



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC

Rita Flávia Régis Queiroz

**ESTUDO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DO
ENSAIO CÍCLICO DE TRAÇÃO-COMPRESSÃO UNIAXIAL**

Campina Grande - PB,

Julho de 2019.

RITA FLÁVIA RÉGIS QUEIROZ

**ESTUDO DA FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DO
ENSAIO CÍCLICO DE TRAÇÃO-COMPRESSÃO UNIAXIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Coorientador : Christian Rafael Ziegler

Campina Grande – PB,
Julho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que até aqui me ajudou. Aos meus pais Flávio e Ecclesia por seu amor e apoio incondicional. Aos meus tios Herick e Edlene, aos meus irmãos Danielle, Jeovanesa, Lucas e Lizandra e minha prima Maria Helena, pelo encorajamento e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu amor e graça derramados sobre a minha vida, por efetuar seus planos que são maiores e melhores que os meus. A Ele seja a glória para sempre.

Ao meu coorientador e amigo Christian, pela paciência e disponibilidade, por me ensinar tanto, sem o mesmo esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

Ao meu orientador John Kennedy, por ter me dado a oportunidade de participar de projetos de iniciação científica, por meio dos quais amadureci tanto ao longo da graduação.

Aos meus pais Flávio e Eclésia, que se sacrificaram por meus estudos minha eterna gratidão.

À minha irmã Jeovanesa, por seus sábios conselhos que me ajudaram ao longo dessa caminhada, agora somos companheiras de profissão.

Aos meus irmãos Danielle, Lucas e Lizandra, e ao meu cunhado Tiago, pela união e companheirismo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus tios Edlene e Herick, que muitas vezes acreditaram mais em mim do que eu mesma. À minha prima Maria Helena por sempre se alegrar com minhas conquistas.

Ao meu avô Edmilson, pelo incentivo em tudo que planejo.

Às minhas tias/primas Mônica, Olga e Hortência, com quem eu sempre pude contar, minhas amigas próximas.

À minha amiga Érika Vitória, pelos ensinamentos durante o PIBIC e a amizade que levo para a vida.

Às amigas Letícia Agra e Pamella Farias, pela amizade e companheirismo, com vocês a graduação se tornou mais leve.

À Luanna Bezerra, com quem muitas vezes compartilhei as dificuldades para a realização desse trabalho.

Aos professores Adriano e Érika, pelas participações e contribuições na banca examinadora.

Aos técnicos e amigos do LEP, Nildinho e Jadilson, pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho.

Aos amigos e familiares, muito obrigada!

RESUMO

No Brasil os defeitos mais recorrentes nas rodovias são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Dentre diversas causas, o surgimento de trincas no revestimento asfáltico se deve principalmente às cargas do tráfego repetidas, que reduzem consideravelmente a vida de serviço do pavimento, permitindo a entrada de água nas camadas granulares e estrutura da rodovia, ocasionando na sua deterioração de forma mais acelerada. Os ensaios laboratoriais são o principal recurso para estudo da fadiga, tradicionalmente a avaliação da fadiga é realizada por meio do ensaio de compressão diametral, que reconhecidamente apresenta limitações no estado de tensões desenvolvido. Em muitos países da Europa e América do Norte, métodos mais eficientes de previsão de fadiga já são uma realidade consolidada. Nesse sentido, esse trabalho tem o objetivo de contribuir para a disseminação do novo ensaio cíclico de Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial, pouco realizado no Brasil, e estudar a teoria do Dano em Meio Contínuo Viscoelástico (S-VECD). Por meio da calibração do modelo S-VECD com o ensaio de fadiga por tração-compressão uniaxial é possível prever o desempenho à fadiga de misturas asfálticas independente da forma e amplitude do carregamento aplicado para induzir o dano. Foram realizados os ensaios de fadiga por compressão diametral, LAS e fadiga na tração-compressão uniaxial com objetivo de estudar esse fenômeno pela metodologia tradicional e nova. O ensaio de tração-compressão foi realizado satisfatoriamente, com ruptura bem definida e obtenção do número de ciclos que levou a mistura asfáltica à ruptura.

Palavras-chaves: misturas asfálticas; fadiga; dano em meio contínuo viscoelástico; S-VECD.

ABSTRACT

In Brazil, the most recurrent defects on the highways are cracking due to fatigue and permanent deformation. Among several causes, the appearance of cracks in the asphalt coating is mainly due to the repeated traffic loads, which considerably reduce the service life of the pavement, allowing water to enter the granular layers and road structure, leading to deterioration in a more accelerated. Laboratory tests are the main resource for the study of fatigue, traditionally the evaluation of fatigue is performed through the diametrical compression test, which admittedly presents limitations in the state of tensions developed. In many countries in Europe and North America, more efficient methods of predicting fatigue are already a consolidated reality. In this sense, this work aims to contribute to the dissemination of the new cyclic Fatiga-Traction-Uniaxial Compression test, which has not been carried out in Brazil, and to study the theory of Viscoelastic Continuous Medium Damage (S-VECD). By calibrating the S-VECD model with the uniaxial tensile-compression fatigue test it is possible to predict the fatigue performance of asphalt mixtures regardless of the shape and amplitude of the load applied to induce the damage. The fatigue tests were performed by diametrical compression, LAS and fatigue in the uniaxial traction-compression in order to study this phenomenon by the traditional and new methodology. The tensile-compression test was performed satisfactorily, with well defined rupture and obtaining the number of cycles that led the asphalt mixture to rupture.

