

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Pablo Menezes Vestena

**MISTURAS INTEGRALMENTE RECICLADAS:
COMPORTAMENTO À FADIGA E DEGREE OF BINDER ACTIVITY**

Santa Maria, RS, Brasil

2019

Pablo Menezes Vestena

**MISTURAS INTEGRALMENTE RECICLADAS:
COMPORTAMENTO À FADIGA E DEGREE OF BINDER ACTIVITY**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS, Brasil

2019

Pablo Menezes Vestena

**MISTURAS INTEGRALMENTE RECICLADAS:
COMPORTAMENTO À FADIGA E DEGREE OF BINDER ACTIVITY**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 11 de julho de 2019:

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

Pedro Orlando Borges de Almeida Jr, Me. (UFSM)

Gustavo Menegusso Pires, Phd

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu pai Luiz e mãe Cleci pelo apoio e suporte neste longo trajeto de graduação. Sem as bases fortes da família, não haveria clareza no caminho a se seguir, e tudo estaria perdido. Sei que é complicado me aguentar.

Aos meus amigos que formei durante o curso, que espero levar a vida toda, tenho muito a retribuir. Tanto em momentos de descontração, ou mesmo em tempos difíceis de provas, transmitiam uma calma e segurança de que nada estava perdido. Um agradecimento singular aos colegas de turma: Alana, Bruna, Fernanda, Jeferson, Jordana, Vinil e Yasser, que entramos e formamos juntos, e também aos que ficaram pelo caminho dos semestres: Leonardo, Cassol e Carol.

Aos companheiros da escola de dança, onde pude desestressar corpo e mente dos problemas da engenharia, pude reencontrar amigos de infância perdidos, e conhecer Fernanda, que me acompanhou, incentivou e aguentou neste último ano de curso.

Uma gratificação especial ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), que me acolheu desde o primeiro semestre de curso, e fomentou esta busca por pesquisa. Em especial aos mestres que pude, mesmo que de maneira pequena, auxiliar e aprender (muito mais aprender): Thaís na caracterização de solos, Tanski com bases recicladas, Bueno com ensaios de campo, e aos tutores neste projeto de conclusão de curso: Pedro e Sílvio que estiveram sempre dispostos a me auxiliar independente as condições. Aos que mais sofreram como bolsistas ao meu lado: Grilo e Karlla, um abraço solidário, e um desejo de sucesso a vocês em suas carreiras. Aos colegas que já deixaram o grupo: Fábio, Maurício, Renz, Cleber, Valdir, Katia, Luzzi, vocês são exemplos de pesquisadores e profissionais na área onde escolherem atuar. Aos demais colegas de grupo: Amigão, Jonathan, Boeira, Saca, Bruno, Bethânia, Débora, Chaveli, Evelyn, Antônio, Jennifer, Ketrily, Karine, Pedrilha, Victória, Andressa, Fernando, Paula e Amanda, uma satisfação enorme poder desfrutar de vários cafés com engenheiro (e ainda não engenheiros) em suas companhias. Aos professores Tatiana, Deividi e Magnos pelo apoio e incentivo. Ao meu orientador Luciano, que esteve sempre me guiando nesta caminhada de aprendizado, e cativando com seu entusiasmo e fome por conhecimento e pesquisa. Gostaria de reiterar que este trabalho é fruto do progresso e união de todo grupo, que com este ambiente saudável tornam a mais trabalhosa e complexa pesquisa possível.

RESUMO

MISTURAS INTEGRALMENTE RECICLADAS: COMPORTAMENTO À FADIGA E DEGREE OF BINDER ACTIVITY

Autor: Pablo Menezes Vestena

Orientador: Luciano Pivoto Specht

A malha viária brasileira, de maneira geral, vem apresentando carências funcionais e estruturais com o crescimento constante do tráfego de veículos comerciais e de carga nas rodovias ao longo dos anos. Assim, a necessidade de restaurações rotineiras é imprescindível para manutenção do conforto e segurança das vias. O resíduo da fresagem, parte do processo de conservação, é denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Buscando soluções sustentáveis e viáveis economicamente à engenharia, a incorporação deste material em novas misturas vem se tornando realidade cada vez mais presente em países europeus e nos Estados Unidos da América. Visando teores cada vez mais elevados de incorporação de RAP em misturas recicladas, a engenharia vem investindo esforços em técnicas e novas tecnologias neste sentido, e isto passa por uma análise cada vez mais rigorosa dos materiais fresados utilizados. Buscando aprofundar os conhecimentos relacionados as propriedades intrínsecas do RAP, foram propostas misturas recicladas, compostas 100% por fresado. Dando continuidade as pesquisas já realizadas no grupo de pesquisas GEPPASV, este trabalho utilizou de ensaios mecânicos para avaliar as propriedades destas misturas quando comparadas às de referência. Por meio de resultados de rigidez, foram correlacionadas as constantes do modelo 2S2P1D e os dados de grau de ativação (DoA). Além disto, diferentes critérios de avaliação de fadiga pelo ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão foram testados para comparar as misturas referência das puramente fresadas. O critério ϵ_6 se mostrou mais promissor pela sua simplicidade, visto que os critérios que utilizavam a aplicação da teoria S-VECD não foram promissores devido as elevadas rigidezes nas condições do ensaio e não normatização dos volumes de vazios nas amostras 100% RAP. Por fim, foi possível evidenciar que o DoA correlacionou muito bem aos resultados de fadiga, indicando que este é um parâmetro influente na avaliação do desempenho de misturas recicladas e que deve ser considerado quando avaliadas misturas com alto teores de reciclagem.

PALAVRAS CHAVES: Reciclagem. 100% RAP. Grau de reativação. Rigidez. Fadiga.

ABSTRACT

FULLY RECYCLED MIXTURES: FATIGUE BEHAVIOR AND DEGREE OF BINDER ACTIVITY

Author: Pablo Menezes Vestena

Advisor: Luciano Pivoto Specht

The Brazilian road network, in general, has been presenting functional and structural shortcomings conducted by a constant growth of highway traffic over the years. Thus, the need for routine rehabilitation is essential to maintain a level of comfort and safety on the roads. The milling residue is called *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Looking for sustainable and economical viable solutions to engineering, the incorporation of this material in new mixtures has become increasingly present in European countries and United States. Aiming at increasing levels of RAP incorporation in recycled mixtures, engineers have been investing efforts in techniques and technologies, and it goes through a better understanding of RAP material. Pursuing to increase the knowledge about intrinsic properties, 100% recycled mixtures were analyzed, continuing researches done in the research group. This study used mechanical tests to evaluate properties on these mixtures when compared to reference. Linear viscoelastic data were related to 2S2P1D model constants and degree of binder activity (DoA). Besides that, distinct fatigue analysis were used to cyclic tension fatigue test, comparing references to recycled mixes. The ϵ_6 criteria was more promising because of its simplicity, since the S-VECD based evaluations methods didn't work well due to high viscoelastic modulus in test conditions and different percentage of void contents in 100% RAP mixes. Lastly, it was possible to correlate DoA to fatigue data, showing that this is a parameter that has a great impact in the performance of reclaimed asphalt mixes and it has to be considered when evaluating high content of RAP recycled mixes.

Keywords: Recycling . 100% RAP. Degree of binder activity. Viscoelasticity. Fatigue..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Possíveis cenários de interação do ligante na reciclagem.....	15
Figura 2 - Domínios do comportamento mecânico típico de misturas asfálticas em função: (a) da amplitude de deformação e temperatura; (b) da amplitude de deformação e número de ciclos.....	17
Figura 3 - Representação da superposição tempo-temperatura.....	19
Figura 4 - Critério de ruptura da queda do ângulo de fase	21
Figura 5 - RT das misturas RAP.....	22
Figura 6 - DoA das misturas RAP	23
Figura 7 - Planejamento da pesquisa	25
Figura 8 - Localização dos fresados	26
Figura 9 - Granulometria do material fresado	27
Figura 10 - Amostras RAP	28
Figura 11 - Processo de queima pelo forno de ignição: (a) forno de ignição; (b) material antes e após a queima.....	29
Figura 12 - Misturas REF: (a) compactação no compactador giratório; (b) amostras REF depois de retificadas	30
Figura 13 - Preparação amostras módulo dinâmico	31
Figura 14 - Ensaio de módulo dinâmico.....	33
Figura 15 - Ensaio uniaxial cíclico de tração compressão na prensa UTM-25	34
Figura 16 - Preparação amostras ensaio de fadiga	35
Figura 17 - Modo de determinação ϵ_6	36
Figura 18 - Representação cálculo área de fadiga pelo FAF.....	36
Figura 19 - Estrutura aplicada no software <i>LVECD</i>	37
Figura 20 - Ajuste dos dados de translação tempo-temperatura: (a) modelo WLF; (b) ajuste polinomial.....	39
Figura 21 - Modelagem 2S2P1D para os dados de ângulo de fase: (a) curvas mestras de ângulo de fase para RAP A e REF (RAP A); (b) curvas mestras de ângulo de fase para RAP B e REF (RAP B).....	42
Figura 22 - Modelagem 2S2P1D para os dados de módulo dinâmico: (a) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP A e REF (RAP A) em escala semilog; (b) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP A e REF (RAP A) em escala log-log; (c) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP B e REF (RAP B) em escala semilog; (d) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP B e REF (RAP B) em escala log-log	44
Figura 23 - Modelagem 2S2P1D para parte real x parte imaginária: (a) espaço cole-cole para RAP A e REF (RAP A); (b) espaço cole-cole para RAP B e REF (RAP B)	45
Figura 24 - Modelagem 2S2P1D para módulo dinâmico x ângulo de fase: (a) diagrama black para RAP A e REF (RAP A); (b) diagrama black para RAP B e REF (RAP B)	46
Figura 25 - Deformação inicial aplicada pelo número de ciclos para ruptura.....	47
Figura 26 - Curvas integridade do material por dano acumulado pelo modelo de potência: (a) C x S das misturas RAP A e REF (RAP A); (b) C x S das misturas RAP B e REF (RAP B)	49
Figura 27 - Resultados de critério de ruptura Gr por número de ciclos para falha: (a) Gr x Nf para RAP A e REF (RAP A); (b) Gr x Nf para RAP B e REF (RAP B)	50
Figura 28 - Rompimento das amostras ao final do ensaio fadiga tração-compressão: (a) rompimento no terço médio; (b) rompimento fora do terço médio	51
Figura 29 - Representação do dano na camada ao longo dos meses para misturas RAP A: (a) N/Nf para RAP A 100°C; (b) N/Nf para RAP A 140°C; (c) N/Nf para RAP A 170°C; (d) N/Nf para REF (RAP A 140°C); (e) N/Nf para REF (RAP A 170°C).....	52

Figura 30 - Representação do dano na camada ao longo dos meses para misturas RAP B: (a) N/Nf para RAP B 100°C; (b) N/Nf para RAP B 140°C; (c) N/Nf para RAP B 170°C; (d) N/Nf para REF (RAP B 100°C); (e) N/Nf para REF (RAP B 140/170°C)	53
Figura 31 - Resultados de dano médio na camada para as misturas analisadas pelo LVECD	54
Figura 32 - Resultados de área trincada para as misturas analisadas pelo LVECD	55
Figura 33 - Correlação entre Δ e dano médio na camada analisada em 120 meses	56
Figura 34 - Representação dos resultados de FAF para as misturas analisadas	57
Figura 35 - Resultados de FAF para as misturas analisadas	57
Figura 36 - Resultados de ϵ_6 para misturas analisadas	59
Figura 37 - Relação fadiga por ϵ_6 por τ_E	60
Figura 38 - Relação entre resistência a tração (RT) por dados de fadiga ϵ_6	61
Figura 39 - Relação de fadiga ϵ_6 por volume de vazios	61
Figura 40 - Relação entre resistência à tração por compressão diametral em misturas 100% RAP: (a) RT por Vv de Teixeira (2017); (b) RT por Vv pela ASTM D3203-17 de Gaspar (2019); (c) RT por Vv pela DNER ME 117/94 de Gaspar (2019)	62
Figura 41 - Relação entre DoA por fadiga ϵ_6	63
Figura 42 - Relação entre DoA por $\epsilon_{6RAP}/\epsilon_{6REF}$	64
Figura 43 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 100°C	74
Figura 44 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 140°C	74
Figura 45 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 170°C	75
Figura 46 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 100°C	75
Figura 47 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 140°C	76
Figura 48 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 170°C	76
Figura 49 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP A 140°C)	77
Figura 50 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP A 170°C)	77
Figura 51 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP B 100°C)	78
Figura 52 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP B 140/170°C) ..	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade dos ligantes virgens	29
Tabela 2 - Volume de vazios das misturas RAP e REF	30
Tabela 3 - Coeficientes superposição tempo-temperatura.....	39
Tabela 4 - Coeficientes do ajuste sigmoidal	40
Tabela 5 - Coeficientes da modelagem 2S2P1D	41
Tabela 6 - Coeficientes ajuste exponencial para dados de integridade por dano acumulado...	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	13
2.1.1	Misturas com materiais fresados.....	13
2.1.2	Interação e reativação.....	14
2.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	16
2.2.1	Rigidez.....	18
2.2.2	Dano por fadiga.....	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	24
3.2	MATERIAIS.....	25
3.2.1	Misturas integralmente recicladas (RAP).....	25
3.2.2	Misturas de referência (REF).....	28
3.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	31
3.3.1	Módulo dinâmico.....	31
3.3.2	Fadiga por tração-compressão.....	33
3.4	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE FADIGA.....	35
4	RESULTADOS	38
4.1	RIGIDEZ.....	38
4.2	DANIFICAÇÃO.....	47
4.3	ANÁLISE DE FADIGA POR ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA.....	51
4.4	ANÁLISE DE FADIGA PELO FAF.....	56
4.5	ANÁLISE DE FADIGA PELO CRITÉRIO ϵ_6	58
4.6	CORRELAÇÕES DE RESULTADOS DE RIGIDEZ, DE FADIGA, VOLUMETRIA COM GRAU DE ATIVAÇÃO.....	60
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	72

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, notadamente, adota o modelo rodoviário como seu principal meio de transporte que movimenta a economia. A dificuldade de se manter as rodovias em ótimo estado é visualizada no preço dos fretes internos do país, efeitos no escoamento da safra agrária, comprometimento da segurança e crescimento reduzido da economia.

Dos custos em um projeto de pavimento novo, mais da metade está ligada ao ligante asfáltico (LUZZI, 2019). Com o objetivo de proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta de produtos, a Associação Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2019), acompanha os preços de distribuição de produtos asfálticos mês a mês. Segundo a associação, o preço do asfalto convencional (CAP 50/70) no Rio Grande do Sul cresce aceleradamente, passando de R\$ 1444,05/ton em dezembro de 2017 para R\$ 2723,45/ton em abril de 2019, representando um aumento de 88,60%, onde a inflação acumulada neste período foi de 4,94% (IBGE, 2019).

Resíduo de projetos de restauração, o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) muitas vezes é destinado a bota-foras, entrada de terrenos ou doado a terceiros. Sua incorporação em sub-bases, bases ou novas misturas asfálticas ainda é incipiente no país, reservada a projetos de pesquisas, ou investimentos de grandes concessionárias em trechos pequenos e baixos teores de incorporação.

O fresado é o hoje o material mais reciclado nos EUA segundo dados da *National Asphalt Pavement Association* (NAPA). Durante o ano de 2017, mais de 76,2 milhões de toneladas de RAP foram utilizadas em novos pavimentos americanos, representando uma economia de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas de ligante, gerando um benefício de US\$ 2,2 bilhões (WILLIAMS et al., 2017). Ao passo que, no mesmo ano, segundo dados da Associação Nacional de Petróleo (ANP, 2019), o Brasil consumiu 1,92 milhões de toneladas de asfalto, volume bastante inferior ao ligante reciclado pelos americanos. Além da vantagem econômica associada a ele, a redução da exploração de recursos naturais, como agregados e ligantes virgens, o definem como uma alternativa sustentável.

Apesar das vantagens que o seu uso implica, os teores de RAP em projetos de misturas recicladas para revestimento estão restringidas pelas normativas europeias e americana, devido a problemas técnicos relacionados a limitações em adaptações nas usinas de asfalto, incertezas quanto desempenho da mistura e mecanismos de ativação e mistura com outros componentes (LO PRESTI et al, 2016).

O ligante envelhecido no material fresado apresenta alta rigidez, baixa penetração, alto ponto de amolecimento, que quando incorporado em altas percentagens, resulta em misturas com baixa propriedade coesiva, alta rigidez, e susceptíveis à fadiga e bom desempenho a deformação permanente.

Além disso, quanto do ligante envelhecido é reativado e torna-se disponível para interação com outros elementos da mistura é um fator que também influencia no comportamento mecânico, pois uma quantidade abaixo do previsto pode afetar diretamente o comportamento à fadiga. Esta propriedade intrínseca do material fresado é dependente do tipo de material, tempo e temperatura de mistura.

Portanto, visando percentagens de incorporação de RAP cada vez maiores, pesquisas que busquem um maior aprofundamento no conhecimento acerca das propriedades intrínsecas tem se mostrado necessárias. Como prosseguimento aos trabalhos de avaliação de misturas 100% recicladas de Teixeira (2017), Pinheiro (2017) e Bordin (2017) avaliando duas fontes de RAP, este estudo buscou correlacionar demais propriedades mecânicas: rigidez e fadiga, comparando com misturas referência e correlacionando com dados de *Degree of Binder Activity* (DoA), proposto por Pires (2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliação mecânica e correlação da viscoelasticidade e fadiga com o grau de ativação de misturas compostas por 100% material fresado.

1.1.2 Objetivos específicos

A título de complementação do objetivo geral, misturas integralmente de material fresado e de referência foram avaliadas quanto à:

- a) Rigidez pelo ensaio de módulo complexo e fadiga pelo ensaio de tração-compressão;
- b) Análise de fadiga pelo ϵ_6 , Fator Área de Fadiga (FAF), estrutural pelo software *LVECD* e área trincada;
- c) Correlação de parâmetros viscoelásticos da modelagem 2S2P1D, volumetria e ϵ_6 com grau de ativação;
- d) Influência da qualidade do RAP na fadiga e reativação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas tratados nesta pesquisa. Primeiramente, algumas considerações sobre reciclagem de pavimentos, misturas utilizando material fresado e reativação do ligante envelhecido. Na sequência são apresentadas características referente ao comportamento mecânico de misturas asfálticas.

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Revestimento asfáltico é a camada superior de um pavimento, destinada a resistir as ações do tráfego, transmitir as tensões de forma atenuada as camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de conforto e segurança de rolamento (BERNUCCI et al, 2006). Seu ciclo de vida compreende desde a extração dos recursos naturais, projeto, usinagem, execução, operação, manutenção até a remoção e destinação dos resíduos ao final de sua vida útil (COPELAND, 2011).

Quando não atende mais a qualidade em sua superfície desejada, deve-se intervir visando à restauração. Com o propósito de reciclar o material antigo, o revestimento ou parte dele deve ser removido, utilizando-se de uma técnica de fresagem, antes da aplicação de uma nova camada. (BONFIM, 2010). O resíduo da fresagem é chamado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), e tem como principais benefícios a reutilização dos agregados e do ligante asfáltico, a conservação de energia e a preservação ambiental (BERNUCCI et al., 2006).

Bonfim (2010) cita que o processo de fresagem surgiu na década de 1970, devido à crise econômica internacional, como alternativa a escassez de material asfáltico. Quanto maior a taxa de incorporação de material reciclado em novas misturas, maior o benefício econômico e ambiental proporcionado, se configurando como uma alternativa sustentável (GENNESSEAUX, 2015).

Este item abordará sobre mistura com materiais fresados e sobre a interação e reativação do ligante envelhecido do material.

2.1.1 Misturas com materiais fresados

O reaproveitamento do RAP na engenharia rodoviária pode se dar de diversas formas, sendo mais comum sua utilização em bases e sub-bases de material granular ou estabilizado.

Entretanto, é quando inserido no revestimento que possui potencial para substituir os materiais de maior custo, principalmente o ligante asfáltico, que além de ser o material mais caro, está mais sujeito a variações de preço (COPELAND, 2011).

Misturas recicladas podem ser produzidas tanto em usinas gravimétricas, como em volumétricas, tendo seu principal fator limitante a tecnologia disponível para produção. A principal na adaptação de usinas está relacionada com o processo de aquecimento do RAP, visto que a exposição direta do fresado às chamas do secador pode gerar riscos à segurança (SUZUKI, 2019). O envelhecimento do ligante presente no fresado, principalmente pelo processo de oxidação, também é outro fator relacionado ao superaquecimento. Este possibilita maiores resistências a deformação permanente das misturas recicladas, mas por outro lado, pode acentuar o dano a fadiga (LUZZI, 2019).

O uso de baixas percentagens de RAP em misturas recicladas já vem sendo amplamente difundido internacionalmente, visto que não são muito afetadas pela variabilidade das características no RAP (HUANG et al, 2004). Já o uso de misturas contendo um elevado teor de RAP, como 50%, tem um potencial impacto na durabilidade e performance estrutural dos pavimentos, caracterizando um desempenho comprometido na fadiga (AL-QADI, 2012). Dentre as limitações encontradas, como falta de informação sobre a performance e durabilidade, de especificações na produção, controle de qualidade e relacionados a adaptação de usinas, destaca-se a falta de conhecimento acerca dos mecanismos envolvidos na interação entre o ligante do RAP e o novo (LO PRESTI et al, 2016, 2019).

Zaumanis e Mallick (2015) ainda citam que a falta de cautela no processo de fresagem, no tratamento, armazenamento e processamento inadequado do material na usina são fatores que podem trazer deterioração precoce da mistura reciclada. Entretanto, se bem utilizado, pode gerar misturas de desempenho equiparável ou até superiores a misturas convencionais.

2.1.2 Interação e reativação

Pela praticidade, misturas recicladas vêm sendo projetadas assumindo uma interação total entre o ligante envelhecido presente no fresado e o ligante virgem. Este pressuposto tem se apresentado efetivo em termos mecânicos para misturas com baixos teores de RAP

(<25%), porém em teores elevados se mostra insuficiente, principalmente à fadiga, visto a incerteza quanto ao teor de ligante na mistura final (LO PRESTI et al, 2019).

Existem três cenários possíveis de interação entre ligantes em uma mistura reciclada (Figura 1). O primeiro é onde o ligante do RAP está completamente misturado ao ligante virgem e cobrindo completamente agregados virgens e do RAP, cenário adotado por diversas agências regulamentadoras. O segundo cenário é descrito como *black rock*, partindo da premissa que o RAP se comporta como um agregado. O terceiro cenário é a interação parcial entre os ligantes, gerando efeitos significativos no desempenho se não considerados corretamente em misturas de elevados teores de RAP (DING et al, 2016).

Figura 1 - Possíveis cenários de interação do ligante na reciclagem



Fonte: Gaspar (2019)

O conceito de *degree of binder activity* (DoA), está ligado ao quanto de ligante do fresado está disponível para reativação quando este material é reaquecido. É definido em Lo Presti et al (2019) como razão entre a quantidade mínima de ligante envelhecido que pode ser considerada ativa em um projeto de uma mistura reciclada e o total de asfalto envelhecido do material. Afirma também que é uma propriedade intrínseca do material que varia conforme a fonte de material fresado, tempo e temperatura de mistura.

Buscando potencializar a utilização do ligante do RAP nas misturas recicladas, Pires (2018) propôs uma metodologia de análise do grau de ativação do ligante envelhecido do RAP utilizando misturas compostas em sua totalidade de fresado compactadas em corpos de prova Marshall, a diferentes temperaturas. Por meio de um ensaio relativamente simples e com possibilidade de adaptação a realidade prática brasileira, de resistência a tração por compressão diametral (RT), o autor propõe que o ganho de resistência ocasionado pelas diferentes temperaturas avaliadas seja um indicativo da facilidade ou dificuldade com que o ligante asfáltico do material é ativado. O DoA é mensurado pela razão entre o RT de uma amostra 100% RAP a uma determinada temperatura pelo seu RT a 170°C, visto que esta é a

temperatura de melhor resultado para os fresados analisados por ele, ou uma mistura envelhecida controlada em laboratório.

Outros pesquisadores, como Teixeira (2017) e Gaspar (2019), verificaram que o melhor resultado não necessariamente está na máxima temperatura de 170°C, podendo variar de material para material. Gaspar (2019) propõe uma adaptação a formulação anterior, que o DoA seja medido pela razão o RT a determinada temperatura pelo seu melhor resultado de RT. Porém isto está considerando que exista uma temperatura onde a reativação é de 100%.

Pires (2018) e Pinheiro (2017) envelheceram ligantes em laboratório ao mesmo nível de penetração que os presentes nos RAPs de sua pesquisa. Assumindo que a mistura com ligante envelhecido artificialmente e rocha de mesma origem do fresado teria total interação entre ligante e agregado, propôs uma outra formulação ao DoA, onde é definido pela razão entre RT do 100% RAP e RT da mistura envelhecida artificialmente, ambas compactadas na mesma temperatura.

