%
	Ag	1,00%
Sn	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P5</b>	Si	50,78%
	K	22,10%
	Fe	10,84%
	Al	7,45%
	Ca	4,14%
	Cl	1,53%
	Mn	1,02%
	Ba	0,49%
	Zr	0,47%
	Rb	0,25%
	Cs	0,13%
	I	0,10%
	Te	0,08%
	Cr	0,07%
	Sb	0,07%
	Zn	0,07%
	Sn	0,05%
	Pb	0,05%
	Cd	0,04%
	Y	0,03%
	Nb	0,03%
	Bi	0,03%
	In	0,03%
	Ag	0,03%
	Ni	0,02%
	Ga	0,02%
	Cu	0,02%
	Se	0,01%
Tl	0,01%	
Sr	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P6/P7/P8</b>	Si	37,91%
	Fe	26,32%
	Ca	11,72%
	K	10,42%
	Al	6,83%
	Ti	3,18%
	Cl	1,04%
	Mg	0,80%
	Mn	0,57%
	Zr	0,32%
	Rb	0,16%
	Sr	0,15%
	Ba	0,11%
	Zn	0,06%
	Cu	0,05%
	Cr	0,04%
	Te	0,03%
	Pb	0,03%
	Cd	0,03%
	Sn	0,02%
	Nb	0,02%
	Ga	0,02%
	Sb	0,02%
	Ni	0,02%
	Y	0,02%
	Ag	0,02%
	Bi	0,01%

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P9</b>	Fe	36,75%
	Si	27,58%
	Ca	22,07%
	Al	5,58%
	K	4,42%
	Ti	2,41%
	Mn	0,66%
	Sr	0,13%
	Zr	0,09%
	Cu	0,08%
	Zn	0,06%
	Ni	0,04%
	Rb	0,02%
	Te	0,02%
	Y	0,02%
	Ga	0,02%
	Sb	0,01%
	Sn	0,01%
Ag	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P10</b>	Si	48,17%
	K	20,28%
	Fe	13,06%
	Al	7,19%
	Ca	7,00%
	Cl	1,43%
	Mg	0,70%
	Rb	0,55%
	Mn	0,47%
	Zr	0,39%
	V	0,12%
	Zn	0,09%
	Y	0,07%
	Pb	0,06%
	Ga	0,06%
	Nb	0,05%
	Cr	0,05%
	Te	0,04%
	Th	0,04%
	Sn	0,04%
Sr	0,03%	
Sb	0,03%	
Cd	0,03%	
Ag	0,03%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P11/P12</b>	Ca	80,08%
	Mg	8,30%
	Fe	5,00%
	Si	3,09%
	Al	0,63%
	K	0,62%
	Mn	0,54%
	Ba	0,51%
	Cl	0,45%
	Ti	0,26%
	S	0,17%
	Sr	0,10%
	Cu	0,07%
	Cr	0,03%
	Cd	0,03%
	Te	0,02%
	Sn	0,02%
	Sb	0,02%
	Zn	0,02%
	Ag	0,02%
Zr	0,01%	
Pb	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P13</b>	Fe	34,63%
	Si	29,68%
	Ca	18,00%
	Al	7,03%
	Ti	4,86%
	K	3,52%
	Cl	0,82%
	Mn	0,54%
	Sr	0,36%
	Zr	0,17%
	P	0,09%
	Zn	0,07%
	Ni	0,03%
	Ag	0,03%
	Cu	0,03%
	Cd	0,03%
	Ga	0,02%
	Y	0,02%
	Cr	0,02%
	Rb	0,01%
Sn	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P14</b>	Fe	33,34%
	Si	30,01%
	Ca	16,50%
	Al	7,48%
	K	6,60%
	Ti	3,53%
	Cl	0,76%
	Mn	0,67%
	Zr	0,28%
	Sr	0,18%
	Ba	0,12%
	Rb	0,08%
	Zn	0,07%
	Cr	0,06%
	Te	0,03%
	Ni	0,03%
	Y	0,03%
	Cu	0,03%
	Ga	0,02%
	Sn	0,02%
	Cd	0,02%
	Sb	0,02%
	Hg	0,02%
Pb	0,02%	
Nb	0,02%	
Ag	0,01%	
Bi	0,01%	
I	0,01%	

<b>Amostra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Concentração</b>
<b>P15</b>	Fe	33,87%
	Si	27,11%
	Ca	21,36%
	Al	8,78%
	K	2,43%
	Ti	2,08%
	Mg	1,90%
	Cl	0,85%
	Mn	0,52%
	S	0,33%
	Sr	0,18%
	P	0,12%
	Cu	0,11%
	Zr	0,09%
	Zn	0,05%
	Cr	0,05%
	Te	0,03%
	Ni	0,03%
	Cd	0,03%
	Y	0,02%
Sn	0,02%	
Ag	0,02%	
Ga	0,02%	
Sb	0,02%	
Rb	0,01%	