Keywords: asphalt mixtures; fatigue; damage in continuous viscoelastic medium; S-VECD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões distribuídas pela estrutura de um pavimento	6
Figura 2 - Trincas de jacaré	6
Figura 3 - Diferença entre fadiga e deformação permanente	7
Figura 4 - Estágios de um processo de fadiga	8
Figura 5 - ensaio de fadiga por compressão diametral	14
Figura 6 - Equipamento de fadiga à flexão em viga por quatro pontos.....	15
Figura 7 - Realização do ensaio de fadiga à flexão de quatro pontos em viga.....	16
Figura 8 - Representação das componentes da deformação	17
Figura 9 - Curva mestra para a temperatura de referência 21,1 °	21
Figura 10 - Curva Característica do dano por fadiga	24
Figura 11 - CAP 50/70 utilizado na pesquisa.....	26
Figura 12 - Fluxograma da caracterização dos materiais	27
Figura 13 - Granulometria da areia (esquerda) e pó de pedra (direita)	29
Figura 14 - Distribuição granulométrica dos agregados.....	30
Figura 15 - Ensaio de massa específica na areia	31
Figura 16 - Ensaio de equivalente areia realizado na areia	32
Figura 17 - Ensaio de angularidade na areia	33
Figura 18 - Medição para obter as partículas alongadas e achatadas	34
Figura 19 - Ensaio abrasão Los Angeles	36
Figura 20 - Fluxograma da caracterização do CAP	37
Figura 21 - Ensaio de penetração	38
Figura 22 - Ensaio de ponto de amolecimento	39
Figura 23 - Viscoímetro Brookfield utilizado no ensaio de viscosidade.....	40
Figura 24 - Reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.....	41

Figura 25 - Fluxograma de doagem SUPERPAVE.....	43
Figura 26 - Gráfico da curva granulométrica superior	43
Figura 27 - Compactador giratório SUPERPAVE	44
Figura 28 - Ensaio de Rice Test.....	45
Figura 29 - Corpos de prova moldados para os teores de teste.	46
Figura 30 - Estimativa do teor ótimo de ligante	47
Figura 31 - Fluxograma dos ensaios de resistência mecânica	48
Figura 32 - Prensa do ensaio de resistência à tração	49
Figura 33 - Prensa UTM-25 utilizada para realização do módulo de resiliência	50
Figura 34 - Realização do ensaio de MD no equipamento AMPT.....	52
Figura 35: Realização do ensaio de fadiga por compressão diametral na prensa UTM-25.	53
Figura 36: Preparação da cola e posterior colagem nos pratos de fixação do corpo de prova .	55
Figura 37 - Evolução do módulo dinâmico e ângulo de fase durante o ensaio	55
Figura 38: Corpo de prova para o ensaio de fadiga por tração direta na AMPT.....	57
Figura 39: Curva mestra da mistura com CAP 50/70.....	60
Figura 40: Módulo dinâmico da misturas pra 4, 21 e 37°C	60
Figura 41: ângulo de fase em função da frequência de carregamento para as temperaturas de 7, 21 e 37°C	61
Figura 42: Vida de fadiga x Diferença de tensões.....	62
Figura 43: Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente.....	62
Figura 44:Variação dos ciclos de ruptura em função da amplitude de deformação para o CAP 50/70	65
Figura 45: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de $300 \mu\epsilon$	67
Figura 46: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de $350 \mu\epsilon$	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Normas dos ensaios de caracterização dos agregados.....	28
Tabela 3:Granulometria dos agregados	29
Tabela 4 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdos	31
Tabela 5 - Resultados do ensaio equivalente de areia	32
Tabela 6 - Densidade aparente e vazios não compactados dos agregados finos	33
Tabela 7 - Resultado do ensaio de partículas planas e alongadas	34
Tabela 8 - Resultado do ensaio de partículas fraturadas	35
Tabela 9 - Resultado do índice de forma.....	36
Tabela 10 - Resultados de abrasão Los Angeles	37
Tabela 11 - Normas dos ensaios de caracterização do CAP.....	37
Tabela 12: Tabela resumo de caracterização do CAP	42
Tabela 13 - Proporção de agregados para cada teor de ligante.	46
Tabela 14 - Parâmetros volumétricos.	47
Tabela 15 - Ensaio de resistência mecânica e suas respectivas normas	48
Tabela 16 - Temperaturas e tensões de contao do ensaio de MD.....	52
Tabela 17: Níveis de deformação para o ensaio de fadiga por tração direta (Mocelin. 2018) .	57
Tabela 18: Resultado do ensaio de resistência à tração CAP 50/70.....	58
Tabela 19: Resultado do ensaio de módulo de resiliência no CAP 50/70.....	58
Tabela 20: Parâmetros das equações de vida de fadiga.....	63
Tabela 21: Parâmetros "A e "B" para análise VECD	64
Tabela 23: Vida de fadiga do LAS para diferentes níveis de tensão.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
LAS	Linear Amplitude Sweep
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
PG	Performance Grade
R ²	Coefficiente de Correlação Linear
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin Film Oven Test
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
S-VECD	Simplified ViscoElastic Continuum Damage
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	Universal Testing Machine
VECD	ViscoElastic Continuum Damage
$\mu\epsilon$	Deformação de tração