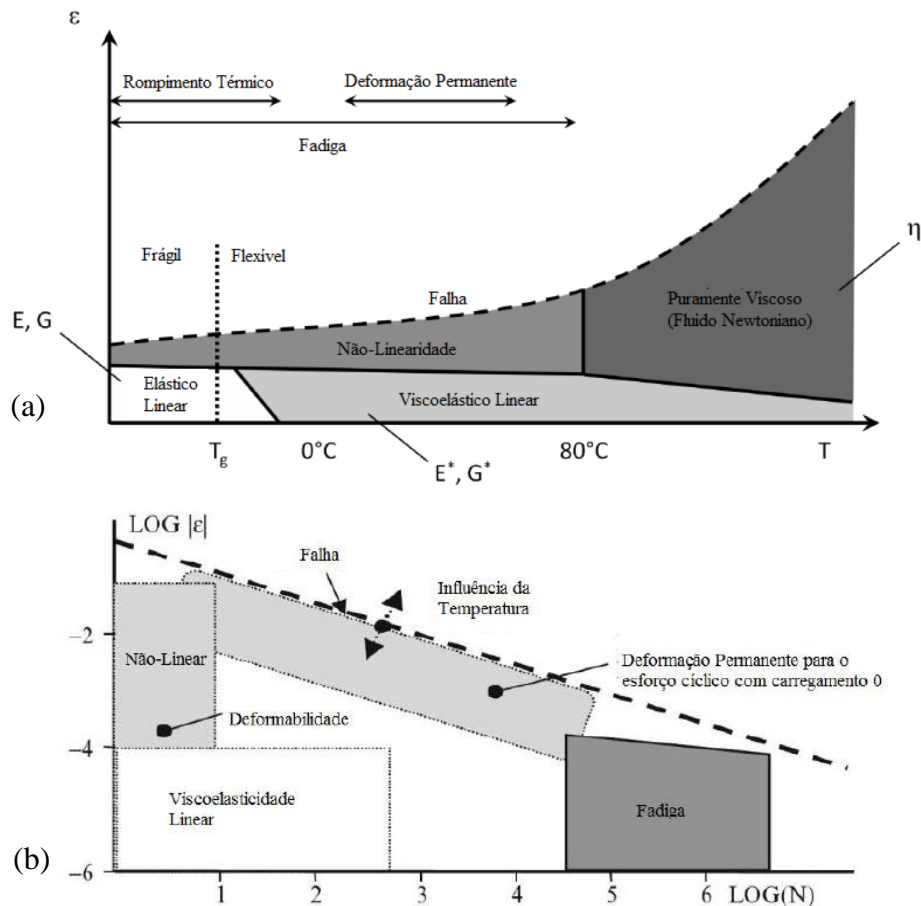
2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Em um nível macroscópico, o concreto asfáltico pode ser analisado como um material contínuo, homogêneo e isotrópico (MANGIAFICO, 2014). Olard et al. (2005) cita que as misturas asfálticas podem assumir diferentes comportamentos em função de três principais fatores: temperatura, amplitude de deformações e ao número de ciclos de carga (Figura 2).

Dependendo da magnitude, tempo, taxa e temperatura de carregamento, os materiais apresentam comportamento distinto. Se a tensão é de pequena amplitude e com número de ciclos reduzido, assume comportamento viscoelástico linear. No entanto, se aplicada tensão pequena e número de ciclos elevado, pode ocorrer danificação por fadiga. Quando sujeito a amplitude de tensão muito elevado, o comportamento se torna não linear. (MANGIAFICO, 2014).

Os limites estabelecidos na Figura 2.a dependem dos níveis de tensão e deformação ao qual os materiais estão submetidos e são suportados, visto que o material pode receber uma deformação máxima sem entrar no domínio de não linearidade, dependendo do tipo de material e temperatura analisada. (FERRY, 1980; SCHAPERLY, 1969).

Figura 2 - Domínios do comportamento mecânico típico de misturas asfálticas em função: (a) da amplitude de deformação e temperatura; (b) da amplitude de deformação e número de ciclos



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

A temperatura é um dos principais fatores que afeta o comportamento do concreto asfáltico, em dois principais modos: alteração da rigidez do material e em relação ao efeito das movimentações térmicas durante as mudanças de temperatura (KIM, 2009). A alteração da rigidez provém da suscetibilidade térmica das misturas betuminosas, herdada das propriedades do ligante asfáltico (RENAULD, 1996).

As principais propriedades ligadas as misturas asfálticas são a rigidez e o dano, ou por fadiga, ou por deformação permanente. O objetivo deste trabalho é avaliar os dois primeiros, visto que misturas recicladas geralmente apresentam bom desempenho a deformação permanente.

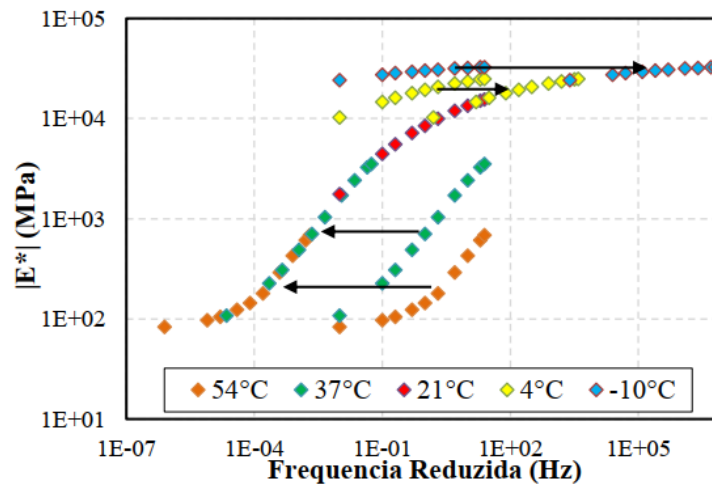
2.2.1 Rigidez

Além da temperatura, as misturas asfálticas são susceptíveis a frequência de aplicação de carga, devido as suas propriedades de viscoelasticidade. Smith (2004) define esta propriedade como a capacidade de armazenar e dissipar energia mecânica em resposta a uma deformação por uma tensão mecânica. A capacidade de armazenar está ligada ao comportamento elástico, e as perdas dissipativas aos efeitos viscosos, estando os materiais viscoelásticos no meio termo entre os dois. Quando submetidos a carregamentos rápidos (altas frequências), estes materiais apresentam comportamento próximo ao dos sólidos elásticos (armazenamento total da energia mecânica), e ao se aplicar carregamentos lentos (baixas frequências), o material apresenta deformações lentas com o passar do tempo, assemelhando-se ao comportamento dos fluidos viscosos (dissipação total da energia mecânica) (BABADOPULOS, 2014).

Para um domínio de pequenas deformações, inferiores a $100 \mu\text{S}$, as misturas asfálticas apresentam comportamento viscoelástico linear, e a teoria viscoelástica é mais representativa comparada a teoria da elasticidade para aproximar do real comportamento (HUANG, 2004; DI BENEDETTO e CORTÉ, 2005; CARDONA et al., 2015). Kim et al. (2004) avalia que o ensaio de módulo complexo, por ser homogêneo, é o que melhor avalia a propriedade de rigidez do material asfáltico. Este avalia variações de frequência e temperatura para determinação de propriedades de relação tensão/deformação, sobre a aplicação de um carregamento senoidal contínuo.

O mesmo valor de rigidez pode ser obtido em ensaios de altas temperaturas e longos tempos de carregamento ou com ensaios a baixas temperaturas, mas altas frequências de aplicação de carga (HOU, 2010). Portanto, o efeito do tempo e da temperatura podem ser combinados em um único parâmetro. Matematicamente, pode-se deslocar os dados de ensaios realizados em outras temperaturas horizontalmente em relação ao tempo até que as curvas formem uma forma contínua e suave à uma temperatura de referência fixada inicialmente, formando a curva mestra de módulo dinâmico (Figura 3).

Figura 3 - Representação da superposição tempo-temperatura



Fonte: Vendrusculo et al. (2019)

Mecanicamente, o comportamento viscoelástico linear pode ser definido como uma combinação de molas e amortecedores que representam, respectivamente, o comportamento elástico e viscoso newtoniano. Dentre os modelos de espectro contínuo, pode-se citar o 2S2P1D (Olard e Di Benedetto, 2003), onde há a adição de um amortecedor linear em série a dois elementos parabólicos e uma mola. Mangiafico (2014) relata que através destas adaptações, este modelo é capaz de representar bem as variações de temperaturas e frequências. O cálculo do módulo dinâmico é dado pela Equação 1.

$$E^*(i\omega\tau_E) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau_E)^{-k} + (i\omega\tau_E)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad (1)$$

Onde β está relacionado a viscosidade do amortecedor linear (Equação 2).

$$\eta = (E_0 - E_\infty)\beta\tau \quad (2)$$

Conforme Olard e Di Benedetto (2003), as sete constantes do modelo: δ , k , h , E_0 , E_{00} , τ_E e β definem completamente o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. Di Benedetto et al. (2004) ainda correlaciona as constantes do modelo com diferentes escalas: ligante e mistura asfáltica.

2.2.2 Dano por fadiga

O fenômeno da fadiga se caracteriza por trincas induzidas por carregamento repetido do tráfego, em níveis de tensão ou deformação inferiores ao estado último de tensão ou deformação dos materiais (YODER e WITCZAK, 1975). Balbo (2007) afirma que os níveis de deformação aplicados ao material, isoladamente, não são suficientes para a falha por fadiga. Entretanto, o acúmulo irreversível de dano, ao longo da vida do pavimento, acaba definindo planos de fratura e descontinuidades, levando a perda de rigidez e integridade do material. Esta perda de rigidez leva, por consequência, a maiores deformações, e o acúmulo destas resulta no fenômeno de fadiga (DI BENEDETTO et al, 2004). O trincamento é a forma mais comum de ocorrência do dano por fadiga, sendo as principais ocorrências do tipo topo-base ou base-topo da camada (HINTZ, 2012).

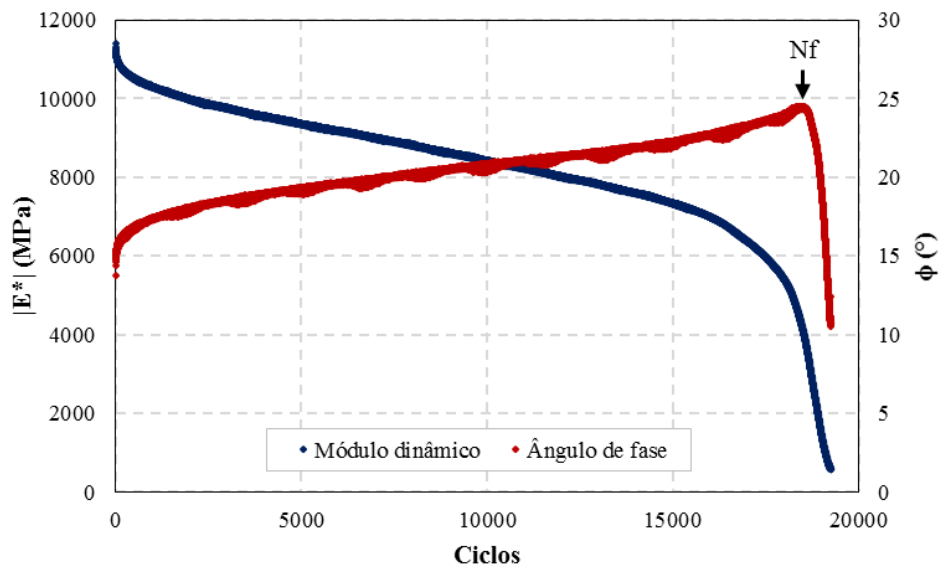
Os resultados de fadiga parecem ser significativamente afetados pelo tipo de ensaio proposto, e configurações diferentes de teste podem levar a comparações enganosas de fadiga (DI BENEDETTO et al, 2004). Kim e Little (1990), através de diversas pesquisas, propuseram o modelo viscoelástico de dano contínuo (*VECD*). Alimentado por resultados do ensaio homogêneo uniaxial cíclico de tração-compressão, o modelo apresenta curvas características de dano por fadiga que independem das condições de ensaio.

Para a análise das misturas asfálticas no que se refere a fadiga, a utilização de um critério de falha é de extrema importância, visto que é este que irá caracterizar a vida de fadiga da mistura avaliada, sendo um parâmetro importante para a verificação do desempenho das misturas asfálticas frente ao trincamento por fadiga (BOEIRA, 2018).

O critério do pico do ângulo de fase proposto por Reese (1997) consiste em identificar o ponto de inflexão dos valores do ângulo de fase, representando uma mudança no comportamento mecânico do material devido ao acúmulo de dano por fadiga (Figura 4). Este critério é consideravelmente mais preciso e lógico do que simplesmente determinar a falha de maneira clássica, pela redução arbitrária de 50% do valor inicial de rigidez (KIM et al., 2003).

Sabouri e Kim (2014) propuseram um critério de falha de fadiga com base na taxa de liberação da energia de pseudo-deformação (G_r), avaliada durante todo o ensaio, independentemente do modo de carga e temperatura, diminuindo significativamente os custos associados ao teste.

Figura 4 - Critério de ruptura da queda do ângulo de fase



Fonte: Autor

Em sequência ao trabalho anterior, realizando algumas simplificações matemáticas, Underwood et al. (2012) propõe o *Simplified-Viscoelastic Continuum Damage Model* (S-VECD). Este utiliza a estrutura mecanicamente fechada anterior, podendo ser realizada a implementação em uma ferramenta de análise estrutural, como elementos finitos, sem fazer ajustes empíricos, facilitando as alternativas para engenheiros avaliarem misturas com potencial, sem realizar grande conjunto de testes. Mais detalhes teóricos sobre o *S-VECD* podem ser encontrados em Babadopulos, 2014; Nascimento, 2015; Schuster, 2018 e Boeira, 2018.

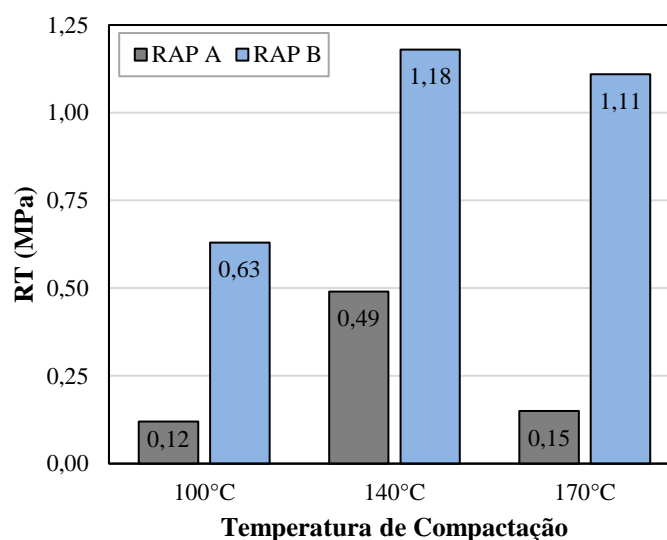
Fundamentado nas teorias anteriores, na abordagem viscoelástica de cargas em movimento, e considerando tensões tridimensionais aos carregamentos impostos, Eslaminia et al. (2012) desenvolveram o software *Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses* (LVECD). Utilizando como entrada: dados climáticos da região, tráfego e estrutura do pavimento, Módulo de Resiliência e Poisson para materiais granulares e subleito, e parâmetros de viscoelasticidade e dano por fadiga para materiais asfálticos, é possível simular o desempenho do pavimento ao longo do tempo com precisão. Nascimento (2015) em sua pesquisa de doutorado, aplicou e validou o modelo S-VECD e critério de falha por fadiga proposto por Sabouri e Kim (2014) para as misturas asfálticas brasileiras. O autor também conseguiu correlacionar e propor funções de transferência entre os dados de laboratório, avaliados pelo modelo e aplicados ao *LVECD*, a dados de campo, principalmente referentes a área trincada medida.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados o planejamento adotado, os materiais utilizados e os ensaios realizados para que os objetivos da pesquisa fossem atingidos. Este trabalho é uma continuidade de três estudos já realizados no grupo de pesquisa utilizando duas fontes de materiais fresado, a fim de compreender melhor as propriedades do material fresado. As pesquisas de Teixeira (2017), Pinheiro (2017) e Bordin (2017) aplicaram uma metodologia de compactação utilizando três temperaturas distintas: 100°C, 140°C e 170°C, proposta em Pires (2018).

Teixeira (2017) utilizou misturas 100% de material fresado, misturando por um minuto nas temperaturas referidas acima, compactadas na mesma temperatura com 50 golpes por face pela metodologia Marshall e ensaiadas por resistência a tração por compressão diametral (RT) (DNIT-ME 136/2010) (Figura 5).

Figura 5 - RT das misturas RAP



Fonte: Adaptado de Teixeira (2017)

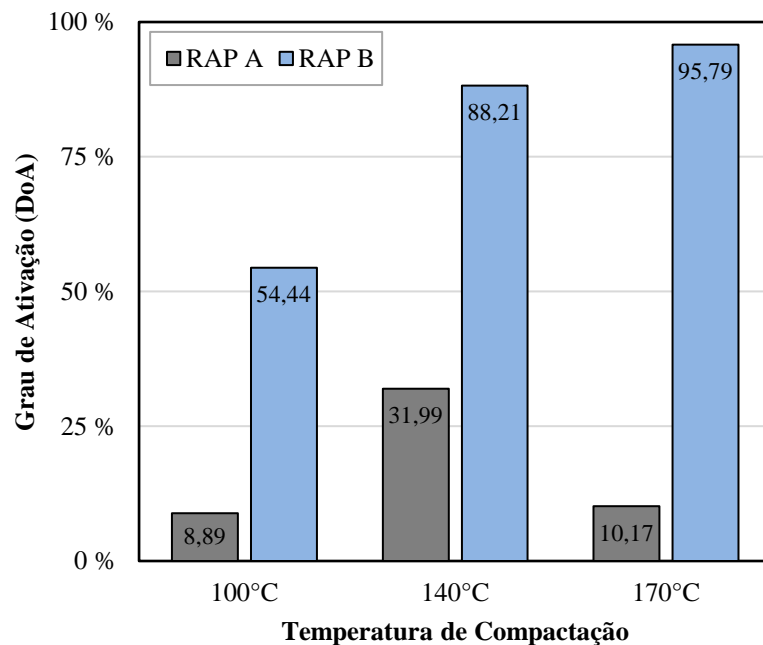
Pinheiro (2017) envelheceu ligantes em laboratório para a mesma penetração dos ligantes dos materiais fresados, misturou por um minuto nas temperaturas e aplicou a mesma energia de compactação de 50 golpes Marshall para formar misturas envelhecidas artificialmente. Utilizando o ensaio de RT, determinou o grau de ativação do ligante envelhecido no material fresado (DoA) destes materiais, a partir da razão de amostras 100%

fresado e amostras com ligante envelhecido artificialmente em laboratório. O DoA para cada temperatura de compactação é definido pela Equação 3.

$$\text{DoA}_T (\%) = \frac{RT_{\text{RAP}}}{RT_{\text{RAP artificial}}} \quad (3)$$

Os resultados obtidos pela autora estão demonstrados na Figura 6.

Figura 6 - DoA das misturas RAP



Fonte: Adaptado de Pinheiro (2017)

Bordin (2017) compactou amostras 100% de material fresadas utilizando compactador giratório (CGS) com N = 100 giros utilizando 600kPa de pressão e 1,25 graus de giro, fixando a energia de compactação para as três temperaturas de compactação. Buscou compreender as propriedades de rigidez destas amostras, utilizando-se do ensaio de módulo complexo, ou módulo dinâmico (MD). Os dados da autora passaram por uma nova modelagem matemática nesta pesquisa devido a uma nova planilha de ajuste e serão apresentados mais a frente, junto aos resultados de rigidez das outras misturas.

Assim, este trabalho vem como continuidade dos anteriores, a fim de comparar parâmetros adicionais de fadiga e viscoelasticidade com o grau de ativação do ligante, nas seis misturas acima, compostas por 100% de material fresado, e quatro misturas de referência,

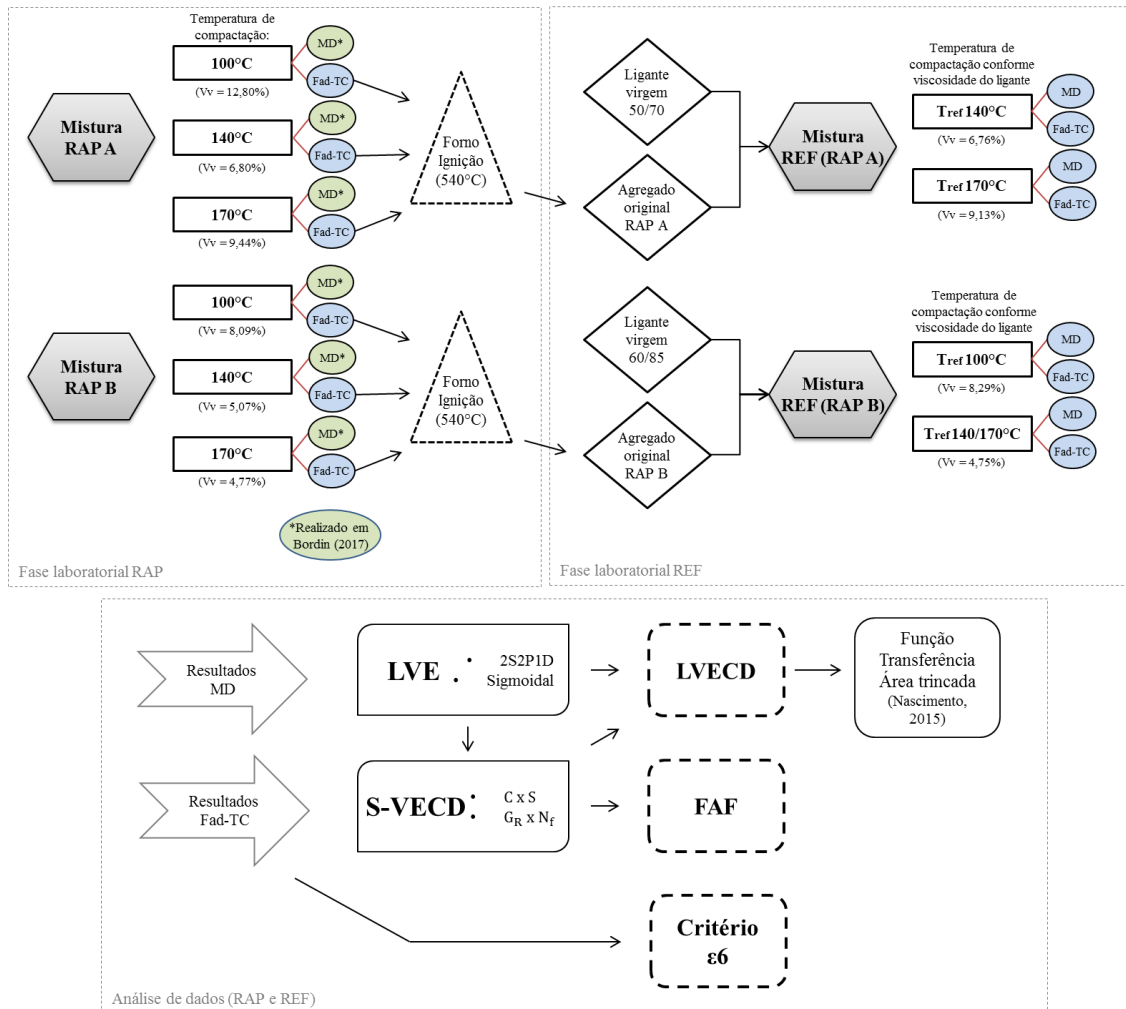
de mesmo agregado e volume de vazios, e diferentemente de Pinheiro (2017), compostas por ligante virgem.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento foi dividido em duas fases laboratoriais, subdivididas em etapas de preparação de amostras e ensaios laboratoriais, além de uma última fase de compilação e análise de dados (Figura 7). A seguir estão apresentadas as fases:

- a) Fase laboratorial RAP:
 - Retificação corpos de prova RAP a 13 cm;
 - Preparação dos corpos de prova RAP ao ensaio de fadiga;
 - Ensaio fadiga tração-compressão;
 - Forno de ignição para obtenção do agregado.
- b) Fase laboratorial REF:
 - Mistura e moldagem dos corpos de prova REF (agregado queimado com ligante virgem);
 - Verificação dos volumes de vazios;
 - Retificação corpos de prova REF a 15 cm;
 - Ensaio módulo dinâmico;
 - Retificação corpos de prova REF a 13 cm;
 - Preparação dos corpos de prova REF ao ensaio de fadiga;
 - Ensaio fadiga tração-compressão.
- c) Fase compilação e análise de dados:
 - Modelagem LVE (2S2P1D e Sigmoidal);
 - Aplicação da teoria S-VECD;
 - Composição das curvas $C \times S$ e $Gr \times Nf$;
 - Avaliação das misturas pelo software LVECD e função de transferência para área trincada de Nascimento (2015);
 - Avaliação das misturas pelo FAF;
 - Avaliação das misturas pelo critério ϵ_6 ;
 - Correlações entre dados de fadiga e demais resultados.

Figura 7 - Planejamento da pesquisa



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Misturas integralmente recicladas (RAP)

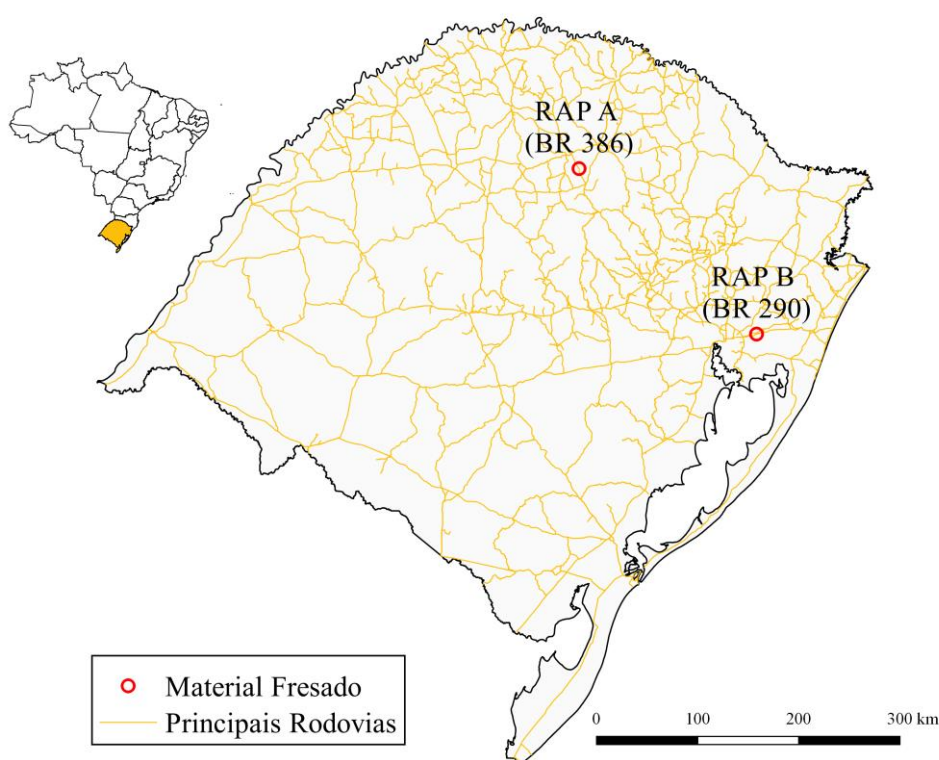
Abordam-se neste item a origem e a caracterização do material fresado, além de resultados realizados em outras pesquisas para este material fresado e a metodologia abordada nas misturas RAP.