## ANEXOS

## ANEXO A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS

Pedreira	Mistura	Porcentagem dos agregados por mistura							Absorção (%)	Abrasão (%)	Equivalente de areia (%)	Sanidade (%)
		Brita 1½"	Brita 1"	Brita ¾"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia	Cal				
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)				
P1	U1-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	27,0	73,0	0,0	0,0	1,0	23,1	61,4	3,0
P2	U2-DAER-FXB-50/70	0,0	0,0	20,0	16,0	59,0	5,0	0,0	1,4	16,0	56,9	3,2
	U2-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
	U2-DNIT-FXC-65/90	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
P3	U3-DAER-FXB-ECO	0,0	0,0	20,0	20,0	58,0	0,0	2,0	2,8	14,5	60,7	0,4
P4	U4-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	25,0	20,0	55,0	0,0	2,0	1,5	11,0	57,7	1,9
	U4-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	35,0	15,0	50,0	0,0	0,0	0,3			1,9
P5	U5-DNIT-FXB-60/85¹	0,0	0,0	40,0	15,0	44,0	0,0	1,0	0,5	26,4	71,0	5,4
	U5-DNIT-FXB-ECO¹	0,0	0,0	35,0	18,0	46,0	0,0	1,0	0,5			
	U5-DAER-FXB-ECO¹	0,0	0,0	20,0	25,0	54,0	0,0	1,0	0,5			
P6/P7/P8	U6-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9	11,8	62,5	3,7
	U7-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9			
P9	U8-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	31,0	10,0	57,0	0,0	2,0	2,6	12,5	61,7	4,7
	U8-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	12,0	62,0	0,0	2,0	2,6			
P10	U9-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0	19,8	63,0	4,8
	U9-DNIT-FXC-TLAF	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0			
P11/P12	U10-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	21,0	18,0	60,0	0,0	1,0	0,4	14,8	58,3	4,3
P13	U11-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	36,0	64,0	0,0	0,0	1,9	16,9	69,9	1,2
	U12-DAER-FXB-60/85	0,0	0,0	20,0	20,0	60,0	0,0	0,0	1,9			
	U12-DAER-FXC-60/85	0,0	6,0	21,0	10,0	59,0	0,0	0,0	1,5			
P14	U13-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	32,0	28,0	40,0	0,0	0,0	1,0	13,1	60,8	5,8
P15	U14-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0	13,7	63,0	16,5
	U14-DNIT-FXB-50/70	10,0	0,0	44,0	0,0	49,0	0,0	1,0	1,0			
	U14-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0			

Fonte: Tabela 14, página 99 da dissertação de Faccin, (2018).

## ANEXO B - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MORFOLOGIA DOS AGREGADOS MINERAIS

Pedreira	Mineralogia	Propriedades Morfológicas dos Agregados																								
		Índice de forma			Lamelaridade			Esféricidade				Angularidade do Miúdo			Angularidade do Graúdo				Textura				Forma 2D			
		1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)	
P1	Basalto	-		0,79	-	-	25,90	-	-	0,71	0,70	2858,32	2741,14	-	-	-	2618,07	2890,27	-		679,72	724,27	7,64	7,72	-	
P2	Basalto	-	0,77	0,55	-	25,80	50,80	-	-	0,55	0,58	3290,70	3408,00	-	-	3000,50	3133,70	3183,20	-	737,00	774,10	753,70	9,27	8,39	-	
P3	Riodacito	-	0,94	0,78	-	9,20	27,40	-	0,75	0,80	-	3214,14	3200,44	-	-	2915,36	3081,58	-	-	349,39	369,26	-	7,80	8,00	-	
P4	Basalto <sup>1</sup>	-	0,87	0,75	-	14,80	17,80	-	0,77	0,80	0,82	2765,35	3434,19	-	-	2762,40	2759,03	2634,29	-	506,51	624,88	704,88	7,38	8,49	-	
P5	Granítica	-	0,84	0,70	-	20,70	37,00	-	0,64	0,64	0,66	3691,08	2971,48	-	-	3088,08	3286,51	3418,22	-	211,71	196,41	168,45	9,15	8,56	-	
P6/P7/P8	Basalto <sup>1</sup>	-	0,81	0,78	-	20,80	19,20	-	0,67	0,72	-	2844,29	3065,07	-	-	2970,39	2973,40	-	-	561,62	465,37	-	7,83	8,66	-	
P9	Basalto <sup>1</sup>	-	0,94	0,72	-	9,70	27,80	-	0,72	0,72	0,73	3011,00	3101,40	-	-	2619,62	2816,03	2745,10	-	527,88	567,00	521,91	8,59	7,99	-	
P10	Granítica	-	0,87	0,81	-	18,30	28,70	-	0,64	0,65	0,69	3605,24	3016,53	-	-	3160,87	3219,58	3200,04	-	354,79	253,47	240,18	9,64	8,74	-	
P11/P12	Rocha metamórfica	-	0,76	0,79	-	29,70	17,60	-	0,63	0,65	-	3278,34	2791,68	-	-	3265,86	2956,56	-	-	470,97	485,59	-	9,20	8,36	-	
P13	Diabásio	0,80	0,92	0,82	23,40	8,20	12,50	0,66	0,73	0,76	0,68	3060,42	2764,61	2765,70	2837,62	2478,66	2592,01	3198,96	533,58	614,57	661,48	653,84	7,44	8,11	7,96	
P14	Basalto <sup>1</sup>	-	0,83	0,71	-	24,50	29,50	-	0,65	*	-	*	*	-	-	2829,41	*	-	-	701,66	*	-	*	*	-	
P15	Basalto <sup>1</sup>	0,70	0,73	0,66	28,90	26,25	32,60	-	0,70	0,73	0,69	3001,70	2696,17	-	-	2863,51	2735,66	3046,18	-	608,65	428,74	532,43	8,00	8,10	-	

Fonte: Tabela 15, página 100 da dissertação de Faccin, (2018).