LISTA DE SIMBOLOS

a, b e c	coeficientes determinados durante a construção da Curva Mestra
A	parâmetro de fadiga
B	parâmetro de fadiga
C	pseudo-rigidez, função do parâmetro de dano S
$ E^* $	módulo de rigidez do material
%	porcentagem
σ_t	resistência à tração
°C	graus Celsius
cP	centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
F	carga de ruptura
g	gramas
N_f	vida de fadiga
S	variável interna de estado ou Dano Acumulado
t	tempo
δ	ângulo de fase
ε	deformação dependente do tempo do material viscoelástico
σ	tensão em função do tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo Geral.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos:	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Principais defeitos em Pavimentos Flexíveis	4
2.1.1 Deformação permanente	4
2.1.2 Trincas por fadiga	5
2.2 Fadiga nos Pavimentos Asfálticos	7
2.3 Fatores que influenciam na vida de fadiga de ligantes asfálticos.....	10
2.3.1 Ligante asfáltico	10
2.3.2 Agregados	10
2.3.3 Volume de vazios.....	11
2.3.4 Porcentagem de ligante asfáltico	11
2.3.5 Envelhecimento.....	12
2.3.6 Condições climáticas e de carregamento	12
2.4 Ensaaios laboratoriais de fadiga em misturas asfáltica	13
2.4.1 Fadiga por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos	13
2.4.2 Ensaio de fadiga à flexão de quatro pontos em viga.....	14
2.5 Comportamento Viscoelástico das misturas asfálticas.....	16
2.6 Modelo do dano em meio contínuo (VECD)	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS:.....	26
3.1 Materiais.....	26
3.1.1 Ligante asfáltico	26
3.1.2 Agregados	26
3.2 Métodos.....	26
3.2.1 Propriedades físicas dos agregados.....	26
3.2.1.1 Análise granulométrica.....	28
3.2.1.2 Massa específica e absorção	30
3.2.1.3 Equivalente de areia	31
3.2.1.4 Angularidade	32
3.2.1.5 Partículas alongadas e achatadas	34
3.2.1.6 Partículas fraturadas	35
3.2.1.7 Índice de forma.....	35
3.2.1.8 Abrasão Los Angeles.....	36
3.2.2 Caracterização do Cimento asfáltico de Petróleo (CAP).....	37
3.2.2.1 Procedimento de envelhecimento à curto prazo (RTFO).....	38

3.2.2.2 Penetração	38
3.2.2.3 Ponto de amolecimento	39
3.2.2.4 Índice de Susceptibilidade Térmica	39
3.2.2.5 Viscosidade Rotacional	40
3.2.2.6 Grau de desempenho (PG)	40
3.2.2.7 Tabela resumo da caracterização do CAP	41
3.2.3 Dosagem Superpave.....	42
3.2.4 Caracterização mecânica e avaliação da fadiga	48
3.2.4.1 Caracterização mecânica	49
3.2.4.1.1 Resistência a tração.....	49
3.2.4.1.2 Módulo de resiliência.....	50
3.2.4.1.3 Módulo dinâmico	51
3.2.4.2 Avaliação da fadiga	52
3.2.4.2.1 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	52
3.2.4.2.2 LAS (Linear Amplitude Sweep)	54
3.2.4.2.3 Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão (S-VECD)	54
4 RESULTADOS	58
4.1 Caracterização mecânica	58
4.1.1 Ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral e módulo de resiliência. 58	
4.1.1 Módulo dinâmico (E^*).....	59
4.2 Avaliação da fadiga	62
4.2.1 Fadiga por compressão diametral a tensão controlada	62
4.2.2 Varredura linear de amplitude de deformação – LAS	64
4.2.3 Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão.....	66
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	72
5.1 Conclusões	72
5.2 Sugestões.....	73
6 REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A principal forma de deslocamento de pessoas e mercadorias no Brasil é o modo rodoviário. O pavimento deve proporcionar agilidade nos deslocamentos, conforto, economia e segurança. Todos esses elementos dependem da condição em que o pavimento se encontra. De acordo com o relatório da Confederação Nacional de Transporte (CNT) de 2018 a experiência dos usuários ao utilizar o modal rodoviário depende da existência de pavimento e a qualidade da execução e manutenção. Ainda de acordo com o relatório da CNT (2018) dos 107.161 Km de rodovias federais e estaduais pavimentadas que foram avaliadas, 75,9% apresentam problemas na superfície do pavimento, onde 52,8% desses problemas se deve ao desgaste, 18,9% ao trincamento e emendas, 3,4% a buracos e afundamentos e 0,8% está totalmente destruído.