3.2.1.1 Origem e caracterização

Os materiais fresados utilizados nesta pesquisa são de duas origens e qualidades distintas. O primeiro, denominado RAP A, é originário de uma mistura com ligante

convencional CAP 50-70, e foi coletado na Rodovia BR 386, entre os km 112+500 e km 109+500, com agregado proveniente da pedreira da Construbrás. O segundo material, denominado RAP B, origina-se de uma mistura com AMP 60/85 E, retirado da rodovia BR 290 no km 72+700, e agregado proveniente da pedreira da Concessionária Triunfo Concepa de Santo Antônio da Patrulha, de origem basáltica. A Figura 8 mostra a origem do material no estado do Rio Grande do Sul.

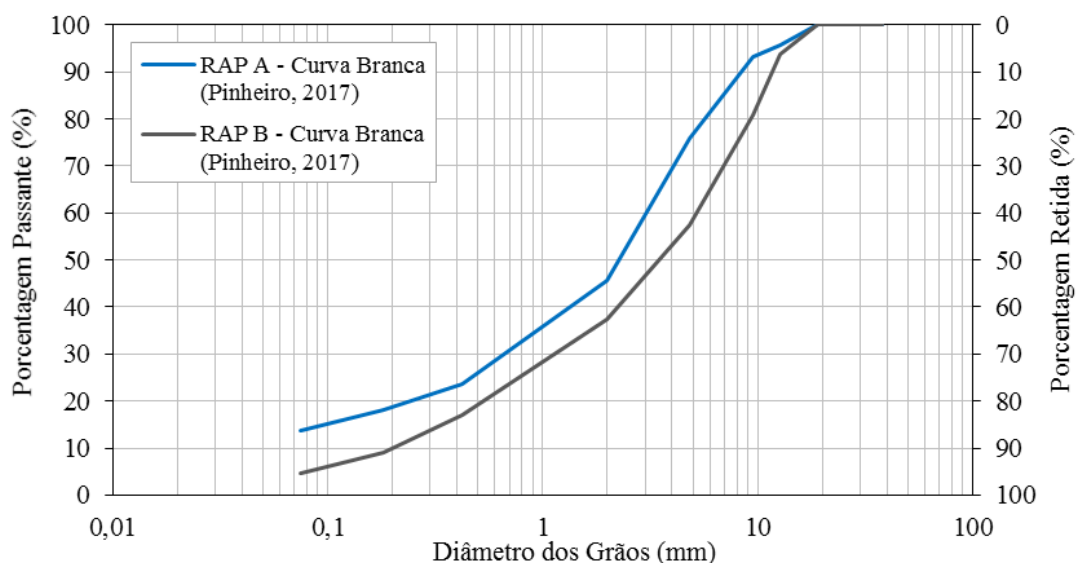
Figura 8 - Localização dos fresados



Fonte: Autor

Ensaio de caracterização foram realizados em outras pesquisas a fim de avaliar a composição destes materiais fresados (PINHEIRO, 2017). A Figura 9 apresenta resultados de granulometria (DNER-ME 083/98) após a passagem pelo processo de extração de ligante (Curva Branca). A granulometria antes da extração do ligante (Curva Negra) não foi realizada nas pesquisas anteriores.

Figura 9 - Granulometria do material fresado



Fonte: Adaptado de Pinheiro (2017)

O teor de betume encontrado para as misturas, realizado pelo rotarex (DNER – ME 053/1994), resultou em 4,85% e 4,41% para os RAPs A e B, respectivamente. A seguir estão apresentadas algumas propriedades referentes aos ligantes do material fresado, extraídos pelo método do refluxo duplo, conforme método B da ASTM D2172, e recuperado pelo método Abson pela ASTM D1856.

Tabela 1 - Propriedades dos ligantes extraídos

Propriedade	Norma	Resultados ligante extraído	
		RAP A	RAP B
Penetração (0,1mm)	DNIT-ME 155/10	12	22
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT-ME 131/10	78	66,5
Recuperação Elástica (%)	DNIT-ME 130/10	-	37
Viscosidade Brookfield a 135°C, 20rpm (cP)	NBR 15184/04	4235*	1359
Viscosidade Brookfield a 150°C, 50 rpm (cP)	NBR 15184/04	1587*	589
Viscosidade Brookfield a 177°C, 100 rpm (cP)	NBR 15184/04	410,8*	171

*Para o RAP A foram aplicados 10, 30 e 60 rpm respectivamente

Fonte: Pinheiro (2017)

3.2.1.2 Composição das misturas RAP

A pesquisa de Bordin (2017) utilizou amostras moldadas no CGS compostas integralmente por material fresado, fixando a energia de compactação e variando as temperaturas de mistura e compactação (100°C, 140°C e 170°C), para realização do ensaio de

MD. Como o ensaio de módulo dinâmico avalia a mistura asfáltica em um regime viscoelástico linear em pequenas deformações, é considerado não destrutivo e os corpos de prova de tamanho 10x15 cm (Figura 10) puderam ser aproveitados nos ensaios de fadiga a tração-compressão, configurando as misturas RAP adotadas nesta pesquisa.

Figura 10 - Amostras RAP



Fonte: Autor

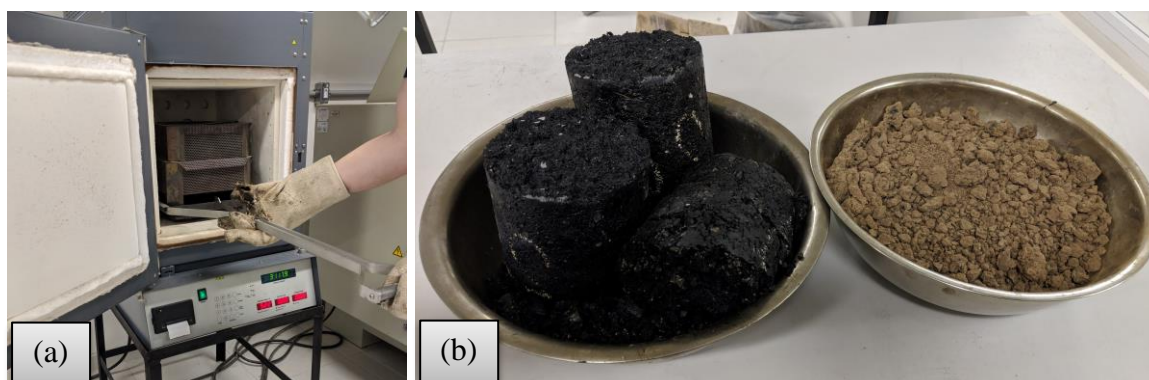
Os resultados de densidade máxima medida (NBR 15619/08) para os RAPs A e B são de 2,696 e 2,553 g/cm³ respectivamente.

A nomenclatura utilizada nas seis misturas RAP é precedida da sua origem, “A” ou “B”, seguido da sua temperatura de compactação correspondente (ex.: RAP B 140°C).

3.2.2 Misturas de referência (REF)

As misturas de fresado, depois de ensaiadas, passaram pelo forno de ignição a 540°C (Figura 11.a), temperatura de queima do ligante asfáltico, conforme método A da norma ASTM D6307. Desta queima restou o agregado original da mistura fresada (Figura 11.b). A pesquisa de Gonçalves (2017) pontua que não há mudança significativa da granulometria do agregado pelo processo do forno de ignição para este tipo de rocha. Assim, este agregado queimado foi utilizado para compor as misturas de referência (REF), com adição de ligante virgem. Portanto, mantidas as granulometrias e volumetrias, a única diferença entre as misturas RAP e REF é o grau de envelhecimento do ligante asfáltico, para realizar a comparação entre as misturas 100% RAP e 100% virgem.

Figura 11 - Processo de queima pelo forno de ignição: (a) forno de ignição; (b) material antes e após a queima



Fonte: Autor

As misturas REF (RAP A) e REF (RAP B) possuem teores de ligante iguais aos encontrados pelos ensaios de rotarex no material fresado, 4,85% (CAP 50-70) e 4,41% (AMP 60/85-E) respectivamente, misturadas e compactadas nas temperaturas determinadas pela viscosidade do ligante virgem. A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização dos ligantes virgens.

Tabela 2 - Propriedade dos ligantes virgens

Propriedade	Norma	Resultados ligantes virgens	
		CAP 50-70	AMP 60/85 E
Performance Grade	AASHTO M 320/17	58 H -28	70 H -22
Penetração (0,1mm)	DNIT-ME 155/10	70	61,2
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT-ME 131/10	49	60
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341/14	334	>400
Recuperação Elástica (%)	DNIT-ME 130/10	20	85
Visc. Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	NBR 15184/04	333	1025
Visc. Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	NBR 15184/04	138	514
Visc. Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	NBR 15184/04	68	225
Temperatura de Mistura (°C)		149	170
Temperatura de Compactação (°C)		137	150

Fonte: Adaptado de Almeida Jr. (2017)

Observa-se que a metodologia de Bordin (2017) não fixou o volume de vazios das amostras, e sim a energia de compactação, portanto as misturas RAP possuem volume de vazios diferentes entre si. Assim, para realizar uma comparação coerente entre os RAPs, as misturas de referência (REF) foram moldadas com o mesmo volume de vazios referentes as misturas RAP. A nomenclatura das misturas REF está de acordo com os respectivos vazios da

mistura RAP correspondente, como mostra a Tabela 3. Os valores de vazios de cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 3 - Volume de vazios das misturas RAP e REF

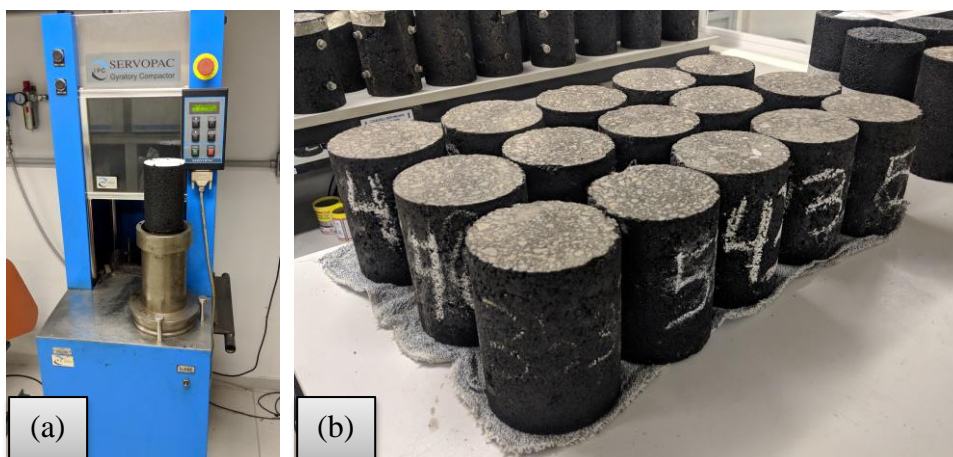
Mistura	Vv médio	DP	Mistura	Vv médio	DP
RAP A 100°C	12,80%	0,30	*		
RAP A 140°C	6,80%	0,65	REF (RAP A 140°C)	6,76%	0,16
RAP A 170°C	9,44%	0,20	REF (RAP A 170°C)	9,13%	0,15
RAP B 100°C	8,09%	0,22	REF (RAP B 100°C)	8,29%	0,27
RAP B 140°C	5,07%	0,33	REF (RAP B 140/170°C)**	4,75%	0,25
RAP B 170°C	4,77%	0,21			

*A mistura REF referente ao RAP A 100°C não foi realizada devido ao elevado volume de vazios, dificultando a compactação e homogeneidade da amostra.

**A mistura REF (RAP B 140/170°C) refere-se a RAP B 140°C e RAP B 170°C visto a proximidade do volume de vazios dessas duas.

Para esta pesquisa os corpos de prova REF foram moldados no compactador giratório (Figura 12.a) com 16 cm e então retificados até a altura de 13 cm (Figura 12.b), visando uma maior homogeneidade na amostra e para que rompa no terço médio do corpo de prova ao final do ensaio de fadiga. Os resultados de densidade máxima medida (NBR 15619/08) para os REF (RAP A) e REF (RAP B) foram de 2,700 e 2,562 g/cm³ respectivamente, bem próximo aos das misturas RAP correspondentes.

Figura 12 - Misturas REF: (a) compactação no compactador giratório; (b) amostras REF depois de retificadas



Fonte: Autor

Quando referido as quatro misturas de referência, compostas pelo agregado original do material fresado e um ligante virgem correspondente, valer-se-á da nomenclatura REF, seguido da reciclada correspondente em parêntesis (ex.: REF (RAP B 140°C)).

3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Este tópico aborda as normativas utilizadas na realização dos ensaios laboratoriais desta pesquisa, bem como quantidade de amostras. Para realizar a caracterização *Visco-elastic Continuum Damage* (VECD), são necessárias informações referentes à rigidez da mistura e de danificação por fadiga. A seguir são descritas as metodologias utilizadas para obtenção destes resultados.

3.3.1 Módulo dinâmico

Para caracterizar as propriedades lineares viscoelásticas foi utilizado o ensaio de módulo dinâmico, ou módulo complexo, pois consegue analisar uma vasta gama de frequências e temperaturas. Realizado seguindo a norma AASHTO T 342 - 11 na prensa UTM-25, ele aplica tensões axiais de compressão cíclicas em um regime viscoelástico linear, restringido a um intervalo de deformações entre 50 e 75 μ S.

Bordin (2017) já havia realizado este ensaio para as misturas RAP, portanto somente as misturas de referência foram submetidas ao protocolo do ensaio. Para as misturas REF, corpos de prova foram moldados com 16 cm pelo compactador giratório, retificados para 15 cm, e então colados os pinos de suporte para os extensômetros de precisão *linear variable differential transformer* (LVDTs). A Figura 13 apresenta a preparação das amostras.

Figura 13 - Preparação amostras módulo dinâmico



Fonte: Autor

Uma aplicação de carregamento uniaxial cíclico de compressão é realizada no corpo de prova e medidas de deformação no eixo correspondente são avaliadas pelos *LVDTs*. De acordo com Di Benedetto e Corté (2005), é 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. Para avaliação da rigidez do material, a prensa UTM-25 no seu manual IPC Global (2011) utiliza as Equações 4 e 5 para determinação do módulo e ângulo de fase.

$$|E^*(\omega)| = \frac{|Y_1^*| * G}{|\overline{Y_D^*}| * A} = \frac{\sigma_{\text{pico}}}{\epsilon_{\text{pico}}} \quad (4)$$

$$|\theta(\omega)| = \arctan^2 \left(-\frac{B_j}{A_j} \right) \quad (5)$$

Onde: $E^*(\omega)$ é o módulo dinâmico na dada frequência (MPa);

$\theta(\omega)$ é o ângulo de fase na dada frequência ($^\circ$);

A_j e B_j componentes retangulares;

$$|Y_j^*| = \sqrt{A_j^2 + B_j^2};$$

$|Y_1^*|$ a amplitude de carregamento (N);

$|\overline{Y_D^*}|$ a média da amplitude dos deslocamentos (mm);

G o deslocamento do pistão (mm);

A a área da seção da amostra (mm²).

Para avaliação, foram utilizadas dez frequências de carregamento: 0,01Hz; 0,1Hz; 0,2Hz; 0,5Hz; 1Hz; 2Hz; 5Hz; 10Hz; 20Hz e 25Hz, e cinco diferentes temperaturas: -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C, totalizando cinquenta pontos de dados por amostra. Então a média de dois corpos de prova de cada mistura compõem os dados de resultado apresentados. A Figura 14 apresenta o ensaio sendo realizado na temperatura de -10°C.

Figura 14 - Ensaio de módulo dinâmico



Fonte: Autor

Os dados experimentais terão ajuste tempo-temperatura pelo WLF (WILLIAM, LANDEL E FERRY, 1955) e ajuste polinomial, além da modelagem 2S2P1D e Sigmoidal. O ajuste polinomial e sigmoidal são dados de entrada ao software *LVECD*. Já os restantes foram utilizados para as correlações viscoelásticas aos dados de DoA de Pinheiro (2017). As equações dos modelos acima, bem como as tabelas dos coeficientes resultantes, serão apresentadas no capítulo de análise de resultados.

3.3.2 Fadiga por tração-compressão

O ensaio uniaxial cíclico de tração-compressão (Figura 15) consiste na aplicação de deformações cíclicas senoidais em corpos de prova cilíndricos, de tração e compressão alternadamente, até o colapso da amostra. O ensaio é normatizado pela AASHTO TP 107-14, e adaptado a prensa UTM-25 na pesquisa de Boeira (2018). É realizado a 19°C e 10Hz.

Figura 15 - Ensaio uniaxial cíclico de tração compressão na prensa UTM-25



Fonte: Autor

Este pode ser realizado a diferentes modos de carregamento: tensão controlada, deformação controlada e de deslocamento do atuador controlado. O terceiro (*controlled crosshead test*) tem como vantagem o ensaio completo até a falha da amostra, limitando os efeitos da viscoplasticidade até certo ponto (ZHANG, 2012), além de fácil operação em amostras cilíndricas quando comparados aos ensaios tradicionais de controle de deformação pelos *LVDTs* (SCHUSTER, 2018). Ao longo do ensaio, as deformações medidas e tensões aplicadas crescem ao longo do ensaio, devido a mudança na taxa de conformidade entre a amostra e o equipamento de carga (HOU, 2009).

Anteriormente ao ensaio, é realizado o chamado *fingerprint*. Um ensaio de módulo dinâmico prévio, que objetiva descobrir a rigidez de cada corpo de prova antes de realizado o procedimento de fadiga. Este resultado é posteriormente relacionado aos de viscoelasticidade, já aferidos, de forma a normalizar possíveis diferenças entre corpos de prova de mesma mistura. Em sequência, o ensaio de fadiga a tração-compressão, onde dados de deformação, carga, ângulo de fase e módulo dinâmico são obtidos, de forma a caracterização de todo o comportamento da amostra até a ruptura.

Antes de ensaiadas, as amostras passaram por uma retificação até a altura final de 13cm, para maior homogeneidade dos vazios nas amostras, colagem de pinos de suporte de *LVDTs* e colagem de chapas de suporte do ensaio, apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Preparação amostras ensaio de fadiga

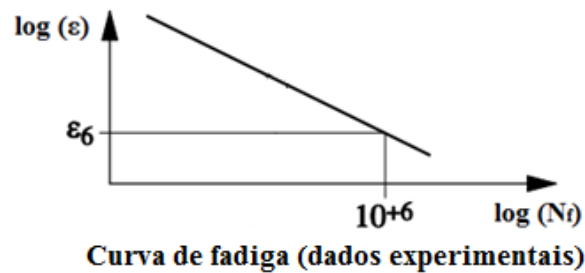


Fonte: Autor

3.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE FADIGA

Os dados experimentais de fadiga serão avaliados por três distintos critérios: ϵ_6 (MANGIAFICO, 2014), Fator Área de Fadiga (FAF) (NASCIMENTO, 2015), e simulação de estrutura de pavimento pelo software *LVECD* (ESLAMINIA et al., 2012) seguido da aplicação da função de transferência calibrada para área trincada (NASCIMENTO, 2015).

O primeiro critério corresponde a quantidade de deformação que deve ser aplicada ao material para obter uma vida útil do ensaio de fadiga de 10^6 ciclos. Este valor, em condições de teste padronizadas, é considerado característica do comportamento de fadiga de misturas asfálticas no método de dimensionamento francês. Ele é fortemente dependente do material testado e das condições de teste utilizadas (DI BENEDETTO e CORTÉ, 2005). A determinação do seu valor utiliza os coeficientes da regressão de potência aos dados de deformação por número de ciclos para ruptura, estendendo a curva até que alcance 1000000 de ciclos. O valor de deformação correspondente a este número de ciclos é denominado ϵ_6 (Figura 17).

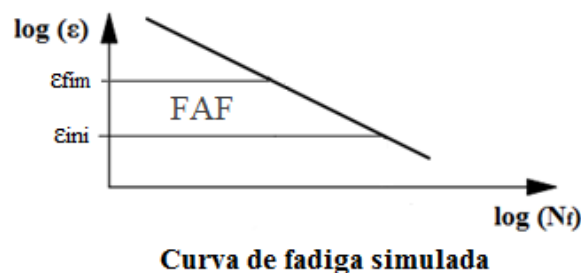
Figura 17 - Modo de determinação ε_6 

Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2005)

Para uma análise mais aprofundada da fadiga em misturas asfálticas, Underwood et al (2010) propôs uma simplificação da teoria viscoelástica de dano contínuo, o chamado *S-VECD*. Este avalia a taxa de dissipação de energia na amostra durante o ensaio (Gr), em função do número de ciclos de ruptura (N_f). Também avalia a perda de integridade do material (C) pelo acúmulo de dano na amostra (S), de forma que para qualquer deformação aplicada, as curva $C \times S$ colidirão em uma só. Para auxiliar nos cálculos da teoria *S-VECD*, foi utilizada uma rotina no software *MATLAB*, desenvolvida em Babadopoulos (2014), para análise de dados a cada ciclo de ensaio.

Nascimento (2015) propôs uma simulação de N_f em um ensaio perfeito, sem interferência de fenômenos parasitas de aquecimento interno, tixotropia e não linearidade, utilizando como dados de entrada os resultados do ensaio de fadiga a tração-compressão e *S-VECD*: coeficientes C_{11} , C_{12} , Δ , γ ; e dados de viscoelasticidade na temperatura do ensaio. Assim, fixando uma deformação máxima e mínima, é calculada a área abaixo da curva deformação por número de ciclos para falha (Figura 18), denominada FAF.

Figura 18 - Representação cálculo área de fadiga pelo FAF

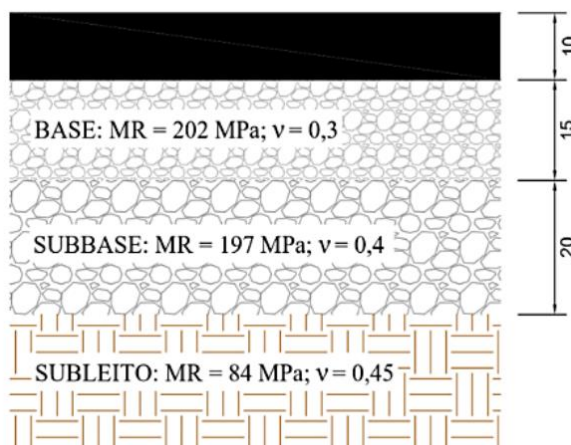


Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Como o fenômeno da fadiga está relacionado não somente ao material asfáltico, mas também a toda estrutura do pavimento, o software *LVECD* (ESLAMINIA et al, 2012), cedido pela North Caroline State University, foi utilizado para simular estruturas de pavimento.

Para fixar comparações apenas entre o revestimento, foi escolhida uma estrutura de pavimento típica da região sul do Rio Grande do Sul (Figura 19), variando apenas o revestimento com as misturas analisadas. Esta estrutura foi também utilizada nas pesquisas de Schuster (2018), Boeira (2018) e Luzzi (2019) para comparação e ranqueamento de misturas frente a fadiga. As estruturas não asfálticas são calculadas pelo software por esforços elásticos, com rigidez determinada pelo módulo de resiliência (MR) da camada.

Figura 19 - Estrutura aplicada no software *LVECD*



Fonte: Schuster (2018)

O tráfego foi definido com N_{USACE} de $1E+07$ equivalências do eixo padrão, taxa de crescimento de 3% ao ano e variação horária ao longo do dia igual ao de Nascimento (2015). Além disto, o período de análise de 15 anos e dados climáticos anuais de San Diego-CA, por ser mais próximo do clima no Rio Grande do Sul (NASCIMENTO, 2015). Assim, uma malha de 110 pontos é escolhida abaixo do rodado, para avaliação do dano médio da camada a cada período de tempo.

Nascimento (2015), por meio de trechos experimentais brasileiros, calibrou uma função de transferência que correlaciona dados de dano médio na camada de revestimento pelo *LVECD* com área trincada em campo, que será utilizada nos dados desta pesquisa.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os dados de ensaios laboratoriais, sua modelagem matemática, análise e discussão dos resultados da pesquisa.

Primeiramente são apresentados os resultados quanto a rigidez das misturas, pelo ensaio de MD e modelagens matemáticas. Depois os resultados referentes ao ensaio de fadiga por tração-compressão e aplicação do modelo *S-VECD*. Na sequência, análises quanto a simulação de estruturas de pavimento, áreas sob curvas de fadiga (FAF) e o critério ϵ_6 . Por fim, são apresentadas correlações entre os dados de viscoelasticidade, de fadiga, volumetria e grau de ativação.

4.1 RIGIDEZ

Pelo advento de uma nova planilha de cálculo, os dados de módulo complexo de Bordin (2018) para as misturas RAP passaram por uma nova modelagem nesta pesquisa e são apresentados a seguir, junto as misturas REF.

A partir dos resultados de módulo dinâmico das cinco temperaturas e dez frequências, foi construída a superposição tempo-temperatura. A partir da fixação de uma temperatura referência de 21°C, é possível a extrapolação de dados a domínios de temperaturas e frequências não ensaiadas, com a elaboração das curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase (DI BENEDETTO, 2005).