O uso intenso do modal rodoviário associado ao elevado crescimento na frota de veículos e as cargas transportadas, compromete o desempenho dos pavimentos asfálticos, que apresentam deteriorações prematuras levando ao aumento no custo do transporte. De acordo com Boeira (2018) os principais defeitos dos pavimentos asfálticos são as trincas por fadiga que estão associadas com as cargas do tráfego, a estrutura do pavimento e condições climáticas.

O dano por fadiga se dá pela propagação de micro e macrotrincas induzidas pelas cargas repetidas do tráfego, portanto nos projetos de pavimentos asfálticos é imprescindível modelar e prever o fenômeno da fadiga. Prever esse fenômeno de forma precisa não é uma tarefa fácil, não apenas pela complexidade da fadiga em si, que depende das características estruturais e materiais do pavimento asfáltico, como também pela dificuldade operacional dos ensaios de fadiga.

Compreender como as cargas repetidas do tráfego afetam o comportamento das misturas asfálticas é essencial para prever a fadiga e o desempenho do pavimento. A performance do concreto asfáltico depende do seu histórico de tensões, assim para avaliar seu comportamento para cargas aplicadas em intervalos diferentes, durante tempos distintos e para diferentes temperaturas, é necessário aplicar os conceitos da teoria da viscoelasticidade e mecânica do dano em meio contínuo.

Recentemente os modelos para previsão de fadiga por meio da teoria viscoelástica e mecânica do dano em meio contínuo permitiram uma melhor compreensão de como ocorre o dano nas misturas asfálticas, para condições diferentes de carregamento e ambientais. O modelo de dano em meio contínuo viscoelástico VECD, caracteriza o comportamento das misturas asfálticas por meio de propriedades fundamentais dos materiais.

Os ensaios realizados atualmente no Brasil para previsão da fadiga se mostram pouco confiáveis para prever esse fenômeno nos pavimentos asfálticos. Recentemente, o professor Y. Richard Kim, da North Caroline State University nos Estados Unidos, desenvolveu um ensaio capaz de prever a vida de fadiga por meio de parâmetros fundamentais do comportamento de misturas asfálticas. Segundo Martins (2014) No ensaio é aplicado ao corpo de prova uma deformação na forma de tensão cíclica senoidal, de amplitude constante até ocorrer a ruptura do corpo de prova caracterizada pela defasagem do ângulo de fase. Esse ensaio, além de prever de forma mais verossímil o comportamento da mistura asfáltica frente à fadiga, necessita de bem menos corpos de prova do que o tradicional (por compressão diametral) e menor tempo para a realização.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa visa o estudo do modelo de dano em meio contínuo viscoelástico (VECD) e a implementação do ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Verificar o comportamento mecânico da mistura por meio dos ensaios de Resistência a tração e Módulo de Resiliência;
- Analisar o comportamento viscoelástico linear da mistura por meio do Módulo Dinâmico;

- Avaliar a fadiga por meio do ensaio tradicional de resistência a tração por compressão diametral;
- Avaliar o desempenho em relação a fadiga do ligante asfáltico por meio da metodologia VECD através do ensaio de LAS;
- Contribuir para a implementação ensaio de Fadiga por tração-compressão uniaxial no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), que é pouco realizado no Brasil;
- Avaliar a fadiga em misturas asfálticas por meio do ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Principais defeitos em Pavimentos Flexíveis

Segundo Balbo (2007) os pavimentos asfálticos apresentam uma série de patologias durante sua vida útil, de origem da utilização e da estrutura, que ocorrem em virtude dos materiais empregados e das respostas mecânicas às cargas. O pavimento é dimensionado para uma determinada vida útil, durante a qual deve ter a capacidade de receber e transmitir esforços, não apresentando degradações além das previstas. Essas degradações que aparecem nos pavimentos flexíveis reduzem sua qualidade. Com a deterioração das rodovias, sua qualidade diminui e também a produtividade, assim a economia do país também é afetada, contribuindo para fortalecer a importância em preservar e prolongar a vida útil do pavimento.

De acordo com Fontes (2009) os materiais asfálticos apresentam formas diversas de deterioração dependendo do clima e das condições de tráfego. Dentre as causas mais comuns de degradação dos pavimentos asfálticos, tem-se os fatores que atuam de forma ativa que são as cargas do tráfego e condições climáticas, e os fatores ativos são o emprego de materiais com propriedades insuficientes e problemas durante o processo de execução.