Os fatores de translação são modelados por duas principais equações: WLF (Equação 6) e polinomial (Equação 7). A primeira foi desenvolvida por William, Landel e Ferry (1955) e a segunda é caracterizada como um ajuste polinomial dos fatores, e é utilizada no software de análise de desempenho *LVECD*. Ambas apresentam resultados semelhantes aos mesmo fatores de translação.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1 * (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (6)$$

$$\log(a_T) = a_1 * T^2 + a_2 * T + a_3 \quad (7)$$

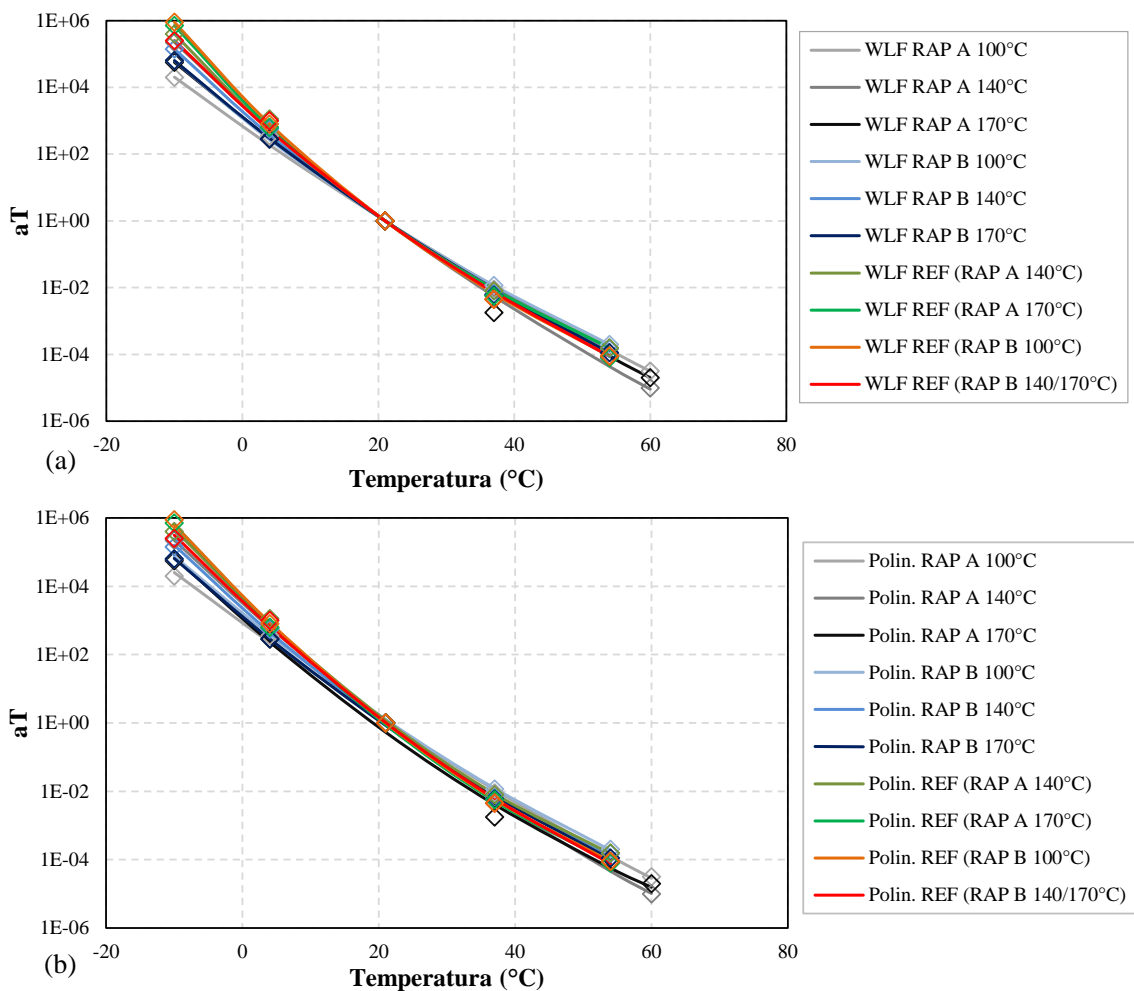
A seguir são apresentados os fatores de translação junto aos modelos matemáticos (Figura 20), e coeficientes correspondentes (Tabela 4). Os fatores de translação de cada temperatura são apresentados no Apêndice B.

Tabela 4 - Coeficientes superposição tempo-temperatura

Mistura	WLF			Polinomial		
	C1	C2 (°C)	T ref (°C)	a ₁	a ₂	a ₃
RAP A 100°C	47,70	374,36	21,00	0,000328	-0,144151	2,926694
RAP A 140°C	36,02	239,71	21,00	0,000610	-0,178164	3,502126
RAP A 170°C	39,51	288,87	21,00	0,000697	-0,172757	3,049366
RAP B 100°C	26,00	198,94	21,00	0,000595	-0,160575	3,211140
RAP B 140°C	24,56	178,93	21,00	0,000799	-0,176899	3,353031
RAP B 170°C	33,75	248,99	21,00	0,000609	-0,164196	3,108630
REF (RAP A 140°C)	20,32	143,51	21,00	0,000968	-0,190814	3,658068
REF (RAP A 170°C)	18,92	131,27	21,00	0,001040	-0,200053	3,693611
REF (RAP B 140/170°C)	26,59	183,63	21,00	0,000808	-0,185751	3,555513
REF (RAP B 100°C)	21,78	144,48	21,00	0,001006	-0,198161	3,717810

Fonte: Autor

Figura 20 - Ajuste dos dados de translação tempo-temperatura: (a) modelo WLF; (b) ajuste polinomial



Fonte: Autor

Entre os dois modelos, pode-se perceber a obrigação do modelo matemático WLF de representar a temperatura referência, o que não é visto na curva de ajuste polinomial. Indica que os valores próximos a temperatura referência, no caso 21°C, são melhor representados pelo primeiro modelo, ao passo que, o ajuste polinomial apresenta um erro mais distribuído entre as temperaturas. De maneira geral, ambas apresentam resultados muito próximos.

Dentre as misturas, pode-se observar a menor inclinação dos RAPs frente as diferentes temperaturas, visualizado na menor amplitude de variação entre as menores para as maiores temperaturas. Esta menor susceptibilidade a variação de temperatura deve-se provavelmente ao elevado grau de envelhecimento do ligante.

Para modelagem matemática dos dados frente as frequências reduzidas, chamadas curvas mestras, foram utilizados dois modelos matemáticos. O modelo Sigmoidal (Equação 8) é um modelo de ajuste de curva, onde seus coeficientes não possuem relação física com o material. De maneira simplificada, a norma AASHTO R84-2017 propõe o uso de um ajuste utilizando a função *solver* no *Microsoft Excel*, minimizando a soma dos mínimos quadrados.

$$\log|E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(fR)}}} \quad (8)$$

Esse é utilizado como dado de entrada de viscoelasticidade no software *LVECD*. Para um cenário prático, ele funciona bem, visto a facilidade de ajuste. A seguir estão apresentados os coeficientes de módulo dinâmico a 21°C ajustados pelo sigmoidal (Tabela 5).

Tabela 5 - Coeficientes do ajuste sigmoidal

Mistura	Sigmoidal @ 21°C (kPa)			
	a	b	d	g
RAP A 100°C	2,40403	4,79579	2,83680	0,36802
RAP A 140°C	1,01388	6,52791	3,38925	0,35787
RAP A 170°C	1,01504	6,39989	2,98851	0,27311
RAP B 100°C	2,23130	5,20488	2,21385	0,42526
RAP B 140°C	2,55412	4,99653	2,46553	0,42539
RAP B 170°C	1,29700	6,32615	2,47332	0,31963
REF (RAP A 140°C)	4,33707	3,17538	1,22758	0,50235
REF (RAP A 170°C)	3,24176	4,24879	1,57244	0,42374
REF (RAP B 140/170°C)	4,34236	3,19091	1,47004	0,46137
REF (RAP B 100°C)	3,81716	3,69226	1,46168	0,43018

Fonte: Autor

Para uma análise mais detalhada dos dados de viscoelasticidade linear e correlação com grau de ativação, foi também aplicado o modelo 2S2P1D (OLARD e DI BENEDETTO, 2003) (Tabela 6). Este, além do módulo dinâmico, utiliza também as propriedades referentes ao atraso em graus do pico de tensão aplicada ao pico de deformação medida, chamado ângulo de fase. Cada uma das sete constantes do modelo é calibrada de modo que todos os gráficos possuam menor erro para os dados experimentais, e cada uma delas possuem correlação mecânica com as misturas asfálticas.

Tabela 6 - Coeficientes da modelagem 2S2P1D

Mistura	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_E (s)	β
RAP A 100°C	60	18000	0,138	0,442	1,996	1,78E+01	10000
RAP A 140°C	75	36888	0,149	0,505	2,200	1,97E+02	10000
RAP A 170°C	60	26600	0,130	0,444	2,430	1,09E+02	10000
RAP B 100°C	34	27719	0,200	0,530	2,360	4,86E-01	10000
RAP B 140°C	75	39500	0,138	0,480	1,650	8,53E-01	10000
RAP B 170°C	150	42743	0,143	0,402	1,950	5,41E-01	10000
REF (RAP A 140°C)	75	35800	0,185	0,540	2,200	5,00E-02	10000
REF (RAP A 170°C)	70	32000	0,185	0,540	2,430	6,00E-02	10000
REF (RAP B 100°C)	50	34400	0,175	0,490	2,250	5,60E-02	10000
REF (RAP B 140/170°C)	106	36500	0,175	0,490	1,950	1,10E-01	10000

Fonte: Autor

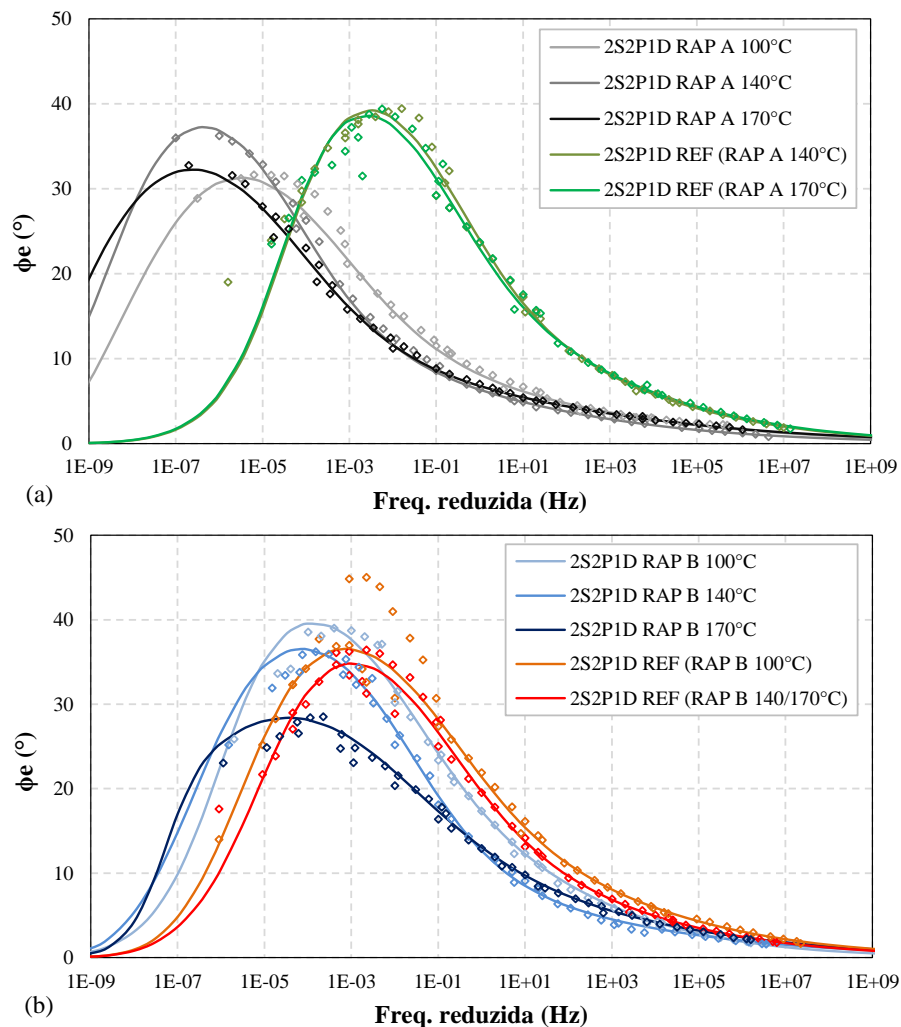
Conforme Di Benedetto (2004), misturas de mesmo ligante asfáltico possuem valores de k e h semelhantes, como pode ser observado nas misturas REF (RAP A) e REF (RAP B). Para as misturas RAP A, as temperaturas de compactação 100°C e 170°C apresentam valores de k e h muito próximos, indicando uma provável propriedade de reativação semelhante presente nas misturas, de 8,89% e 10,17% respectivamente, observado por Pinheiro (2017). A temperatura de compactação 140°C apresenta k e h mais próximo da REF (RAP A), porém ainda com reativação baixa, de 31,99%. Para as misturas RAP B, os valores de k e h decrescem com o aumento da temperatura de compactação, comportamento inverso ao DoA calculado por Pinheiro (2017), o que demonstra que as misturas possuem características de ligante distintas entre si, possivelmente referente a diferentes graus de ativação do ligante do fresado.

As características de volumetria e esqueleto de agregado mineral possuem relação com as constantes E_{00} e E_0 (DI BENEDETTO, 2004). A maior proximidade destas

constantes nas misturas RAP diante das REF representa uma volumetria semelhante, e parcela de *black rock* menos representativa na mistura, caracterizando uma maior participação do ligante envelhecido do fresado na mistura. Para o RAP A, a temperatura de compactação 140°C frente a sua REF correspondente é a que possui maior correlação de parâmetros para essas duas constantes, resultando no maior DoA para este fresado. Já no RAP B, as temperaturas de 140°C e 170°C resultaram em constantes mais próximas das referências, indicando melhor grau de ativação que a temperatura de 100°C.

A constante τE está ligada a translação horizontal das curvas mestras. Esta propriedade está melhor descrita nas curvas mestras de ângulo de fase abaixo (Figura 21).

Figura 21 - Modelagem 2S2PID para os dados de ângulo de fase: (a) curvas mestras de ângulo de fase para RAP A e REF (RAP A); (b) curvas mestras de ângulo de fase para RAP B e REF (RAP B)



Quanto maior a translação a esquerda, maior o seu valor de τ_E , e para as misturas analisadas, maior o seu grau de envelhecimento. Pode-se observar que as curvas mestras de ângulo de fase das misturas REF são muito semelhantes, sugerindo que a diferença só está em função do volume de vazios das misturas. Quando comparadas as misturas RAP com as suas REF correspondentes, pode-se notar a grande defasagem do pico de ângulo de fase, descrito pela constante τ_E , na casa de $10E+2$ e $10E-1$, para as RAPs A e B respectivamente. A maior defasagem do ângulo de fase está possivelmente relacionada o maior grau de envelhecimento do ligante presente na mistura, indicando que o RAP A possui envelhecimento maior que o RAP B, também observado nos dados de DoA de Pinheiro (2018), onde os níveis de reativação são maiores para o RAP B.

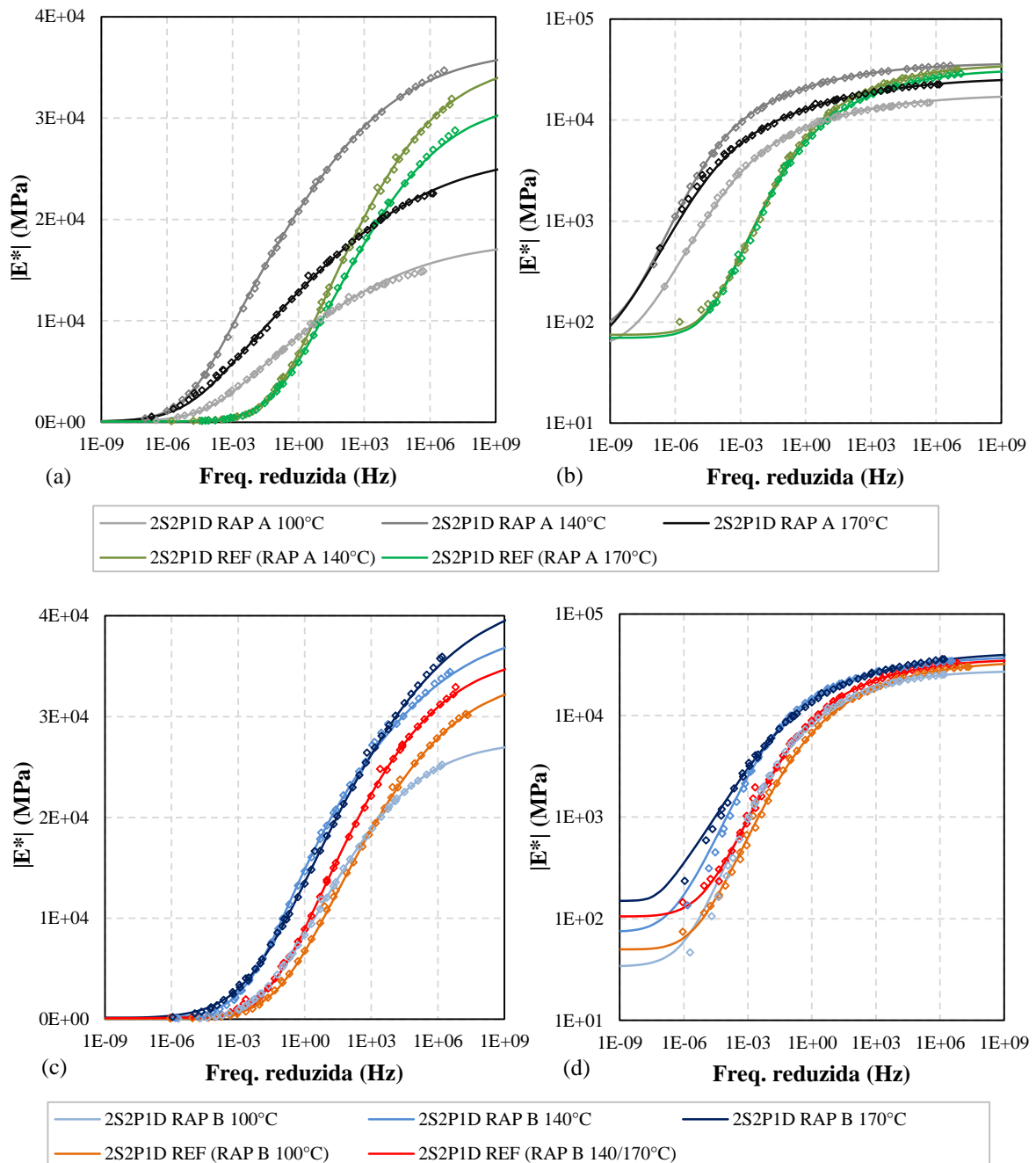
Ainda, relacionando ao dano por fadiga, Schuster (2018) encontra boas correlações entre a posição horizontal do pico na curva mestra do ângulo de fase com o melhor ou pior desempenho a fadiga de misturas asfálticas, o que será abordado mais adiante junto aos dados de fadiga.

A seguir são apresentadas as curvas mestras de módulo dinâmico (Figura 22).

As diferenças nas translações horizontais entre RAP e REF também são observadas aqui, de maneira mais discrepante no RAP A que no RAP B, indicando um maior envelhecimento do primeiro material fresado.

As curvas de módulo RAP A demonstram um comportamento distante das suas REF, com rigidezes mais elevadas nas frequências inferiores e intermediárias, porém esta diferença decai com o aumento das frequências. Para o RAP B, o comportamento é semelhante, exceto para a mistura RAP B 100°C. A maior diferença nos dois fresados se dá para as temperaturas mais altas (menores frequências), onde a rigidez dos RAPs está bem acima das REFs. Maiores conclusões a respeito do comportamento da rigidez das misturas RAPs são encontradas em Bordin (2017).

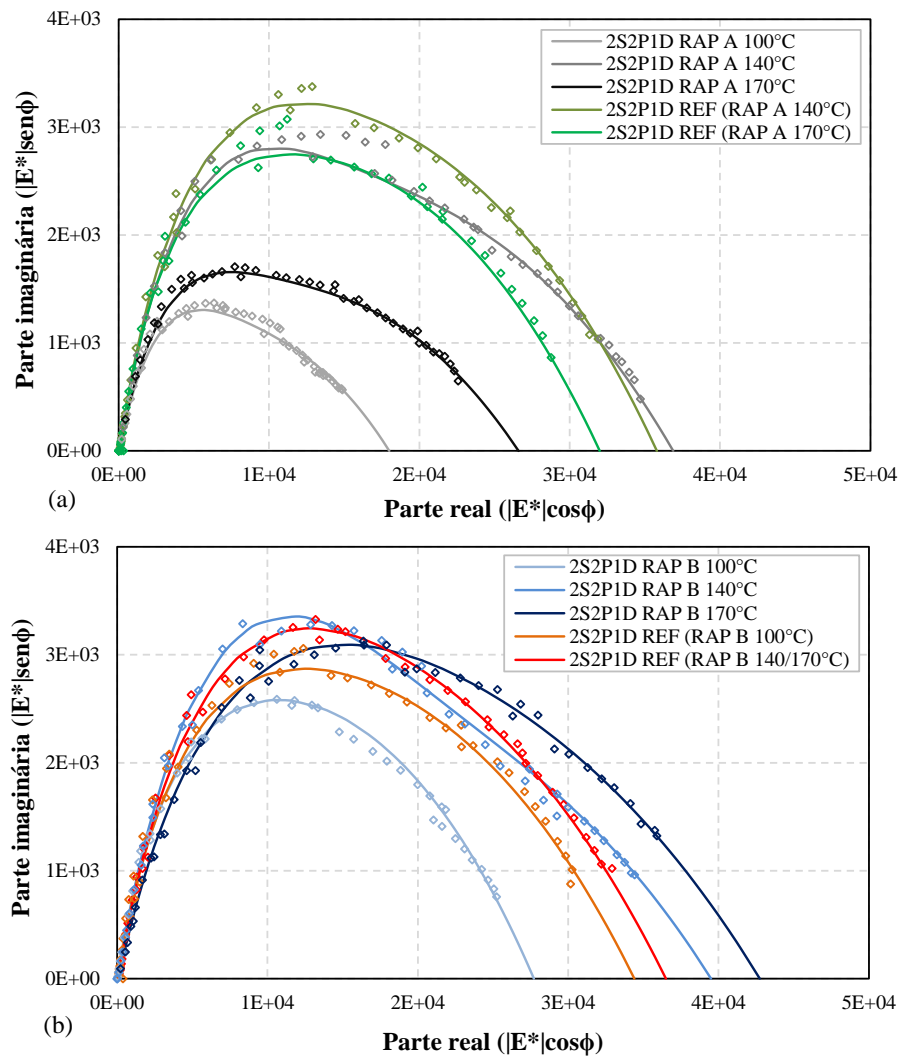
Figura 22 - Modelagem 2S2P1D para os dados de módulo dinâmico: (a) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP A e REF (RAP A) em escala semilog; (b) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP A e REF (RAP A) em escala log-log; (c) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP B e REF (RAP B) em escala semilog; (d) curvas mestras de módulo dinâmico para RAP B e REF (RAP B) em escala log-log



Fonte: Autor

O modelo 2S2PID ainda prevê análises independentes da superposição tempo-temperatura, realizadas entre a parte real x parte imaginária, chamado espaço Cole-cole (Figura 23), ou diretamente entre módulo dinâmico x ângulo de fase, chamado diagrama Black (Figura 24), que permitem visualizar e distinguir intervalos elásticos e viscoelásticos.

Figura 23 - Modelagem 2S2PID para parte real x parte imaginária: (a) espaço cole-cole para RAP A e REF (RAP A); (b) espaço cole-cole para RAP B e REF (RAP B)

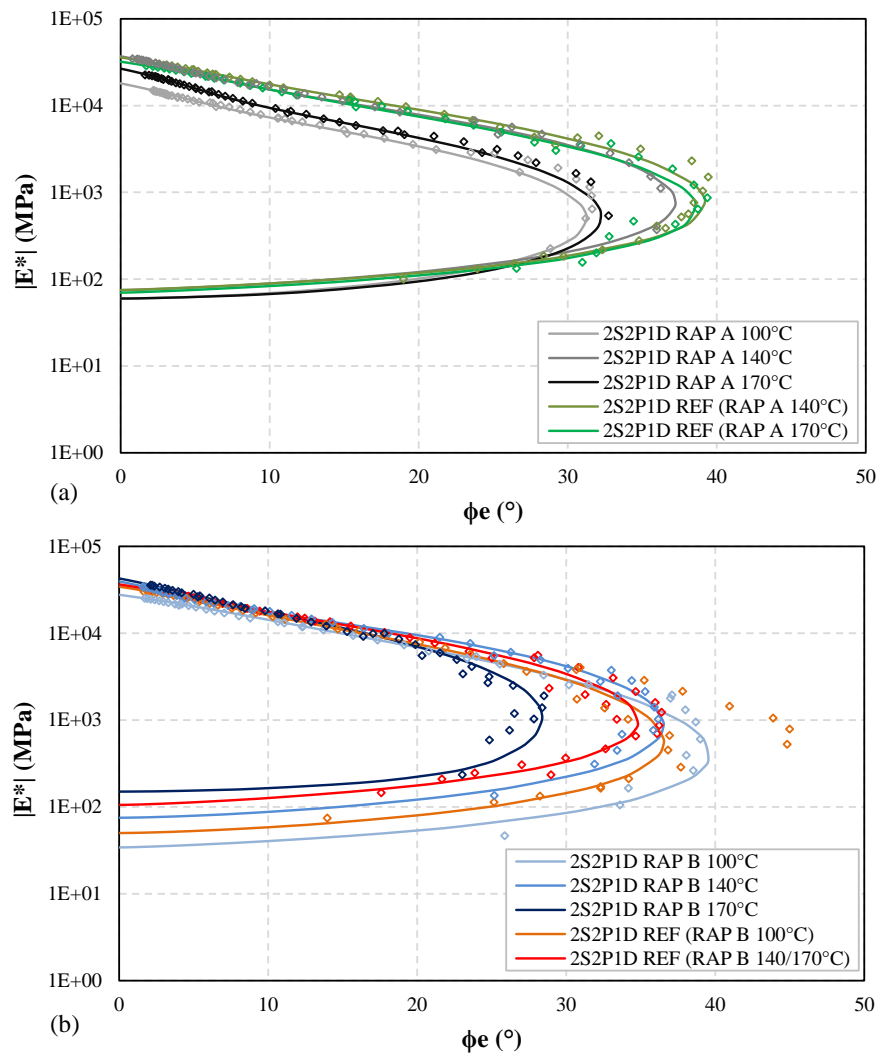


Fonte: Autor

Pelos diagramas Cole-cole, uma análise semelhante pode ser feita a partir da proximidade ou não das curvas RAP com as REF, seguindo o mesmo raciocínio já apresentado pela relação entre as constantes do modelo. Para o RAP A, pode-se notar a proximidade da 140°C a sua REF, diferentemente das outras temperaturas, bem distantes, resultado visto no DoA também. Para o RAP B, a temperatura de 100°C é a que fica mais

distanciada da sua REF, indicando menor ativação comparada as demais temperaturas. As temperaturas de 140°C e 170°C ficam mais próxima da REF, com uma leve vantagem a primeira, entretanto ambas apresentam potencial de reativação e compactabilidade muito similar.

Figura 24 - Modelagem 2S2P1D para módulo dinâmico x ângulo de fase: (a) diagrama black para RAP A e REF (RAP A); (b) diagrama black para RAP B e REF (RAP B)



Fonte: Autor

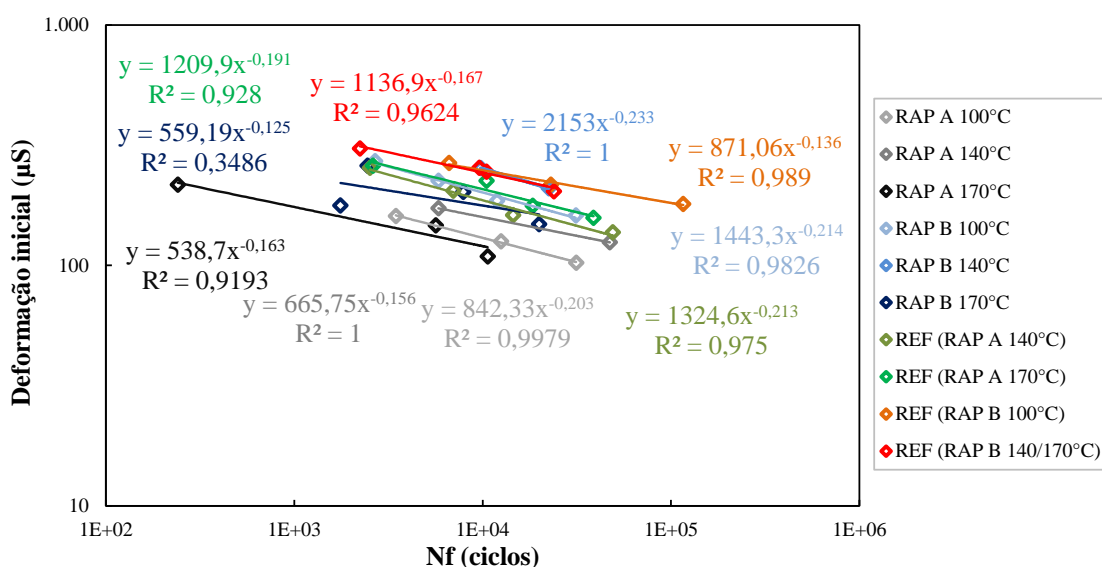
Para os diagramas black, a análise é muito próxima a dos picos do ângulo de fase na curva mestra, visto que este diagrama apresenta relação entre módulo dinâmico e ângulo de fase. Quanto a amplitude do pico de ângulo de fase, observa-se que para o RAP A, as temperaturas de compactação de 100°C e 170°C tem diferença de amplitude muito semelhante quando comparadas aos REF. A temperatura de 140°C está mais próxima da sua

REF, indicando uma possível melhor ativação, resultados encontrados também no DoA de Pinheiro (2018). Relação que não se pôde evidenciar para o RAP B, onde as curvas apresentam ordem decrescente de amplitude de pico, com o aumento da temperatura de compactação e os picos de 100°C e 140°C são os mais próximos das suas REF, diferentemente da temperatura de 170°C quando comparada a sua REF.

4.2 DANIFICAÇÃO

Todas misturas passaram pelo ensaio de fadiga a tração-compressão, sendo aplicadas diferentes amplitudes de deformações aos materiais, buscando varrer um intervalo válido de números de ciclos de ruptura (N_f) entre $10E+2$ e $10E+5$. O critério de ruptura utilizado foi o da inflexão do comportamento do ângulo de fase da amostra durante o ensaio. Importante salientar que o ensaio realizado a *crosshead* constante (CX) não resulta em uma taxa de aplicação constante no corpo de prova, sendo a deformação apresentada aqui a inicial, correspondida pela deformação medida na amostra média entre os ciclos 50 e 150, metodologia utilizada em Boeira (2018). É válido ressaltar que a diferença na volumetria das misturas pode contribuir para uma análise equivocada quando se comparados resultados diretamente. Abaixo é apresentado o número de ciclos de falha pela deformação inicial imposta (Figura 25).

Figura 25 - Deformação inicial aplicada pelo número de ciclos para ruptura



Fonte: Autor

Todas misturas apresentaram um R^2 para o modelo de potência elevado, exceto a mistura RAP B 170°C. Duas delas apresentaram R^2 unitário, devido a apenas dois corpos de prova ensaiados puderem ser aproveitados. Os resultados de deformação por ciclo de falha nas curvas apresentadas se classificam como um critério de avaliação da vida de fadiga e será utilizado em uma posterior análise, aplicando o conceito de ϵ_6 (MANGIAFICO, 2014).

Aplicando a teoria *S-VECD*, já comentada anteriormente, curvas de perda de integridade (C) por acúmulo de dano (S) são formadas para os dados de diferentes deformações. O ajuste pelo modelo de potência (Equação 9) foi utilizado para a calibração das curvas C x S de cada amostra, e em sequência um *fitting* de forma a encontrar a média dos ajustes. O Apêndice C apresenta o ajuste das diferentes deformações para as curvas.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (9)$$

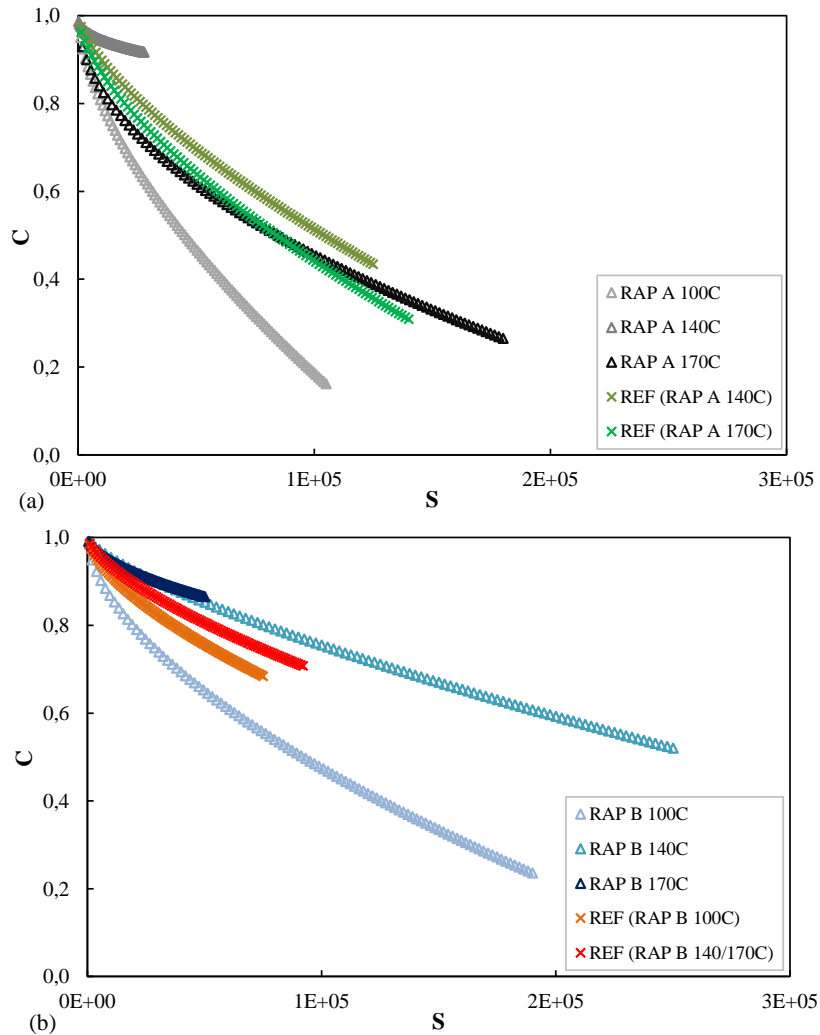
Um outro ajuste matemático também foi aplicado, utilizando os mesmos dados. O ajuste exponencial (Equação 10) apresenta correlações bastante semelhantes ao anterior, e este é utilizado como dado de entrada no software de análise de desempenho *LVECD*.

$$C(S) = e^{-AS^B} \quad (10)$$

Não se pode prever o comportamento a fadiga utilizando comparação entre C x S, porém pode-se avaliar a quantidade de dano acumulado até a ruptura, e respectiva perda de integridade em cada mistura. Verifica-se que as misturas RAP de maior rigidez, RAP A 140°C e RAP B 170°C, rompem para pequenas perdas de integridade, sugerindo uma ruptura frágil no material. As misturas RAP A 170°C, RAP B 100°C e RAP B 140°C ainda romperam a um nível de integridade superior as suas REF correspondentes.

A seguir são apresentadas as curvas C x S médias para as misturas (Figura 26), ajustadas pelo modelo de potência e os coeficientes resultantes de cada modelo para cada mistura (Tabela 7).

Figura 26 - Curvas integridade do material por dano acumulado pelo modelo de potência: (a) C x S das misturas RAP A e REF (RAP A); (b) C x S das misturas RAP B e REF (RAP B)



Fonte: Autor

Tabela 7 - Coeficientes ajuste exponencial para dados de integridade por dano acumulado

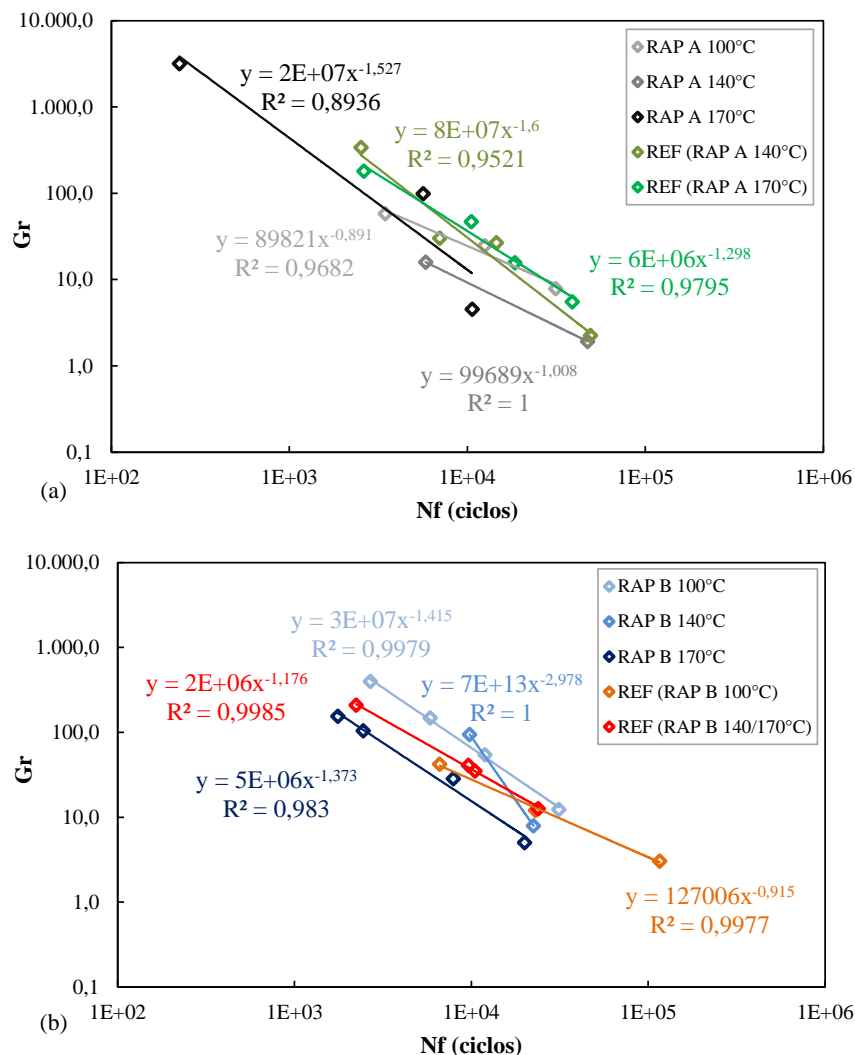
Mistura	Ajuste Exponencial		Ajuste Potência	
	A	B	C ₁₁	C ₁₂
RAP A 100°C	0,000042600	0,909707259	0,000686844	0,614635563
RAP A 140°C	0,001231423	0,415068543	0,001315378	0,404463494
RAP A 170°C	0,000238074	0,706329590	0,001531968	0,510069232
RAP B 100°C	0,000053919	0,831503755	0,000615977	0,586062458
RAP B 140°C	0,000011792	0,879144141	0,000052961	0,733078839
RAP B 170°C	0,000192326	0,612116017	0,000281058	0,570091889
REF (RAP A 140°C)	0,000064924	0,800994951	0,000190553	0,681303401
REF (RAP A 170°C)	0,000033784	0,878883838	0,000370610	0,635528004
REF (RAP B 100°C)	0,000141187	0,701958469	0,000240994	0,639497655
REF (RAP B 140/170°C)	0,000053312	0,765958197	0,000135856	0,671503871

Fonte: Autor

A seguir são apresentadas as curvas Gr x Nf das misturas (Figura 27), ajustadas pelo modelo de potência (Equação 11). O Apêndice D apresenta os valores de Gr, Nf e deformação inicial medida para cada amostra das misturas.

$$Gr = \gamma N_f^\Delta \quad (11)$$

Figura 27 - Resultados de critério de ruptura Gr por número de ciclos para falha: (a) Gr x Nf para RAP A e REF (RAP A); (b) Gr x Nf para RAP B e REF (RAP B)



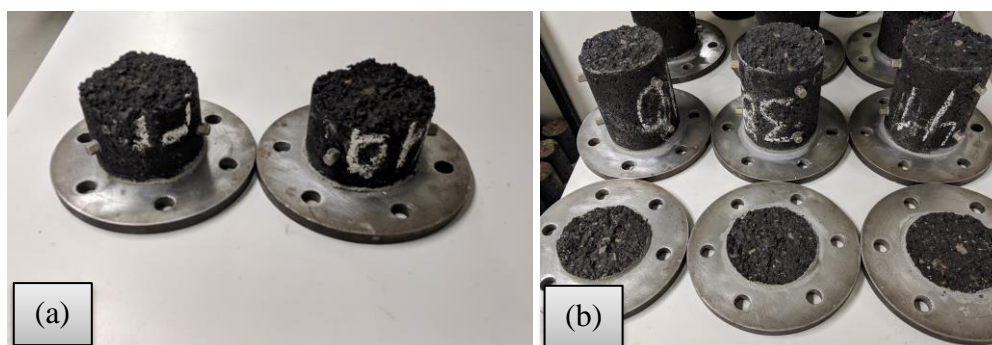
Fonte: Autor

Todas misturas apresentaram um R² elevado para o ajuste polinomial, mesmo a mistura RAP B 170°C que havia apresentado baixa correlação para deformação por Nf. Pelas curvas Gr x Nf é possível inferir sobre o desempenho a fadiga. Misturas mais à direita e para

cima possivelmente apresentem melhor resultado (NOROUZI, 2015), indicando que, para as misturas da Figura 27.a, as REF (RAP A) apresentaria melhor desempenho sobre as RAP A e para a Figura 27.b, é esperado que a mistura RAP B 100°C tenha o melhor resultado frente a fadiga.

É válido observar que algumas amostras romperam fora do limite do terço médio do corpo de prova (Figura 28), devido a elevada rigidez das misturas quando ensaiadas a 19°C e 10Hz. Fato semelhante ocorreu em Babadopulos (2014), entretanto acredita-se que não tenha comprometido os resultados de fadiga, devido ao elevado R^2 encontrado no critério acima.

Figura 28 - Rompimento das amostras ao final do ensaio fadiga tração-compressão: (a) rompimento no terço médio; (b) rompimento fora do terço médio



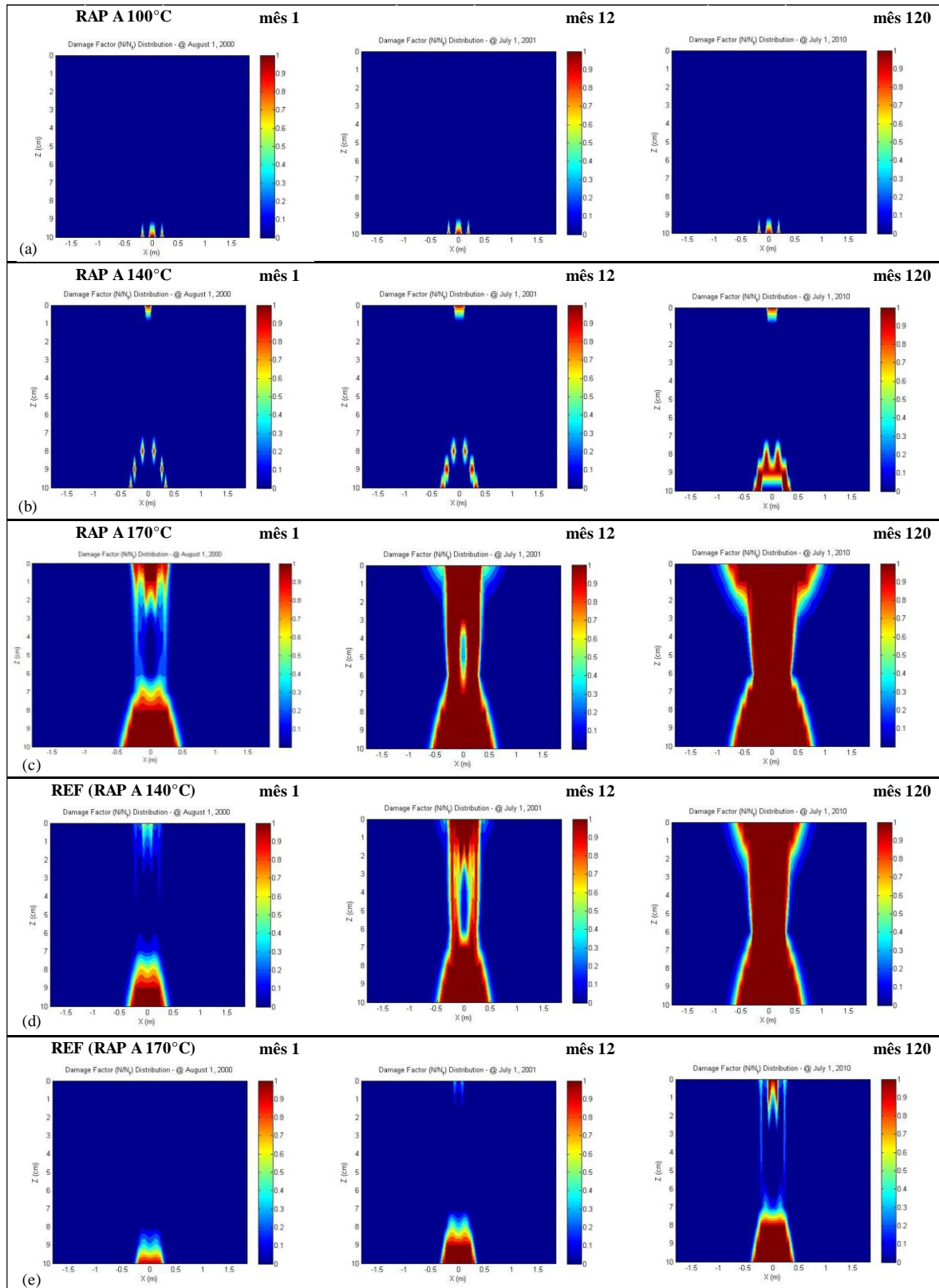
Fonte: Autor

4.3 ANÁLISE DE FADIGA POR ESTRUTURA DE PAVIMENTO SIMULADA

Para uma avaliação mais profunda da fadiga, é necessário além de conhecer as características de rigidez do material, o comportamento da danificação frente ao acúmulo de dano, e também observar a rigidez de toda estrutura do pavimento. Portanto os dados de rigidez de tempo-temperatura em ajuste polinomial (parte direita da Tabela 4), curva mestra em sigmoidal (Tabela 5); e de danificação: ajuste exponencial de integridade por dano (parte direita da Tabela 7) e critério de ruptura $Gr \times N_f$ (equações expostas na Figura 27), foram introduzidos como dados de entrada ao software *LVECD*.

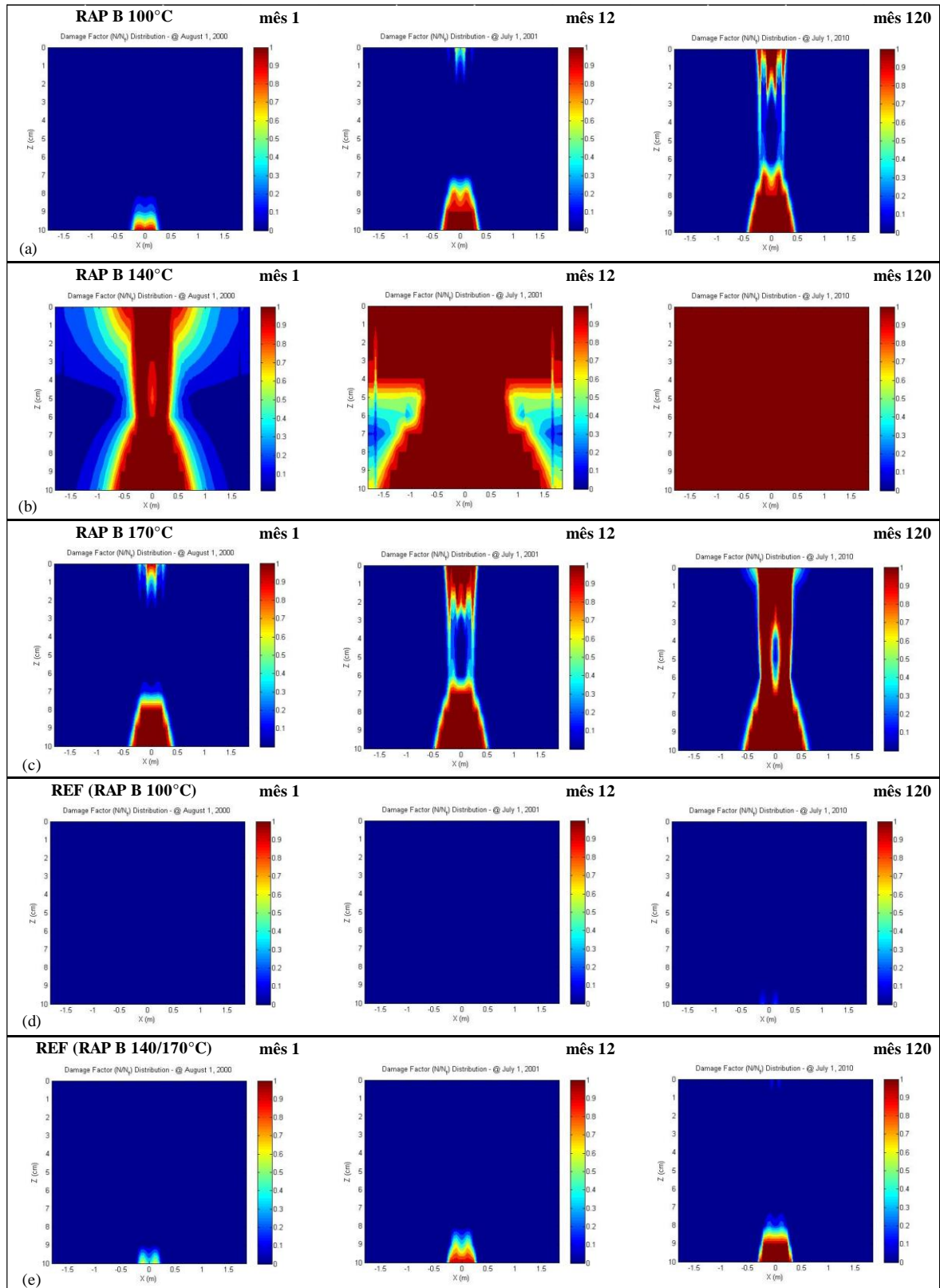
Abaixo estão representações obtidas pelo software para N/N_f na camada para um mês, doze meses e dez anos de tráfego (Figura 29 e Figura 30), e resultados de dano médio acumulado na camada ao longo do tempo (Figura 31). Vale ressaltar que foi utilizada a hipótese de Palmgren-Miner (PALMGREN, 1924 e MINER 1945), onde qualquer ciclo contribui de forma idêntica para causar o montante de dano final, limitado de 0 a 1.