Segundo Moura (2010) os principais problemas estruturais encontrados nos pavimentos asfálticos são as trincas por fadiga e as deformações permanentes. Outros problemas como a diminuição da durabilidade devido ao processo de oxidação e a perda de adesividade, contudo esses problemas podem ser resolvidos com o emprego de materiais de qualidade superior.

2.1.1 Deformação permanente

A deformação permanente em trilhas de rodas é o acúmulo de pequenas deformações não recuperáveis, devido às cargas aplicadas pelos veículos elas se desenvolvem na banda de passagem dos pneus dos veículos. De acordo com Fontes (2009) as deformações se desenvolvem com o aumento das solicitações de carga dos veículos e aparecem sob o aspecto de depressões longitudinais nas rodadeiras, que podem levar também a elevações nas laterais da estrada. Segundo a norma DNIT 005/2003-TER a deformação permanente se caracteriza pela formação de uma depressão na superfície do pavimento, que pode levar também ao solevamento e apresentar afundamento plástico.

Boeira (2018) afirma que a deformação permanente, semelhante aos outros defeitos dos pavimentos leva a insegurança e desconforto, pois no local pode haver o acúmulo de água dificultando a passagem dos veículos. Nos revestimentos asfálticos a deformação permanente está associada às características visco elasto plásticas do material. Sua origem é associada a mudanças no volume de vazios devido à ação do tráfego e temperatura, especialmente o desempenho plástico do material para determinado estado de tensão.

2.1.2 Trincas por fadiga

Dentre a família das deformações, o fendilhamento é a mais comum nos pavimentos flexíveis e na maioria dos casos são resultado da fadiga. Por muito tempo, o fendilhamento da camada de revestimento asfáltico foi atribuído às deformações plásticas sofridas pelo solo ou camadas de base e sub-base. Entretanto, verificou-se que essas fissuras são atribuídas ao fenômeno da fadiga, onde o pavimento é submetido à carregamentos cíclicos transmitidos pelos veículos, em uma dimensão maior do que aquela para a qual o pavimento foi projetado. De acordo com Boeira (2018) o fenômeno de fadiga é uma das principais causas de degradação dos pavimentos asfálticos.

Segundo Di Benedetto et al. (2004) os pavimentos asfálticos são submetidos a cargas transmitidas pelos veículos em um curto intervalo de tempo. As cargas levam ao aparecimento de micro trincas na superfície inferior do pavimento, diminuindo a sua rigidez. Essa redução da rigidez ocasiona em deformações maiores, e a acumulação dessas deformações leva ao fenômeno da fadiga. Fontes (2009) afirma que ao surgirem na superfície inferior do pavimento se propagando até a superfície, as trincas permitem a entrada de água e ocasiona o colapso da estrutura.

De acordo com Miranda (2013) as trincas por fadiga nos pavimentos flexíveis se devem principalmente às cargas dos veículos, que provocam uma deformação máxima por tração na superfície inferior da camada, e que se propagam até a superfície superior. A figura 1 ilustra como se distribuem as tensões que são geradas no pavimento, quando solicitado por compressão devido a uma carga vertical atuando na superfície. Deve-se notar especialmente as tensões de tração e compressão nas fibras inferiores devido ao processo de carga e descarga cíclico.

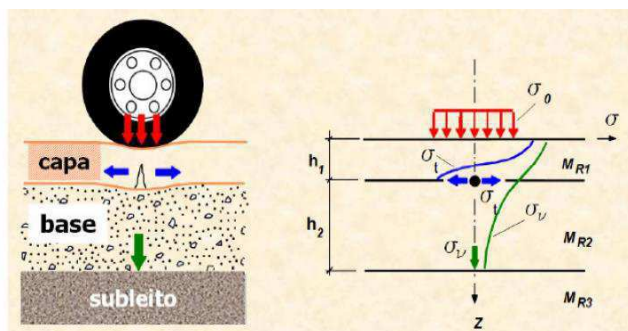


Figura 1 - Tensões distribuídas pela estrutura de um pavimento (Medina e Motta,2005)

Ainda segundo Miranda (2013) essas trincas também podem surgir no topo da camada como o aparecimento de tensões críticas na superfície superior do pavimento, que são intensificadas pelo enrijecimento do asfalto devido ao envelhecimento. Portanto, a ruptura do revestimento asfáltico está associada a toda a estrutura do pavimento, dependendo dos módulos elásticos e espessuras de cada camada.

Segundo Bernucci et al. (2010) as trincas dos pavimentos podem ter diversas causas, a mais comum é conhecida por trinca couro de jacaré e se deve a fadiga do revestimento asfáltico (Figura 2). O processo de trincamento causa danos estruturais e funcionais no pavimento, como a destruição da impermeabilização, o desgaste progressivo da camada de revestimento próximo a trinca e a elevação das tensões verticais que atuam nas camadas seguintes devido à perda de rigidez decorrente do trincamento.