Figura 29 - Representação do dano na camada ao longo dos meses para misturas RAP A: (a) N/Nf para RAP A 100°C; (b) N/Nf para RAP A 140°C; (c) N/Nf para RAP A 170°C; (d) N/Nf para REF (RAP A 140°C); (e) N/Nf para REF (RAP A 170°C)



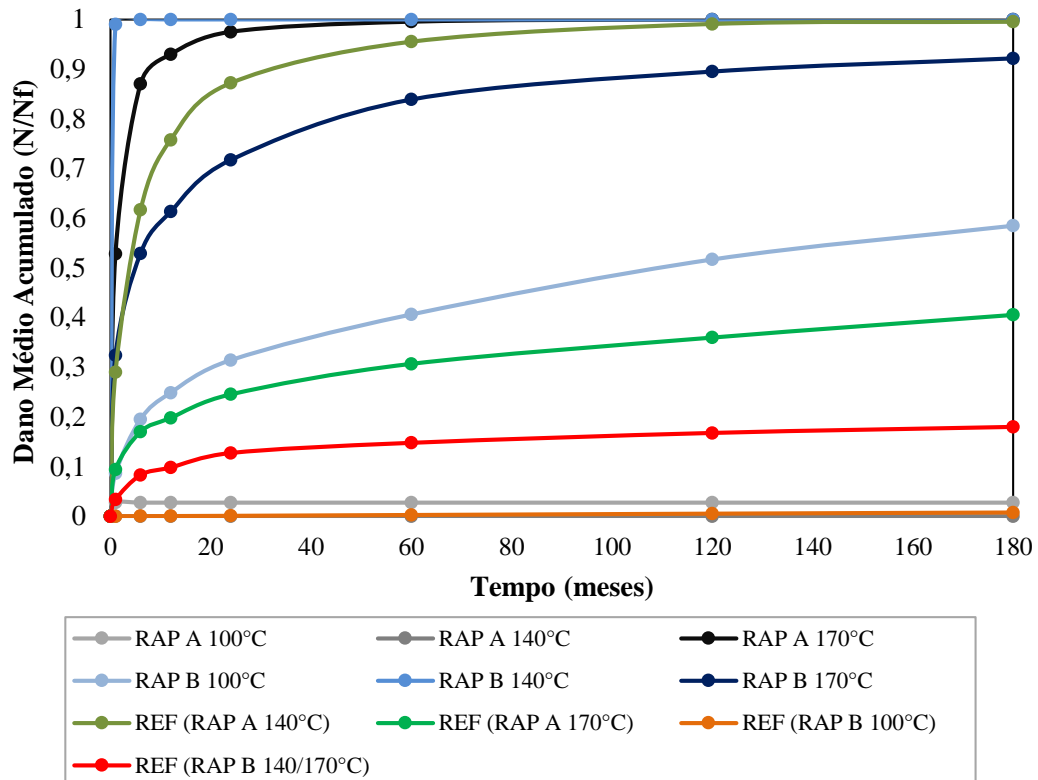
Fonte: Autor

Figura 30 - Representação do dano na camada ao longo dos meses para misturas RAP B: (a) N/Nf para RAP B 100°C; (b) N/Nf para RAP B 140°C; (c) N/Nf para RAP B 170°C; (d) N/Nf para REF (RAP B 100°C); (e) N/Nf para REF (RAP B 140/170°C)



Fonte: Autor

Figura 31 - Resultados de dano médio na camada para as misturas analisadas pelo LVECD



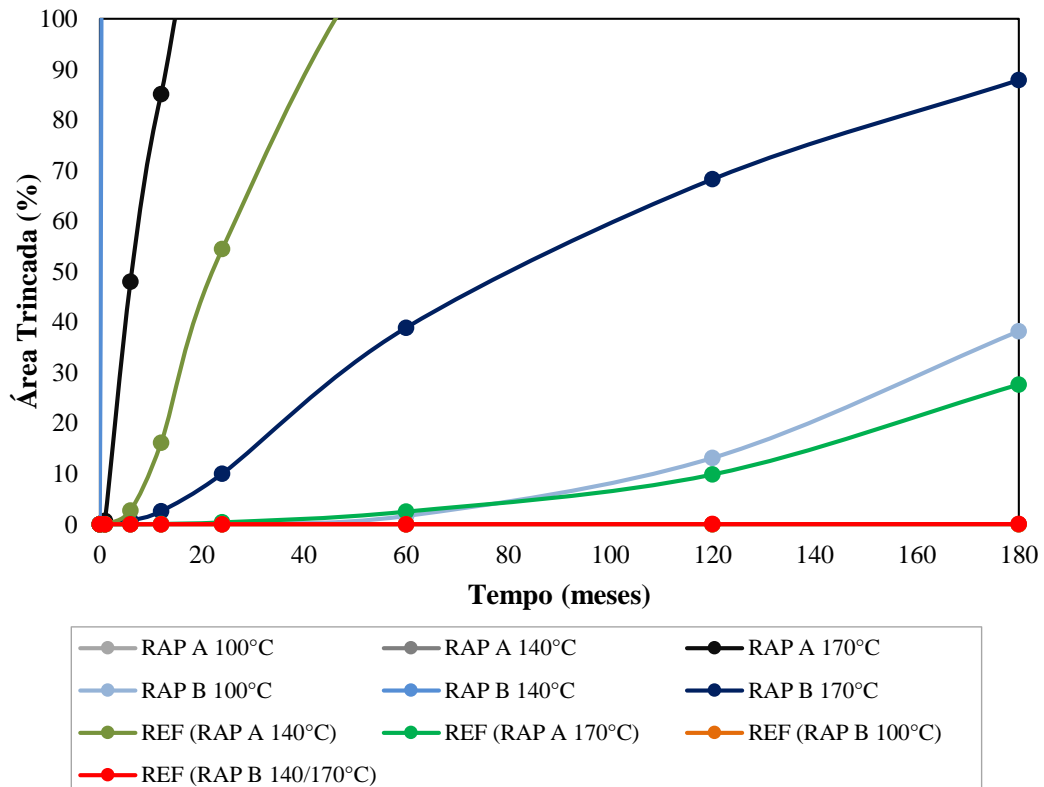
Fonte: Autor

De modo geral, as misturas REF apresentaram um resultado satisfatório a fadiga, e as RAPs o oposto, dificultando comparações entre elas. Dentre as misturas integralmente recicladas, as RAP A compactadas a 100°C e 140°C tiveram o melhor resultado para a estrutura analisada. A RAP B 100°C apresentou dano inferior as demais temperaturas, contrariando a expectativa.

Qualquer comparação direta entre elas fica dificultada, visto que as misturas RAP não possuem mesmo volume de vazios entre si, nem o volume de vazios normalizado para o ensaio de fadiga tração-compressão de $5,5 \pm 0,5\%$.

Assim, é complicado avaliar o efeito de uma possível utilização em campo destas misturas, entretanto, para critério de simulações, a análise de função de transferência para área trincada (NASCIMENTO, 2015) foi realizada (Figura 32).

Figura 32 - Resultados de área trincada para as misturas analisadas pelo LVECD



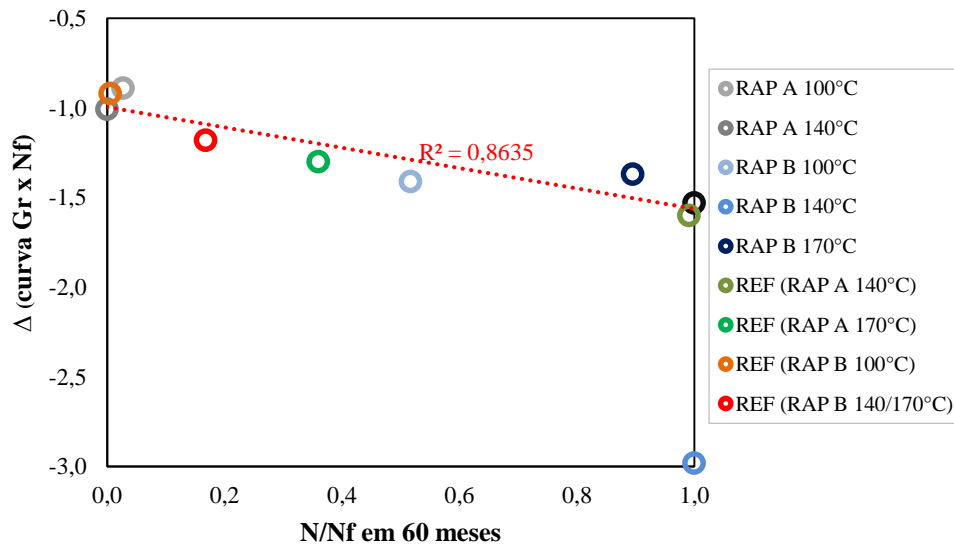
Fonte: Autor

As misturas RAP A à 100°C e 140°C, e RAP B 100°C são as únicas dentre as recicladas analisadas que resulta em bom desempenho ao longo do período de análise, corroborando com a inferência realizada anteriormente sobre os gráficos Gr x Nf sobre seus comportamentos a fadiga. Observa-se que quase todas misturas REFs, exceto REF (RAP A 140°C) não chegam a 30% de área trincada ao final do período de 15 anos, critério limite para restauração pelo manual do DNIT (DNIT, 2006), diferente da metade das misturas RAP, que atingem este nível em menos de 2 anos. A comparação entre RAPs e REFs fica dificultada visto o bom desempenho das REFs comparadas as RAPs. Ainda, é possível inferir que a estrutura analisada pode ser muito delgada para aplicação de algumas das misturas 100% RAP avaliadas nesta pesquisa.

Foi observado uma grande influência do software ao analisar as misturas pelas constantes Δ e γ , das curvas Gr x Nf (Figura 27). Para a primeira constante, é recomendado que resultem entre -1,2 e -1,8 para uma simulação, fora disto, acredita-se estar fora das condições de contorno do software (NASCIMENTO, 2016). Abaixo está apresentado a

correlação entre Δ por dano médio na camada em 120 meses pela estrutura analisada (Figura 33).

Figura 33 - Correlação entre Δ e dano médio na camada analisada em 120 meses



Fonte: Autor

Excluindo-se a mistura RAP B 140°C que obteve resultado muito inferior as demais, pode-se dizer que, quanto menor o valor de Δ , pior será o resultado frente a fadiga. A mistura de pior resultado também vai de encontro a análise, visto que o maior dano possível é de 1.

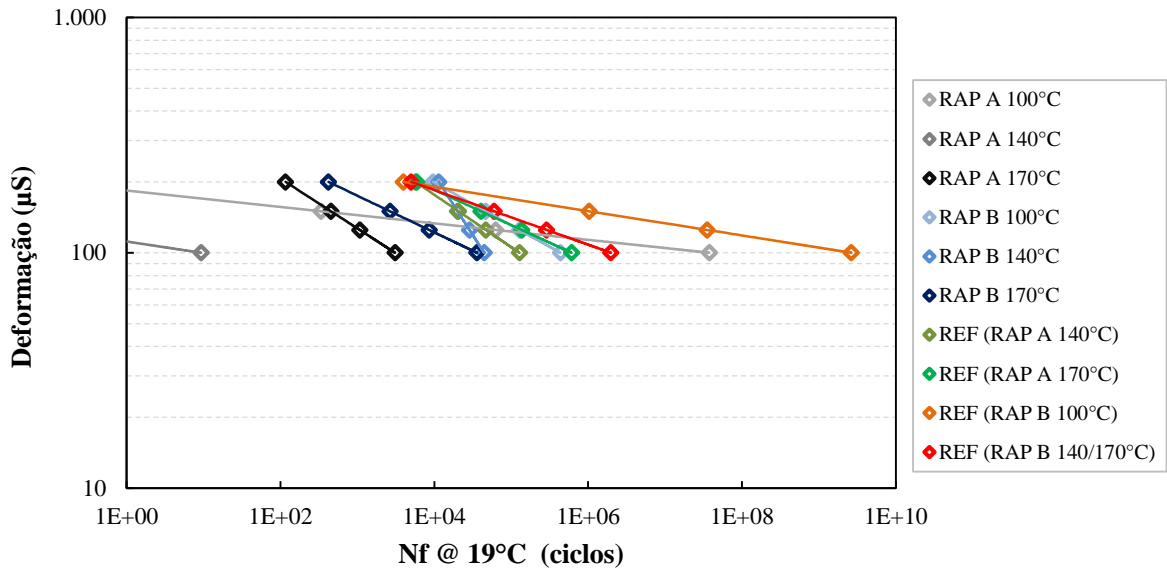
Observando a Figura 33, a correlação entre o critério de ruptura com a análise do material pelo software é elevada (R^2 de 0,86). O coeficiente Δ está relacionado com a inclinação da curva Gr x Nf, e é um parâmetro intrínseco da mistura que avalia a capacidade de suportar dano do material. Outras análises utilizando apenas a área sob a curva Gr x Nf também são observadas na literatura (NASCIMENTO, 2015, SCHUSTER 2018, BOEIRA 2018), e apresentam razoável correlação com a fadiga, até mesmo sem realizar uma análise da estrutura por completo, entretanto, se as curvas estão muito próximas umas às outras, esta análise simplificada pode não ser precisa.

4.4 ANÁLISE DE FADIGA PELO FAF

Para a avaliação da área abaixo da curva pela simulação de um ensaio perfeito, Nascimento (2015) classificou as suas misturas asfálticas utilizando um intervalo de 100 a 200 μ S, segundo o autor, mais próximo das deformações encontradas na fibra inferior do

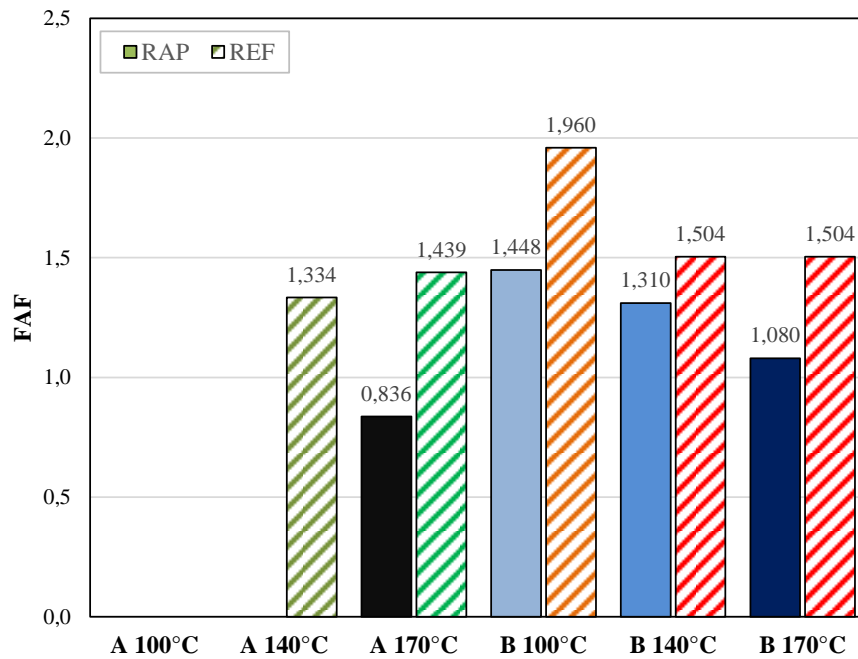
revestimento, intervalo também utilizado nesta pesquisa. Abaixo são apresentadas as curvas de fadiga pela simulação do ensaio perfeito (Figura 34) e resultados de FAF (Figura 35).

Figura 34 - Representação dos resultados de FAF para as misturas analisadas



Fonte: Autor

Figura 35 - Resultados de FAF para as misturas analisadas



Fonte: Autor

Para o RAP A, pode-se notar que parte da curva entre 100 e 200µS para as temperaturas 100°C e 140°C ficaram inferiores a 1 ciclo de ruptura, devido ao fraco resultado

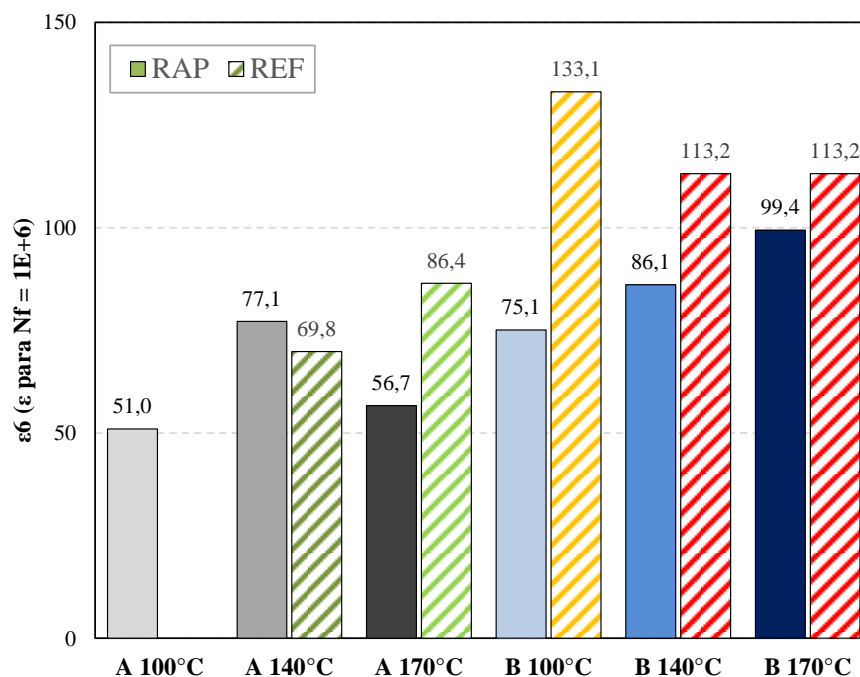
a fadiga destas misturas. Portanto, por este critério não se pôde calcular a área da figura, visto que o eixo de N_f está em escala logarítmica, e números abaixo de 1 são negativos.

A análise restringe-se, portanto, ao RAP B, onde os RAPs apresentaram resultado a fadiga decrescente a temperatura de compactação, o que não era esperado, visto que o grau de reativação é crescente com a temperatura de compactação para este material, e o volume de vazios é decrescente. Quando comparadas às suas REF correspondentes, podemos observar a o melhor resultado em percentagem para a 140°C, depois 100°C e por fim 170°C, diferente aos resultados de DoA. Os resultados entre 170°C e 140°C eram esperados que ficassem próximos entre si, o que não foi verificado, e acima do resultado de 100°C, que pode ser observado.

Nascimento (2016) avalia que a aplicação da equação de simulação do ensaio perfeito, sem interferência de fenômenos parasitas, está calibrada em experiências prévias, com um banco de dados para misturas com rigidezes ($|E^*|$) menores do que as utilizadas nesta pesquisa, inferiores a 15000 MPa para a temperatura e frequência utilizada no ensaio, e que o limite de γ entre -1,2 e -1,8 é sugerido, para uma análise mais coerente, fato já comentado anteriormente. Outro fator que pode ter inferido na validação da análise é o de as misturas não apresentarem volume de vazios $5,5 \pm 0,5\%$ normatizado, visto que todas equações foram calibradas utilizando misturas em tal volumetria. Este critério de avaliação, por não conseguir abranger um dos fresados da mistura, se mostrou ineficiente ao comparar misturas 100% RAP.

4.5 ANÁLISE DE FADIGA PELO CRITÉRIO ϵ_6

Visando um critério de avaliação por fadiga que pudesse correlacionar melhor as misturas RAP com REF, esta pesquisa buscou realizar outra análise utilizando a curva de deformação por N_f , agora utilizando os dados experimentais (Figura 25), por meio do critério ϵ_6 , utilizado por Mangiafico (2014). Abaixo estão apresentados os resultados de RAP e REF lado a lado para as misturas analisadas nesta pesquisa.

Figura 36 - Resultados de ϵ_6 para misturas analisadas

Fonte: Autor

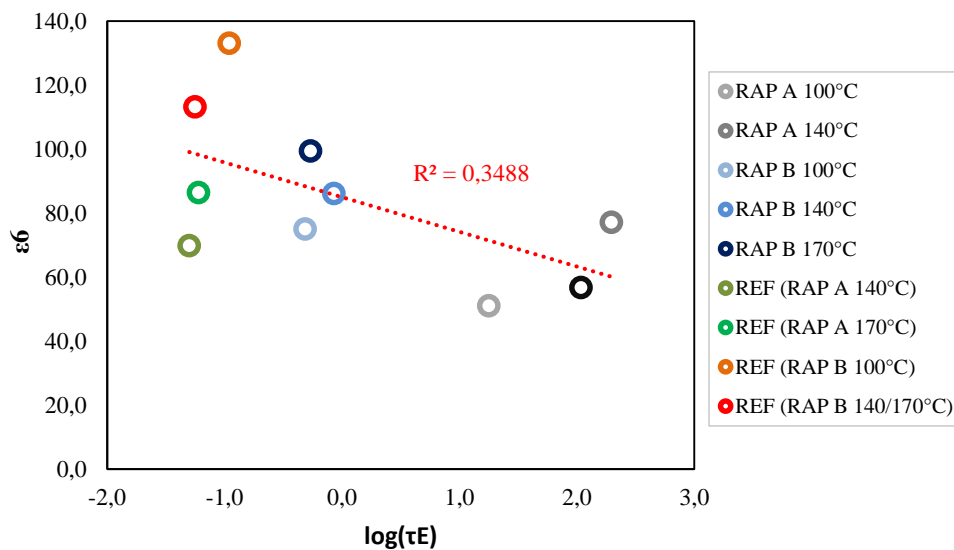
Para este critério, todas misturas analisadas puderam ser comparadas, configurando-se um critério de fadiga mais representativo para análises das misturas propostas. Os resultados se aproximaram muito dos apresentados no DoA, onde para o RAP A, as temperaturas 100°C e 170°C estão próximas, com uma leve vantagem para a segunda, e a temperatura de compactação de 140°C apresenta o melhor resultado a fadiga. Para o RAP B, o resultado de fadiga é crescente com o aumento da temperatura de compactação, resultado semelhante ao de Pinheiro (2017) para o DoA destas misturas. Como as RAPs apresentam volume de vazios distintos entre si, não é recomendada uma correlação direta entre elas, mas entre RAP e REF. Entretanto, apesar da volumetria, o desempenho do RAP B foi superior a RAP A, indicando uma melhor qualidade de fresado.

Quando comparadas às REF, o RAP B também apresenta um resultado semelhante ao DoA, onde a diferença entre RAP e REF é reduzida com o aumento da temperatura de compactação. Para o RAP A, a mistura a 140°C superou inclusive a mistura REF correspondente, indicando mais uma vez o melhor potencial desta temperatura para a reativação deste material fresado. Como a mistura RAP A 100°C não possui mistura REF correspondente, a comparação com a RAP A 170°C não pode ser feita.

4.6 CORRELAÇÕES DE RESULTADOS DE RIGIDEZ, DE FADIGA, VOLUMETRIA COM GRAU DE ATIVAÇÃO

Primeiro, é apresentado a correlação entre pico de ângulo de fase, e resultado de fadiga de ε_6 (Figura 37). A constante τ_E representa bem a posição do pico do ângulo de fase do material, de forma que será utilizada como o critério para avaliação deste.

Figura 37 - Relação fadiga por ε_6 por τ_E

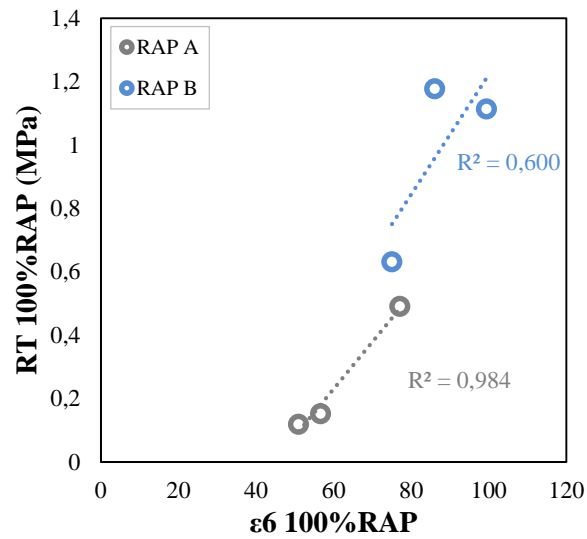


Fonte: Autor

Schuster (2018) apresentava boas correlações entre estes dois parâmetros, que não foram encontradas nesta pesquisa. Schuster (2018) utilizou misturas com volumes de vazios normalizados em $5,5 \pm 0,5\%$, e critérios para avaliação a fadiga envolvendo simulação de estruturas e áreas abaixo da curva de FAF, diferentemente desta pesquisa.

A seguir, são apresentadas correlações com os dados de outras pesquisas para estas misturas RAP e os resultados deste trabalho. A Figura 38 relaciona os dados de RT (TEIXEIRA, 2017) e fadiga apresentados nesta pesquisa.

Figura 38 - Relação entre resistência a tração (RT) por dados de fadiga ϵ_6

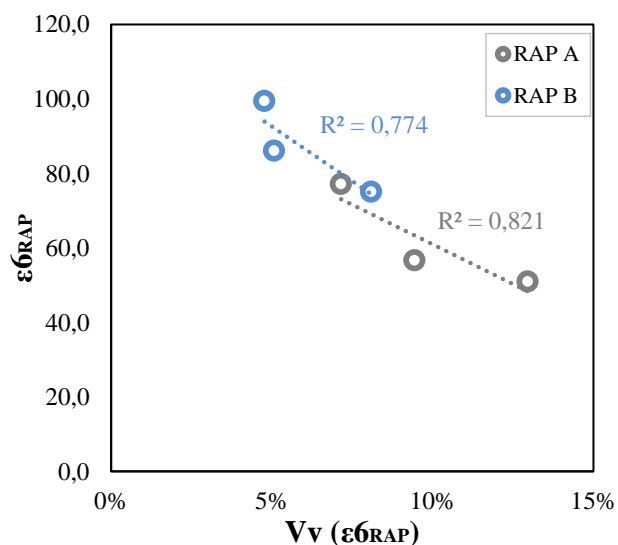


Fonte: Autor

O gráfico apresenta uma boa correlação de fadiga para os dados de RT. Para os dados do RAP A, como visto anteriormente em outras correlações, as temperaturas de 100°C e 170°C apresentam resultado semelhante, e a temperatura de 140°C de melhor resultado. Os dados de RAP B não apresentaram um coeficiente tão alto, pois a temperatura de 140°C foi a que apresentou melhor resultado de RT, diferente da fadiga pelo critério ϵ_6 .

Foi observado influência do volume de vazios nos resultados de fadiga, como apresentado na relação volume de vazios das misturas para resultado de fadiga ϵ_6 (Figura 39).

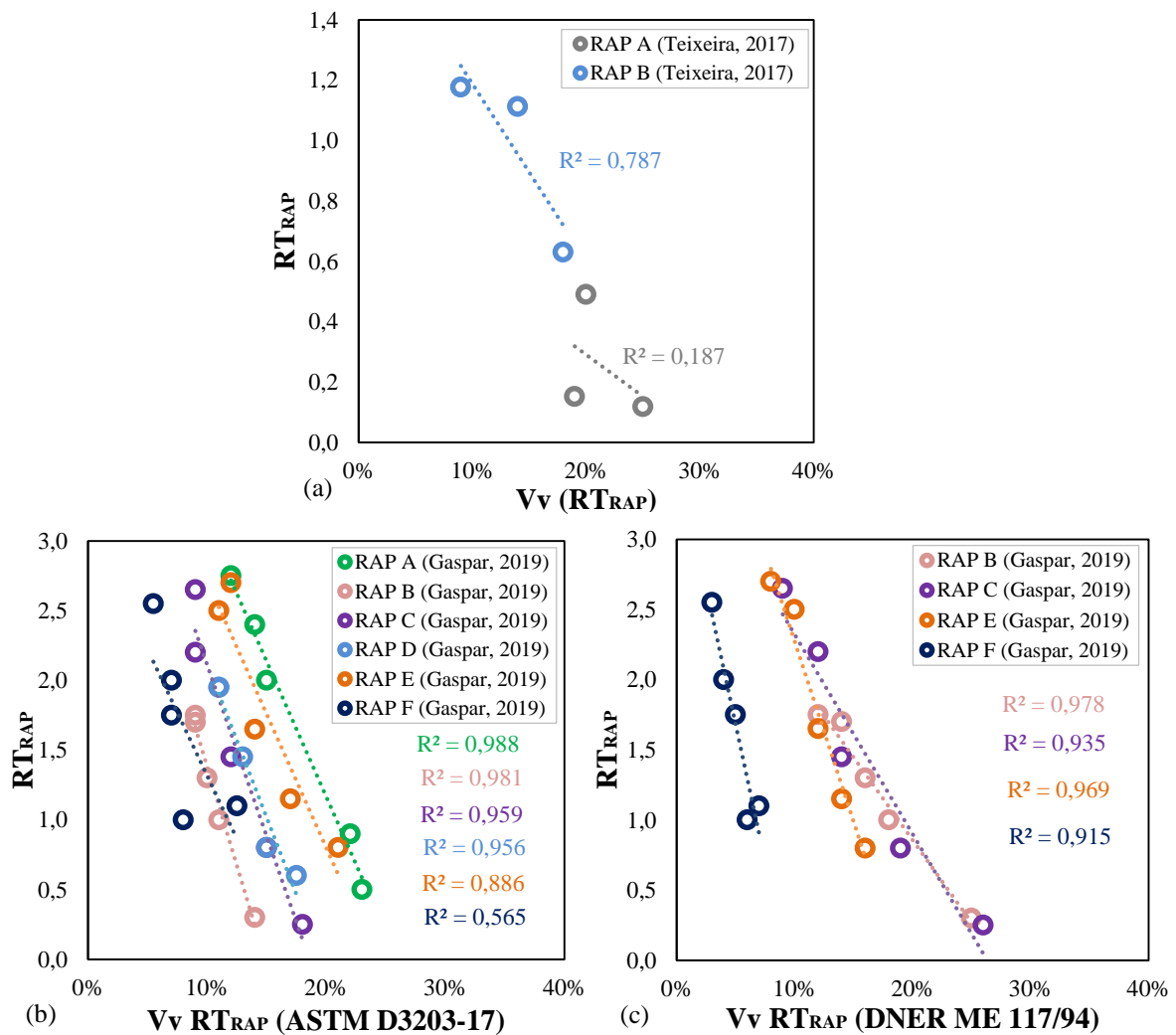
Figura 39 - Relação de fadiga ϵ_6 por volume de vazios



Fonte: Autor

Isto mostra a relevância da utilização de misturas REF com mesmo volume de vazios das RAP para poder realizar uma comparação mais segura entre as temperaturas de compactação, sem a representatividade da variável volumetria. Também demonstra que a compactabilidade das misturas RAP influência de forma relevante no resultado de fadiga. Esta dependência da variável volume de vazios também é encontrado nos resultados de RT para estas misturas (Teixeira, 2017), bem como no estudo de Gaspar (2019), que avaliou seis diferentes tipos de RAPs, em cinco temperaturas de compactação (Figura 40).

Figura 40 - Relação entre resistência à tração por compressão diametral em misturas 100% RAP: (a) RT por Vv de Teixeira (2017); (b) RT por Vv pela ASTM D3203-17 de Gaspar (2019); (c) RT por Vv pela DNER ME 117/94 de Gaspar (2019)

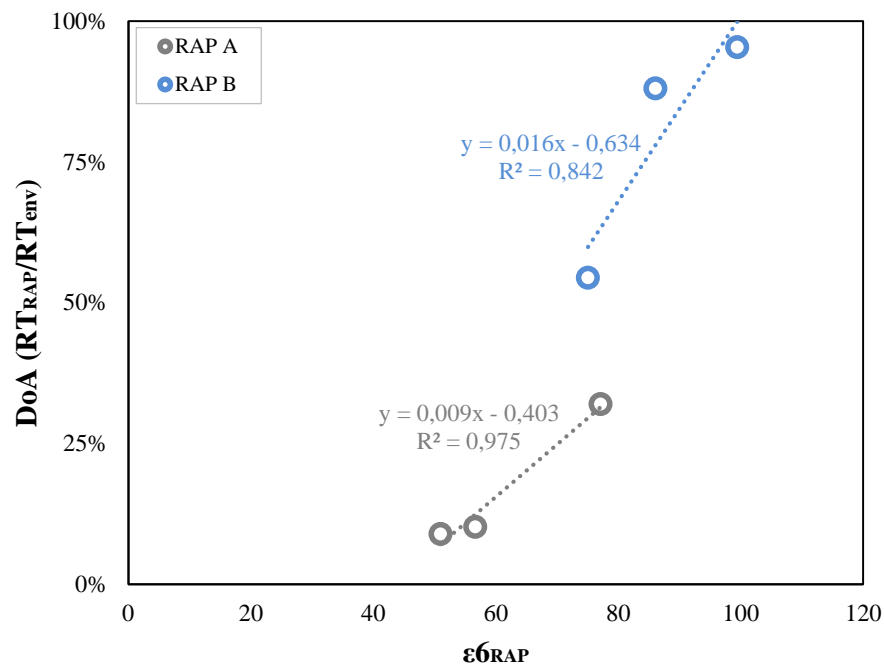


Fonte: Adaptado de Teixeira (2017) e Gaspar (2019)

Como se observa nos gráficos acima, os resultados de RT, que são utilizados para análise de DoA, são dependentes da capacidade de compactação que o RAP tem a determinadas temperaturas.

Buscando normalizar esta variação, Pires (2018) propôs uma razão entre RT do RAP e RT envelhecido em laboratório, verificada por Pinheiro (2017), já comentado anteriormente, para interpretação do grau de reativação do material fresado (DoA). A seguir apresenta-se a relação entre resultados de fadiga por ϵ_6 e DoA realizados por Pinheiro (2017) (Figura 41).

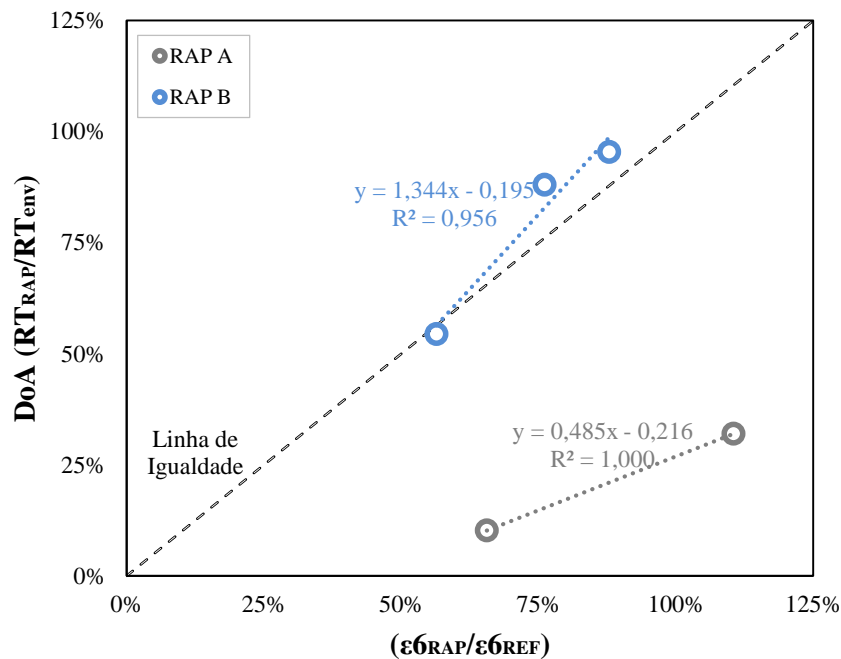
Figura 41 - Relação entre DoA por fadiga ϵ_6



Fonte: Autor

O gráfico apresenta correlações altas entre os dados (R^2 de 0,842 para o RAP A e 0,975 para o RAP B), corroborando com a ideia de que o DoA, além de apresentar a melhor correlação entre temperatura de compactação e grau de reativação da mistura, também indica o melhor comportamento a fadiga nos fresados analisados.

Buscando uma normalização dos dados de fadiga frente aos de DoA, propôs-se uma razão entre ϵ_6 do RAP e ϵ_6 do REF correspondente (Figura 42).

Figura 42 - Relação entre DoA por $\epsilon_{6R\text{AP}}/\epsilon_{6R\text{EF}}$ 

Fonte: Autor

Como para o RAP A, a mistura de compactação 100°C não possui REF correspondente, seus dados não estão apresentados. Para o RAP A, o ϵ_6 do RAP na temperatura de 140°C excedeu o da REF correspondente, ultrapassando o 1 da correlação, indicando mais uma vez ser esta a melhor temperatura para reativação. A temperatura de 170°C ficou abaixo na relação entre ϵ_6 , e era esperado que a temperatura de 100°C ficasse próxima desta. O DoA (PINHEIRO, 2017) apresentou baixa reativação entre as temperaturas de 140°C e 170°C, de 31,99% e 10,17% respectivamente, resultado diferente para a relação de fadiga $\epsilon_{6R\text{AP}}$ por $\epsilon_{6R\text{EF}}$ apresentada no gráfico acima, de 110,47% e 65,55% respectivamente, o que coloca os dados longe da linha de igualdade.

Para o RAP B, onde os dados de DoA apresentaram resultado elevado, a relação entre ϵ_6 ficou elevada da mesma forma. Para as temperaturas em ordem crescente, a relação entre ϵ_6 resultou em 56,40%, 76,09% e 87,87%, próximo aos resultados de DoA, de 54,44%, 88,21% e 95,79% respectivamente, demonstrando proximidade dos dados a linha de igualdade.

Portanto, para materiais fresados de melhor qualidade, ou seja, menor grau de envelhecimento, esta análise pôde ser validada, indicando que o DoA se relaciona bem com o desempenho a fadiga.

5 CONCLUSÕES

O melhor entendimento das características intrínsecas ao material de resíduo resultante fresagem é de suma importância para desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias que garantam o bom desempenho de misturas recicladas. Este trabalho buscou relacionar dados de volumetria, rigidez e fadiga aos de ativação de ligante envelhecido de dois materiais fresados, realizando ensaios de caracterização mecânica, análises computacionais e correlações de dados entre misturas puramente recicladas e de referência.

A influência da volumetria nos resultados de RT e fadiga entre as misturas recicladas verificou a necessidade de misturas de referência, de mesmo volume de vazios, para se realizar uma comparação mais segura entre as temperaturas de compactação.

Quanto a caracterização viscoelástica, em uma análise mais profunda sobre as constantes do modelo 2S2P1D, pôde-se observar que as características de reativação foram capturadas pela modelagem. Para o RAP A, as constantes relacionadas ao ligante, k e h , apresentaram tendência a se aproximar das REFs quanto melhor o DoA, mesmo com ativação baixa. Analisando as constantes referentes ao agregado e volumetria, $E00$ e $E0$, os RAPs que obtiveram dados mais próximos as REFs criaram a tendência de menor influência da parcela *black rock* no material, indicativo também de grau de reativação. Estas últimas são as que melhor representam o grau de ativação no modelo 2S2P1D, visto as diferenças na volumetria. Pela simples análise do ângulo de fase, também se pôde inferir sobre este grau.

Quando observado a posição do pico de ângulo de fase frente ao resultado por fadiga, não se obtiveram boas correlações nesta pesquisa, possivelmente devido à diferença na volumetria dos corpos de prova e critérios de fadiga utilizados.

Quanto a fadiga, os critérios de FAF e previsão de desempenho por área trincada não se mostrou eficiente para esta pesquisa, visto a discrepância em relação aos dados de REF aos RAPs. O critério ϵ_6 , por sua simplicidade, funcionou bem ao relacionar misturas RAPs a REFs, sendo adotado nesta pesquisa como principal indicativo de desempenho a fadiga.

Em relação ao primeiro critério, as áreas sob as curvas simuladas de alguns RAPs nem puderam ser calculadas devido ao mal desempenho, inferior a 1 ciclo, das misturas RAP A 100°C e 140°C para algumas deformações analisadas. Vale ressaltar que os critérios que utilizam a base da teoria *S-VECD* são calibrados em misturas com volumetria normatizada e níveis de rigidez inferiores aos apresentados pela maioria das misturas desta pesquisa.

Entretanto, mesmo algumas misturas RAP apresentando um resultado péssimo à fadiga na simulação de pavimento, a estrutura analisada aprovou o uso da mistura RAP A 100°C, RAP A 140°C e RAP B 100°C, esta última analisada com 12,8% de volume de vazios, contrariando as expectativas.

Correlacionando os resultados de dano médio na camada para a estrutura analisada por constante Δ das curvas Gr x Nf, foi observado uma tendência linear para as misturas que não atingiram 1 de dano ao final do período de análise. A correlação de $R^2=0,86$ avalia que, para as misturas analisadas neste trabalho, quanto menor o Δ , pior o resultado de fadiga.

O critério de ϵ_6 se mostrou ser um critério que relaciona bem o RT de misturas RAPs, visto que a diferença de volumes de vazios nas diferentes temperaturas de compactação é a principal variável que descreve o resultado.

Buscando normalizar estas variações de volumetria, o DoA foi correlacionado com o ϵ_6 . Fazendo esta comparação diretamente, apresentou alta correlação linear, de R^2 de 0,975 e 0,842 para os RAPs A e B respectivamente. Isto indica que o DoA pode ser um ótimo parâmetro para inferir desempenho a fadiga de misturas 100% RAP, reduzindo custos com ensaios mais elaborados. Ainda, fazendo a relação ϵ_6 do RAP por ϵ_6 do REF, e correlacionando com o DoA (RT do RAP por RT envelhecido), visualizou-se a quase igualdade de resultados para o RAP B, visto a boa qualidade do fresado. Já para o RAP A, a correlação ficou aquém do esperado, visto o baixo grau de reativação do material. Isto indica que o DoA é um parâmetro influente na avaliação do desempenho de misturas recicladas e deve ser considerado quando avaliadas misturas com alto teores de reciclagem.

Diante das análises realizadas ao longo da presente pesquisa, sugere-se como estudos futuros:

- a) Fixar o volume de vazios das misturas 100% RAPs, para uma comparação direta entre elas;
- b) Validação e aperfeiçoamento da metodologia de avaliação de DoA proposta por Pires (2018) e no trabalho de Pinheiro (2017);
- c) Utilização de mais fontes de fresado, de diferentes ligantes componentes;
- d) Análises de cross-scale entre resultados reológicas de ligantes extraídos e misturas a diferentes temperaturas para avaliação do grau de ativação;

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320-17**. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D. C. 2017.

_____. **AASHTO T 342-11**. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. Washington, D. C., 2011.

_____. **AASHTO R 84-17**. Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, D. C., 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **ANP. Dados Estatísticos**. Acessado em <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>, dia 25/06/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **ANP. Preços de Distribuição de Produtos Asfálticos**. Acessado em <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao>>, dia 29/06/2019.

ALMEIDA Jr, P. O. B. de. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. 2016. 217p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

ALMEIDA Jr, P. O. B. de, BOEIRA, F. D., SPECHT, L. P., CERVO, T. C., PEREIRA, D. da S., CENTOFANTE, R., BARBOZA Jr, V., & SILVA, C. C. **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Revista Transportes. Vol. 26, 2017.

AL-QADI, I.L., AURANGZEB, Q., CARPENTENTER, S. H., PINE, W. J., TREPAINER, J. **Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures**. Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois Department of Transportation, Bureau of Material and physical Research, Springfield, IL, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1856:2009** – Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method. 2009.

_____. **ASTM D 2172:2001** – Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. 2001.

_____. **ASTM D 6307:2015** – Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method. West Conshohocken, Pensilvânia. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11341:2014**. Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 15184**. Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 15619**. Misturas asfálticas – Determinação da massa específica medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro. 2008.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage.** M.Sc. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2014.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2006.

BALBO, T. J. **Pavimentação Asfáltica. Materiais, projeto e restauração.** 1º Ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BOHN, K. A. **Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.** 2017. 254p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2017.

BOMFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos.** 3ª ed. São Paulo, 2010

BORDIN, D. T. **Avaliação da deformabilidade e resistência de misturas 100% RAP com ligante convencional e modificado por polímero.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2017.

CARDONA, D. A. R.; POUGET, S.; DI BENEDETTO, H.; OLARD, F. **Viscoelastic behavior characterization of a Gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen.** Materials Research, Vol. 18 (2), p. 373-381, 2015.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice.** Report No. FHWA-HRT-11-021, Federal Highway Administration, McLean, Virginia. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 053/94.** Misturas Betuminosas – Percentagem de Betume. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

_____. **DNER-ME 083/98.** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT-IPR 720/2006.** Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT-ME 130/2010.** Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT-ME 131/2010.** Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT-ME 136/2010:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT-ME 155/2010.** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures.** Materials and Structures, v. 37, p. 202-216, 2004.

DI BENEDETTO, H., OLARD, F. SAUZÉAT, C., & DELAPORTE, B. **Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: From binders to mixes.** Road Materials and Pavement Design, 12, 129-158. DOI: 10.1080/14680629.2011.9690356. 2004.

DI BENEDETTO, H., CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers.** Tome 2. 2005. 283p.

DING, Y.; HUANG, B.; SHU, X. **Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP.** Construction and Building Materials, v. 126, p. 172–178, 2016.

ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. **Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis.** In: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, pp. 497-506, 2012.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers.** John Wiley, Nova York, 1980.

GONÇALVES, B. C. S. **Avaliação dos procedimentos para determinação de teor de ligante e granulometria em concretos asfálticos de diferentes faixas granulométricas e origens mineralógicas.** 200p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2017.

GASPAR, M. S. **Mecanismos de interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna.** Dissertação de mestrado. Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 2015. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue.** Tese, University of Wisconsin – Madison, Madison, WI, 2012.

HOU, T., “**Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model.**” Ms.C. thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.

HUANG, B., EGAN, B.K., KINGERY, W.R., ZHANG, Z., AND ZUO, G. **Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing RAP.** Journal of the Transportation Research Board, TRB Annual Meeting (CD ROM). 2004.

HUANG, Y.H., “**Pavement Analysis and Design.**” 2nd edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor.** Acessado em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9260-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo-15.html?=&t=o-que-e>> dia 29/06/2019.

IPC GLOBAL. **Universal Testing Software UTS Test No 006 SPT Dynamic Modulus.** Version 2.21, 2011.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N. **One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete.** In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772, 1990.

KIM, Y. R., D. N. LITTLE, AND R. L. LYTTON. **Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures.** ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15 (1), 75-83, 2003.

- KIM, Y. R. **“Modeling of Asphalt Concrete”**. ASCE Press, Vol. 1, pp. 163-200. 2009.
- LO PRESTI, D., CARRIÓN, A. J., DEL B. AIREY, G., HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 43–51, set. 2016
- LO PRESTI, D., VASCONCELOS, K., ORESKOVIC, M. PIRES, G. M., BRESSI, S. **On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agentes**. Road and Materials and Pavement Design, 2019.
- LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2019.
- MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. Tese de Doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-ex-Velin. 2014.
- MINER, M. A. **Cumulative damage in fatigue**. Journal of Applied Mechanics, 67, 159-164, 1945.
- NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. Tese de Doutorado, North Carolina State University. 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga**. Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.
- NOROUZI, A., KIM, D., KIM, Y. R., **Numerical evaluation of pavement design parameters for the fatigue cracking and rutting performance of asphalt pavements**. Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-015-0744-x. 2015.
- OLARD, F., DI BENEDETTO, H., DONY, A., VANISCOTE, J. C. **Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics**. Materials and structure, Vol 38. p 121-126. 2005.
- OLARD, F., DI BENEDETTO, H. **General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes**. Road Materials and Pavement Design, 4:2, 185-224, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946. 2003.
- PALMGREN, A. **Die Lebensdauer von Kugellagem**. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 68, 339-341, 1924.
- PINHEIRO, H.L. **Estudo da reativação de ligantes em misturas asfálticas visando o uso de 100%RAP**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2017.
- PIRES, G. M. **A New Methodology for the Measurement of the Reclaimed Asphalt Degree of Binder Activation**. Tese de Doutorado. Faculty of Engineering – Department of civil Engineering, Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham. 2018.
- REESE, R., **“Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life”**, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, vol. 66, pp. 604- 632, 1997.

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.

SCHAPERLY, R. A. **On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials.** Polymer Engineering and Science, v. 9, 1969.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2018.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** Dissertação de mestrado. Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

TEIXEIRA, C. C. **Utilização do ITS test para análise de misturas asfálticas com 100% de RAP.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., E GUDDATI, M. N. **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model.** International Journal of Pavement Engineering, 11(6), 459–476. 2010.

VENDRUSCULO, J. I., VESTENA, P. M., DE OLIVEIRA, A. A., ALMEIDA Jr, P. O. B., SCHUSTER, S. L., SPECHT, L. P. **Comparação de rigidez de misturas asfálticas utilizando módulo resiliência e módulo dinâmico.** X Seminário de Engenharia Geotecnia do Rio Grande do Sul, GeoRS. Santa Maria. 2019.

WILLIAMS, M. L., LANDEL, R. F., FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids.** Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701-3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>, 1955.

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

WILLIAMS, B. A., COPELAND A., & ROSS, T. C. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage.** 8th Annual Survey (IS 138). National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland. DOI: 10.13140/RD.2.2.30240.69129. 2017.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B. **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** International Journal of Pavement Engineering, V. 16, 2015.

ZHANG, J. **Development of a Failure Criteria for Asphalt Concrete Mixtures under Fatigue Loading.** Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A – Volume de vazios dos corpos de prova ensaiados

Mistura	CP #	Vv (%)	Ensaio MD	Ensaio FadTC	Vv médio FadTC (%)	DP
RAP A 100°C	7	13,21	X*	X	12,96	0,31
	8	12,46	X*			
	9	13,06		X		
	10	12,62		X		
RAP A 140°C	19	6,11	X*	X	7,15	0,35
	20	6,90	X*	X		
	22	7,40		X		
RAP A 170°C	31	8,19	X*		9,44	0,20
	32	9,25	X*	X		
	34	9,64		X		
	35	9,43		X		
RAP B 100°C	1	8,13	X*	X	8,09	0,22
	2	7,77	X*	X		
	3	8,15		X		
	4	8,29		X		
RAP B 140°C	13	5,28	X*	X	5,07	0,30
	14	4,93	X*			
	15	4,85		X		
RAP B 170°C	25	4,62	X*	X	4,77	0,21
	26	7,30	X*			
	27	4,91		X		
	28	4,57		X		
	29	4,98		X		
REF (RAP A 140°C)	48	6,82	X		6,77	0,13
	49	6,66	X	X		
	50	6,96		X		
	58	6,74		X		
	59	6,72		X		
REF (RAP A 170°C)	52	9,32	X	X	9,13	0,15
	53	9,17	X	X		
	54	9,04		X		
	55	8,99		X		
REF (RAP B 100°C)	42	8,59	X	X	8,33	0,31
	43	7,98	X	X		
	45	8,42		X		
REF (RAP B 140/170°C)	38	4,78	X	X	4,75	0,25
	39	4,64	X	X		
	40	5,07		X		
	41	4,49		X		

* Ensaio realizado na pesquisa de Bordin (2017)

Apêndice B – Fatores de translação tempo-temperatura

Mistura	Shift aT					
	-10°C	4°C	21°C	37°C	54°C	60°C
RAP A 100°C	2,00E+04	3,55E+02	1,00E+00	8,91E-03		3,16E-05
RAP A 140°C	2,24E+05	6,31E+02	1,00E+00	6,00E-03		1,00E-05
RAP A 170°C	5,62E+04	2,82E+02	1,00E+00	1,78E-03		2,00E-05
RAP B 100°C	6,31E+04	5,62E+02	1,00E+00	1,16E-02	2,00E-04	
RAP B 140°C	1,41E+05	5,62E+02	1,00E+00	6,46E-03	1,50E-04	
RAP B 170°C	6,31E+04	2,88E+02	1,00E+00	6,00E-03	1,12E-04	
REF (RAP A 140°C)	3,98E+05	1,12E+03	1,00E+00	7,94E-03	1,58E-04	
REF (RAP A 170°C)	7,08E+05	6,31E+02	1,00E+00	5,62E-03	7,94E-05	
REF (RAP B 140/170°C)	2,51E+05	1,00E+03	1,00E+00	4,47E-03	8,91E-05	
REF (RAP B 100°C)	8,91E+05	7,94E+02	1,00E+00	4,47E-03	8,91E-05	