Figura 2 - Trincas couro de jacaré (Bernucci et al., 2010)

2.2 Fadiga nos Pavimentos Asfálticos

Segundo Schuster (2018) a fadiga em um pavimento asfáltico é um fenômeno complexo, pois está relacionada a diversos fatores, dentre os quais se pode citar: a estrutura do pavimento, as condições climáticas, a grandeza e forma de aplicação das cargas e as propriedades do próprio ligante asfáltico

De acordo com Balbo (2007) a fadiga ocorre nos materiais quando solicitados em níveis de tensão bem inferiores aos que levam a ruptura. Essas tensões levam aos poucos a alterações na estrutura interna, fazendo com que ele perca suas propriedades estruturais originais. Esse processo culmina no desenvolvimento progressivo de micro fissuração que evoluem para fraturas, resultando no rompimento do material. Contudo, apenas os níveis de deformação impostos aos materiais por si só não são suficientes para levar instantaneamente a falha por fadiga. A aplicação de cargas cíclicas gera deformações, levando a acumulação irreversível de zonas de plastificação, que ao longo da vida útil do pavimento asfáltico ocasionam na formação de planos de fratura e discontinuidades. Esses fatores provocam a redução da rigidez e integridade do material, e portanto ao rompimento por fadiga.

Di Benedetto et al. (2004) afirmam que o desempenho das misturas asfálticas diante da fadiga é sensível às condições de carga e contorno. Essa vulnerabilidade em relação ao material e tipo de teste leva a uma grande dispersão de resultados, tornando a sua interpretação uma tarefa difícil. Assim como foi dito anteriormente, a fadiga leva ao dano dos materiais, caracterizado pela redução da rigidez e portanto do módulo. Contudo, fadiga e deformação permanente são defeitos diferentes dos pavimentos flexíveis como é demonstrado na Figura 3.

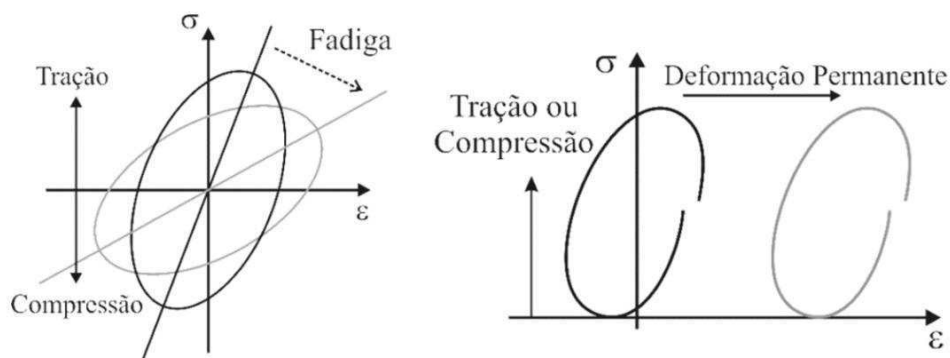


Figura 3 - Diferença entre fadiga e deformação permanente (Di Benedetto,2004)

De acordo com Hintz (2012) a ocorrência mais comum do dano por fadiga é através do trincamento e as principais formas que ocorre é topo-base e base-topo. A trinca topo-base se inicia na superfície externa no pavimento se propagando para as demais camadas, geralmente associada a deformações por cisalhamento elevadas. O trincamento base-topo se inicia na superfície inferior do pavimento se propagando até a superfície superior, e se deve às altas deformações de tração devido à flexão do pavimento asfáltico.

Durante o processo de fadiga são identificados diferentes estados do material que foi submetido aos carregamentos cíclicos, conforme ilustra a Figura 2.

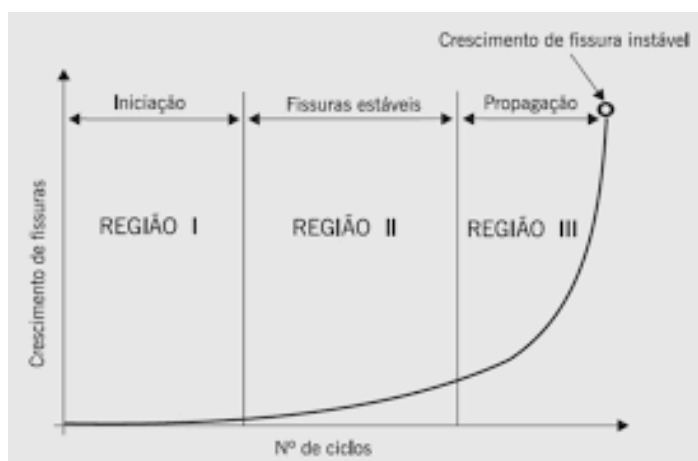


Figura 4 - Estágios de um processo de fadiga (Bernucci et al., 2010)

Para a Região I o material já sofreu as primeiras mudanças na sua microestrutura, surgem microfissuras na estrutura e surgem as zonas de danos irreversíveis. Na Região II aparecem as macrofissuras que surgem da união de microfissuras. Por último na Região III as macrofissuras aumentam e rapidamente ocorre o colapso da estrutura.