Apêndice C – Ajustes C x S de cada amostra para as misturas

Figura 43 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 100°C

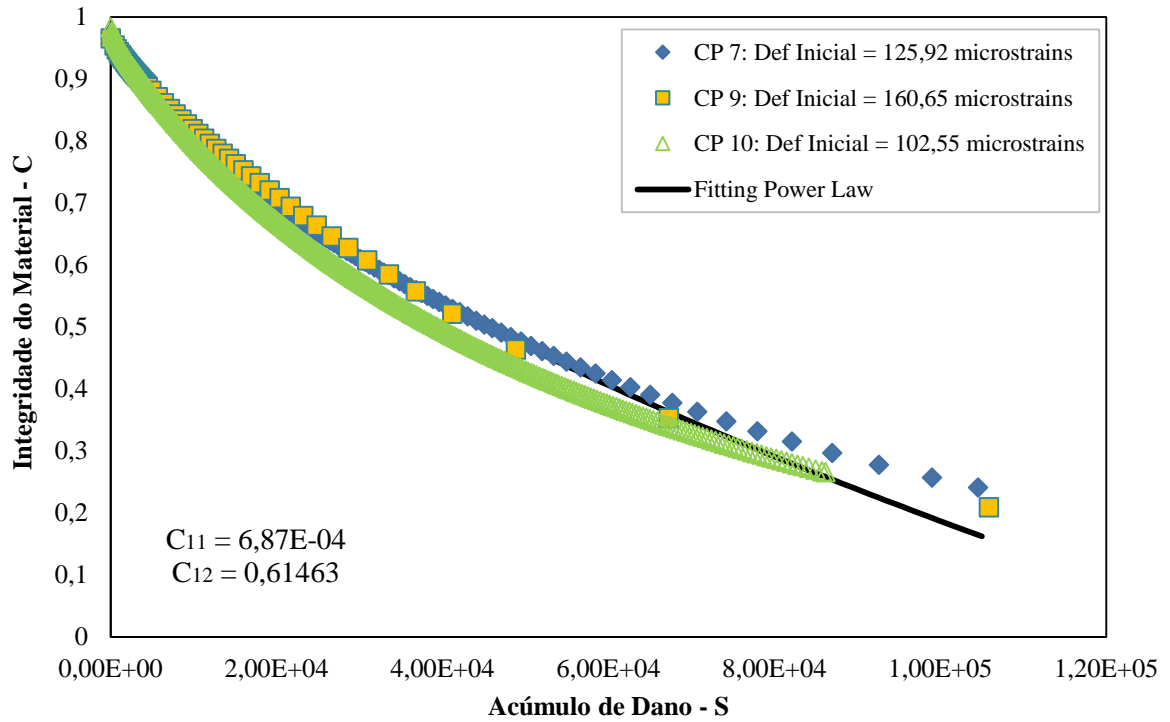


Figura 44 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 140°C

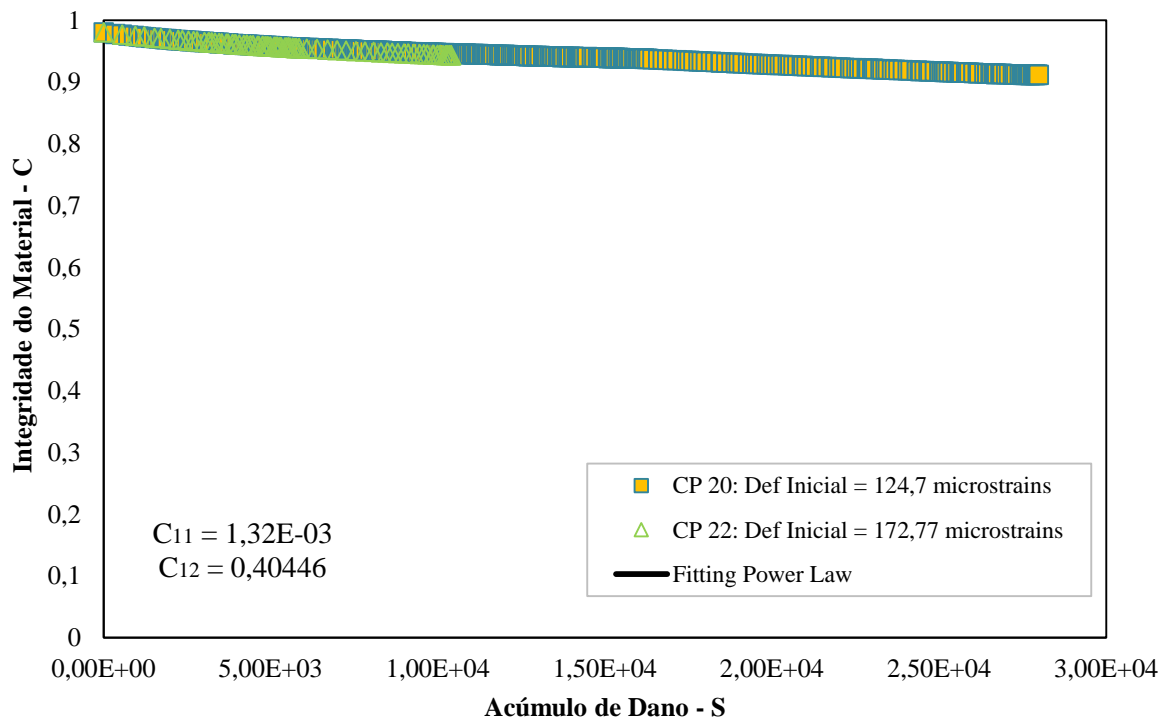


Figura 45 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP A 170°C

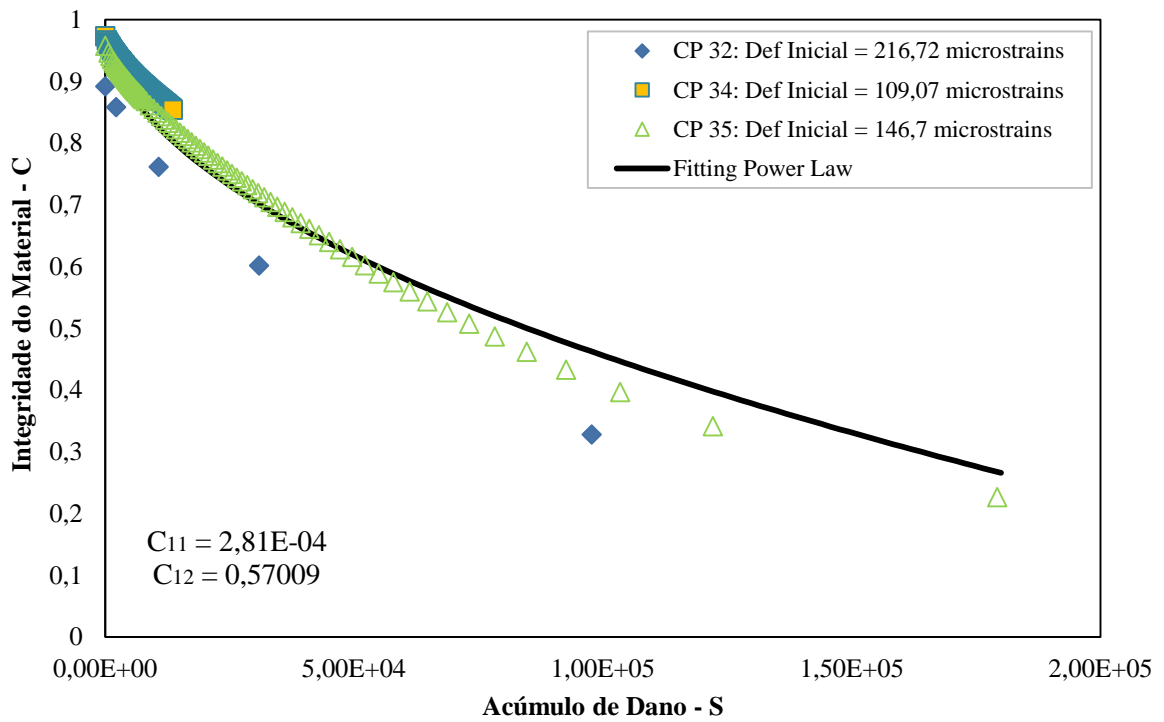


Figura 46 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 100°C

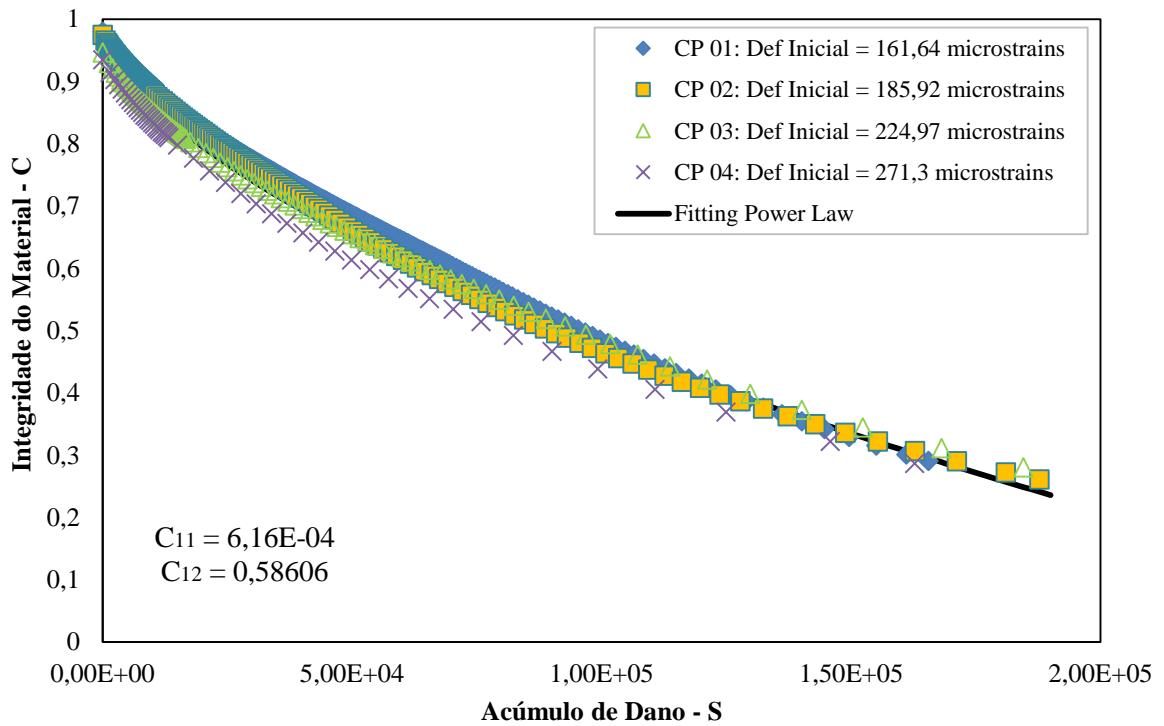


Figura 47 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 140°C

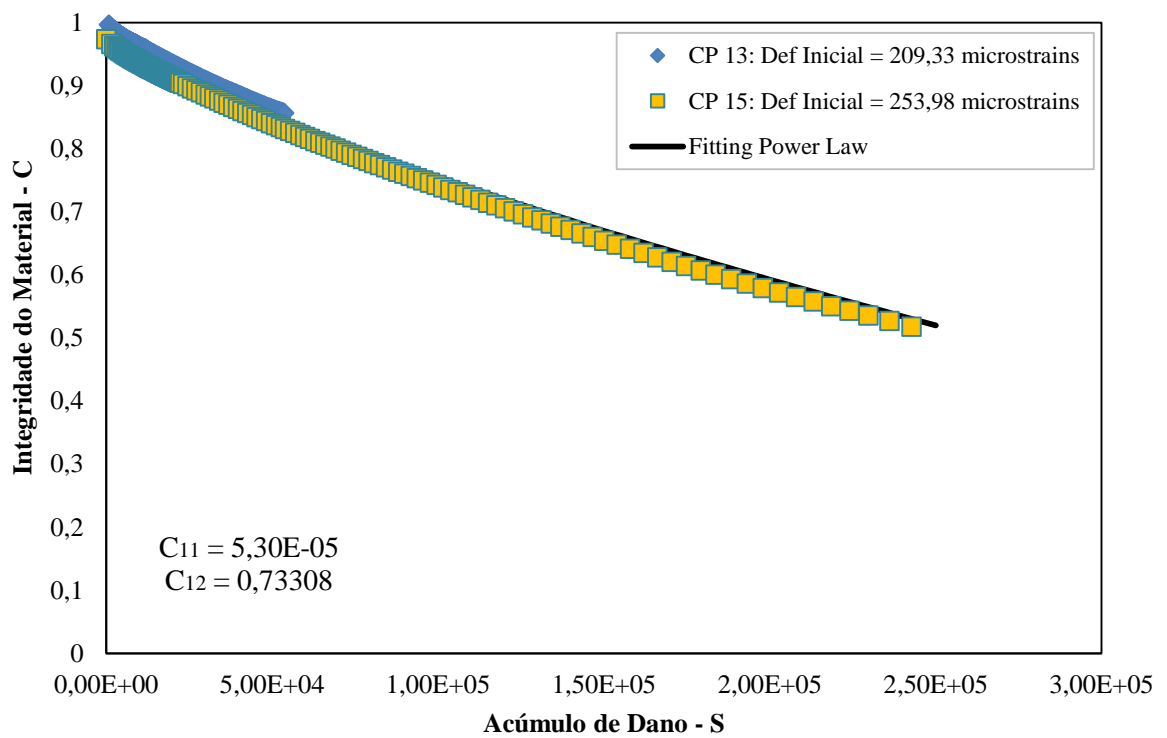


Figura 48 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura RAP B 170°C

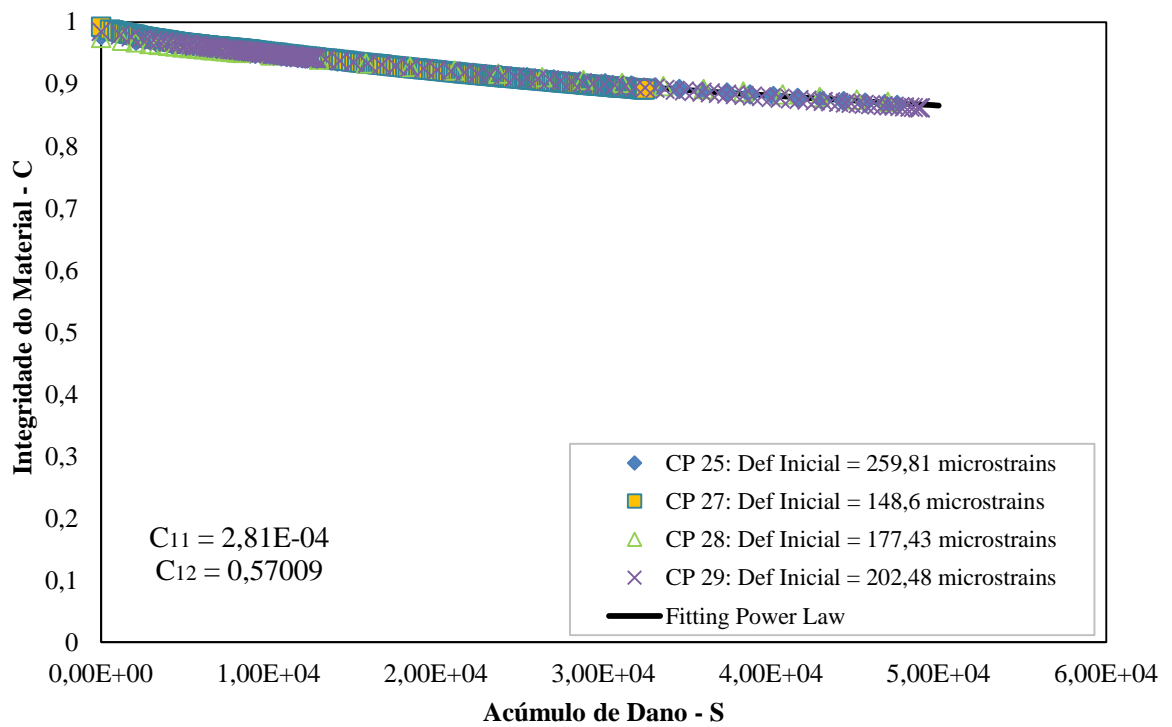


Figura 49 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP A 140°C)

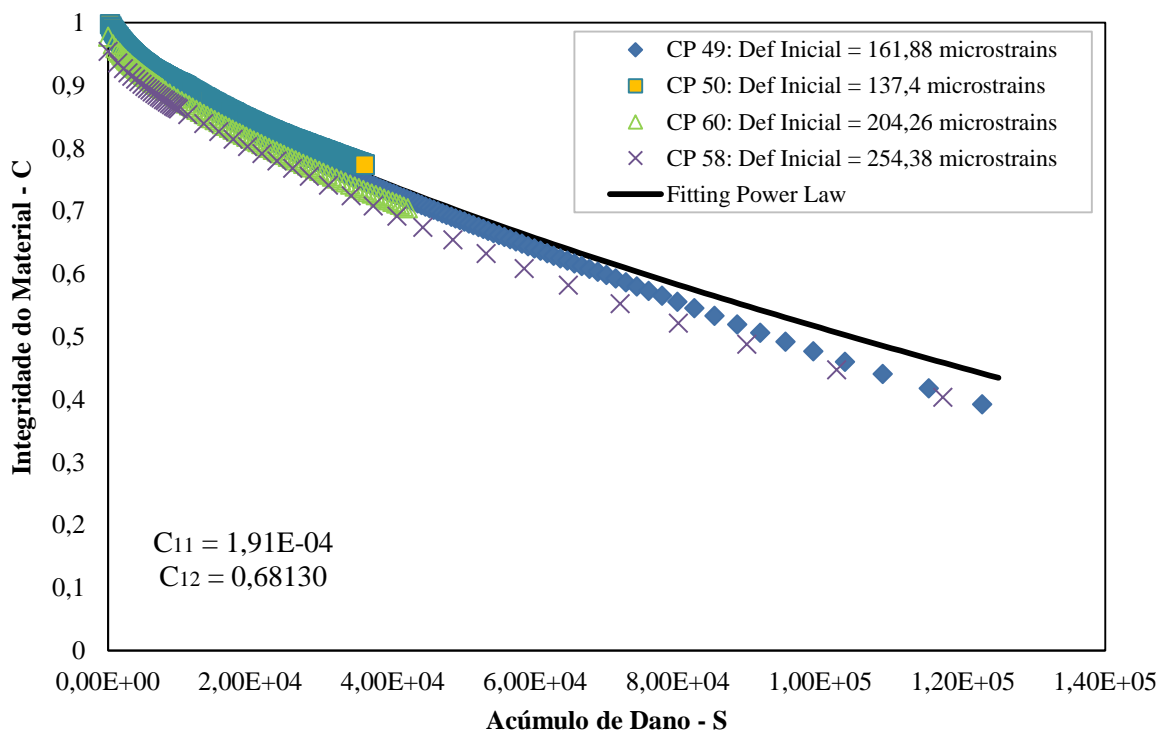


Figura 50 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP A 170°C)

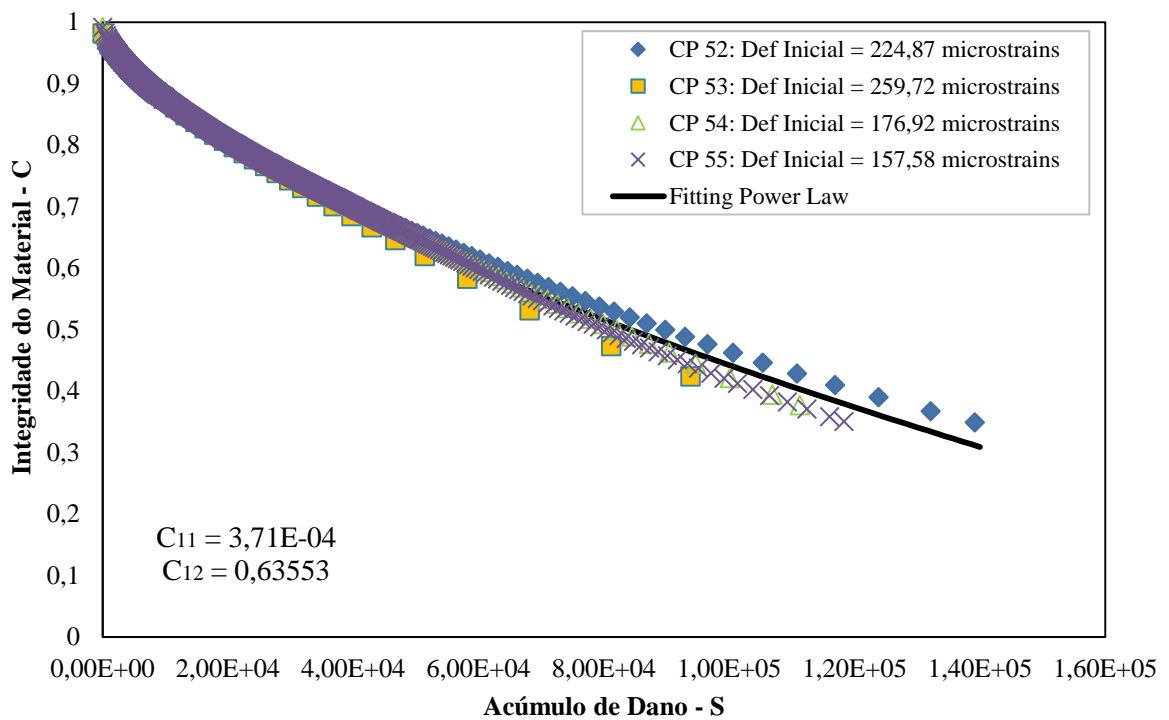


Figura 51 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP B 100°C)

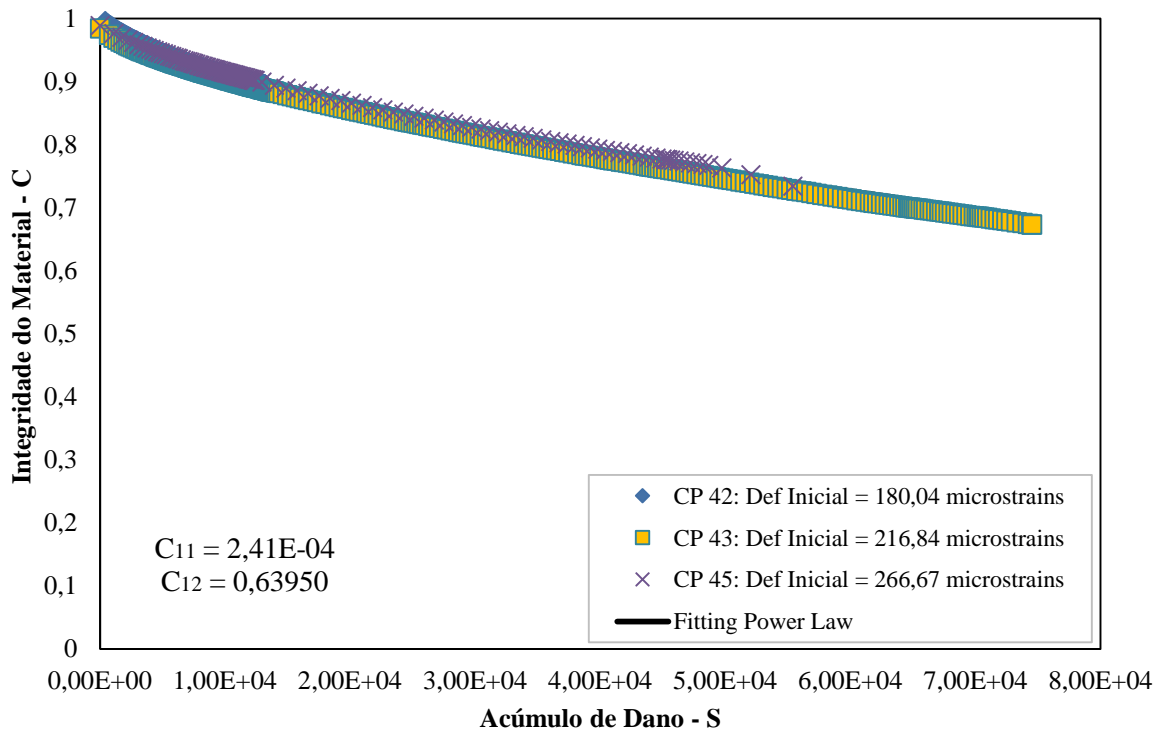
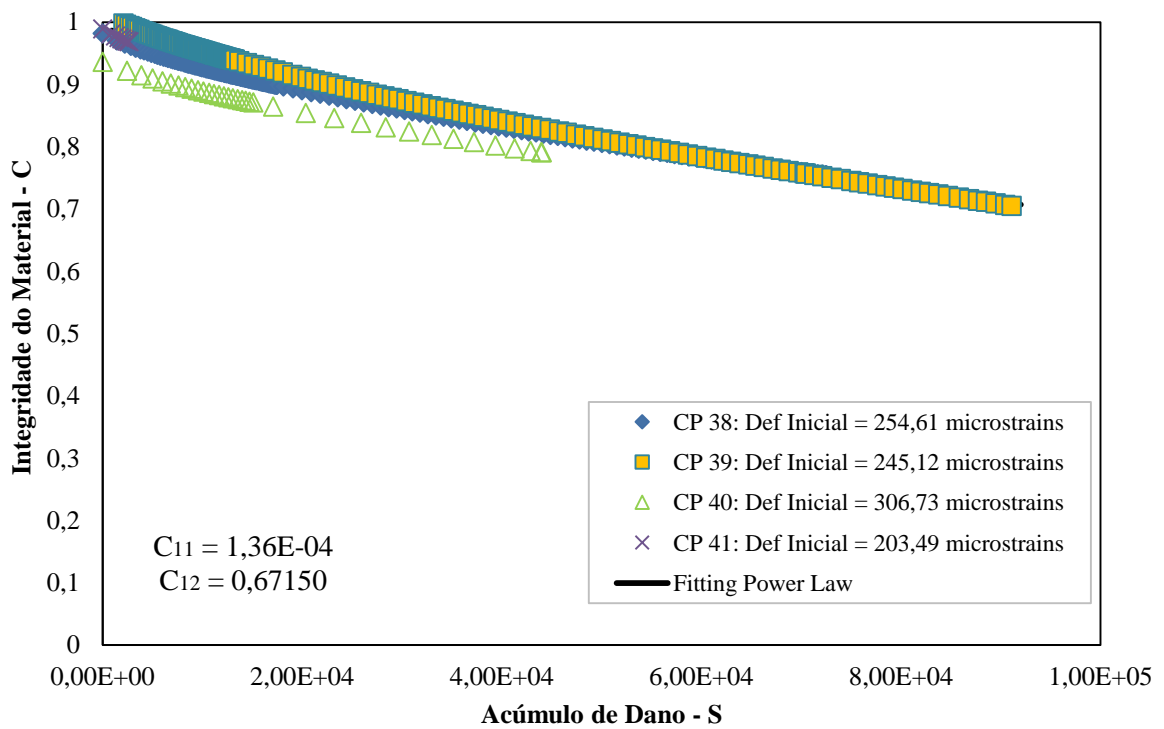


Figura 52 - C x S e coeficientes ajuste exponencial para mistura REF (RAP B 140/170°C)



Apêndice D – Dados de deformação inicial, Nf e Gr para cada amostra ensaiada

Mistura	CP #	Vv (%)	Def. inicial (µS)	Nf	Gr
RAP A 100°C	7	13,21	125,92	12501	24,66
	9	13,06	160,65	3459	57,89
	10	12,62	102,55	8796	7,85
RAP A 140°C	20	6,90	124,70	47327	1,92
	22	7,40	172,77	5822	15,92
RAP A 170°C	32	9,25	216,72	241	3166,26
	34	9,64	109,07	10628	4,53
	35	9,43	146,70	5642	98,42
RAP B 100°C	1	8,13	161,64	31260	12,37
	2	7,77	185,92	11914	54,60
	3	8,15	224,97	5842	147,71
	4	8,29	271,30	2681	397,23
RAP B 140°C	13	5,28	209,33	22447	7,95
	15	4,85	253,98	9841	94,49
RAP B 170°C	25	4,62	259,81	2855	104,27
	27	4,91	148,60	22267	5,04
	28	4,57	177,43	2174	154,45
	29	4,98	202,48	8796	28,51
REF (RAP A 140°C)	49	6,66	161,88	14538	26,66
	50	6,96	137,40	49084	2,24
	58	6,74	254,38	2521	338,48
	59	6,72	204,26	6997	30,08
REF (RAP A 170°C)	52	9,32	224,87	10499	47,00
	53	9,17	259,72	2621	180,59
	54	9,04	176,92	18465	15,71
	55	8,99	157,58	38800	5,53
REF (RAP B 100°C)	42	8,59	180,04	116230	3,04
	43	7,98	216,84	23060	12,03
	45	8,42	266,67	6625	42,18
REF (RAP B 140/170°C)	38	4,78	254,61	9612	40,91
	39	4,64	245,12	10485	35,08
	40	5,07	306,73	2231	209,32
	41	4,49	203,49	23917	12,66