Segundo Fontes (2009) nos ensaios de laboratório os testes de fadiga em misturas asfálticas podem ser aplicados com tensão controlada e deformação controlada. Para tensão controlada, a amplitude de carga permanece constante e a deformação do corpo de prova aumenta progressivamente com a redução da rigidez. No ensaio realizado com deformação controlada, a tensão do corpo de prova diminui continuamente com a redução da rigidez, mantendo constante a deformação. Os critérios são diferentes, no entanto, ambos podem ser representados pela Equação 1 desenvolvida por Monismith (1981):

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon \text{ ou } \sigma} \right)^b$$

Equação 1

Onde :

N = a vida de fadiga, ou seja, o número de ciclos de carga;

ε ou σ = a extensão ou tensão controlada do ensaio;

a e b = são coeficientes do ensaio.

Nos ensaios de fadiga com deformação controlada, a resistência à fadiga é obtida em função da resistência da mistura asfáltica inicialmente (rigidez) e da deformação aplicada. Essa relação foi estudada por Monismith et al. (1985) e representada na Equação 2:

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_0} \right)^c$$

Equação 2

Onde:

N_f = resistência da mistura asfáltica à fadiga;

ε_0 = deformação por tração;

S_0 = rigidez;

a , b , e c = incógnitas determinadas em laboratório experimentalmente.

Segundo Boeira (2018) embora em ambos os ensaios os níveis de tensão e deformação serem bem próximos para os dois ensaios (tensão ou deformação controlada), depois de um determinado número de ciclos, os níveis do ensaio com tensão controlada se mostram superiores e o ensaio representa a forma mais severa de fadiga.

De acordo com Fontes (2009) as leis da fadiga são estabelecidas por meio dos ensaios laboratoriais, ou seja, a relação tensão-deformação e o número de ciclos de carga aplicados até atingir a ruptura, com níveis diferentes, devendo reproduzir o mais próximo das condições às quais o pavimento é submetido em serviço.

Underwood (2011) disserta que o dano por fadiga é regido por duas teorias a mecânica da fratura e a do dano em meio contínuo. Na mecânica da fratura o comportamento do material diante da fadiga é relacionado com o surgimento de micro trincas. Através do dano em meio

contínuo são representados os fenômenos da microescala, em que são abordadas as propriedades fundamentais da mistura asfáltica para interpretar seu comportamento.

2.3 Fatores que influenciam na vida de fadiga de ligantes asfálticos

De acordo com Mello (2008) os fatores que exercem influência na vida de fadiga dos pavimentos podem ser divididos em três grupos que são as propriedades da mistura asfáltica, os testes aplicados e a preparação das amostras. De acordo com Schuster (2018) diversos fatores exercem influência no comportamento das misturas asfálticas em relação ao fenômeno da fadiga, dentre os quais pode-se citar: as condições climáticas, a forma de carregamento seja as cargas dos veículos ou as aplicadas em laboratório e as características da própria mistura asfáltica. Nesse tópico serão analisados os fatores que interferem na resistência a fadiga de misturas asfálticas.

2.3.1 Ligante asfáltico

Specht (2018) e outros autores (Brennan et al. 1990; Epps e Monismith, 1969) analisam que existe um teor ótimo de ligante asfáltico para o qual o pavimento apresenta um melhor desempenho e uma maior vida útil. Para teores acima do ótimo, a resistência a fadiga é reduzida. A busca de novos materiais pouco susceptíveis às variações de clima, sendo flexível em baixas temperaturas e mantendo suas propriedades em temperaturas elevadas, levou aos estudos do ligante modificado por polímeros e outros materiais. Specht (2004) analisou a incorporação da borracha de pneus usados em campo e laboratório, segundo o mesmo ao adicionar entre 12 e 18% de borracha ao CAP, são produzidos ligantes mais resistentes à fadiga, às deformações permanentes, e conseqüentemente, de maior durabilidade.

2.3.2 Agregados

Com relação aos agregados, de acordo com Bernucci et al. (2010) a distribuição granulométrica tem uma grande influência no desempenho do pavimento, influenciando na rigidez, durabilidade, estabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga, à deformação permanente dentre outros. O agregado deve contribuir para a resistência do ligante, e portanto, suportar as tensões às quais o pavimento é submetido. A resistência do agregado depende da sua composição geológica, da forma como é produzido e da sua aplicação, portanto para escolher o tipo de agregado a ser empregado deve-se avaliar onde o mesmo vai ser aplicado.

De acordo com os resultados obtidos por Soares et al. (2000) sobre o uso de diferentes granulometrias nas misturas asfálticas, as misturas mais finas apresentaram melhor comportamento diante das degradações devido à fadiga. Preussler e Pinto (2010) corroboram com esses resultados, afirmando que agregados de granulometria mais fina, incorporados nas misturas asfálticas, possuem taxa de propagação de trincas por fadiga inferior à dos agregados graúdos. A textura dos agregados também vai ter considerável influência no comportamento do pavimento, de acordo com Kim e Kloska (1992) os agregados mais rugosos proporcionam misturas asfálticas mais resistentes à fadiga, pois aderem melhor ao ligante. Partindo do mesmo pressuposto, os autores afirmam que os agregados angulares apresentam melhor desempenho que os arredondados, para os quais geralmente há uma perda de coesão com os constituintes.

2.3.3 Volume de vazios

O volume de vazios de uma mistura exerce grande influência ao processo de degradação por fadiga de uma camada asfáltica. Esse fato pode ser explicado pelos efeitos provocados na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem nessa camada (SANTOS,2005). Em sua pesquisa Harvey et al.(1995) observou que a variação de 1% no volume de vazios se mostrou mais significativa do que a variação de 1% no teor do ligante, em relação ao comportamento frente a fadiga de misturas asfálticas.Em sua pesquisa, Santos (2005) verificou que um volume menor de vazios melhora o desempenho à fadiga, no entanto, deve-se atentar que a redução do volume de vazios pode aumentar o risco de ocorrer deformações permanentes.

2.3.4 Porcentagem de ligante asfáltico

A porcentagem de betume também possui um papel importante na resistência do pavimento. Mahboub & Little (1988) através de seu estudo evidenciaram que uma porcentagem alta de betume reduz os vazios, mas aumenta a susceptibilidade às deformações. Isto porque a elevada porcentagem de ligante, faz com que o mesmo preencha os vazios, levando à uma mistura mais susceptível às deformações. De acordo com Pinto (1991) o aumento no teor de ligante, melhora o desempenho do pavimento à fadiga. Contudo de acordo com Capitão (2004), para misturas asfálticas com o teor de ligante superior ao ótimo apresentam melhorias da vida de fadiga, entretanto, limitado pela redução do Módulo de Resiliência da mistura.

2.3.5 Envelhecimento

O envelhecimento do ligante é um fator de grande importância, principalmente em se tratando da vida de fadiga dos ligantes. O processo de envelhecimento leva ao aumento da rigidez do ligante, o que acarreta na diminuição da vida de fadiga. Segundo Raad et al. (2001) o desempenho do ligante quanto à fadiga, não depende apenas da sua rigidez, mas também dos módulos de resiliência das camadas do pavimento.

Dessa forma, se o pavimento for muito espesso, o mesmo é muito resiliente, levando ao surgimento de deflexões, o que reduz a resistência frente à fadiga do mesmo. Para Fontes (2009) o envelhecimento do ligante está relacionado ao tipo de ligante, à mistura e condições do ambiente. Para o autor, uma maior percentagem de asfalto e a redução do volume de vazios dificultam o processo de envelhecimento. A influência do processo de envelhecimento no desempenho do ligante à fadiga é evidenciada na pesquisa de Tonial et al. (2001). O autor avaliou o desempenho de pavimentos de trechos experimentais, comparando com 5 anos após a abertura ao tráfego de veículos, o desempenho à fadiga do pavimento reduziu significativamente, fato atribuído pelo autor ao processo de envelhecimento.

2.3.6 Condições climáticas e de carregamento

O desempenho de um pavimento é influenciado pelas cargas que é submetido, pelo envelhecimento, pelo tipo de ligante e principalmente pelas condições climáticas. Para Medina e Motta (2015) quando se combina tráfego e clima, tem-se os principais limitantes da vida útil do pavimento. De acordo com os autores a temperatura do ambiente influencia de maneiras diferentes a vida de fadiga do asfalto. Dentre as diferentes formas, a redução do Módulo de resiliência é uma das mais significativas, uma vez que reduz a resistência à tração, aumenta as deformações na base do pavimento originadas pela tração, e ainda a exposição ao Sol, que acelera o envelhecimento do ligante, causando seu enrijecimento, e reduzindo seu desempenho à fadiga.

Os carregamentos constituem-se um dos principais fatores que exercem influência na vida de fadiga dos pavimentos. Os pavimentos durante sua vida útil são expostos à uma grande variedade de cargas, com frequências e tensões variáveis. De acordo com Medina e Motta (2005) a intensidade de um carregamento cíclico ocasiona o surgimento mais rápido de fissuras no pavimento, podendo levar até ao colapso da estrutura.

Preussler e Pinto (2010) afirmam que os principais fatores responsáveis pela redução da resistência a fadiga durante os ensaios laboratoriais, no que remete à carga aplicada são: a intensidade da carga, o tipo de carga, a frequência e duração de cargas aplicadas sucessivamente, o histórico de tensões e a forma de carregamento (quadrado, triangular, dentre outros). Nessa linha de pensamento, Rossato (2015) afirma que o tráfego de veículos é o principal responsável da ruptura por fadiga no asfalto, uma vez que as solicitações ocorrem diretamente na camada de maior rigidez da estrutura.

2.4 Ensaios laboratoriais de fadiga em misturas asfáltica

Por meio dos ensaios laboratoriais é possível realizar o estudo da fadiga em misturas asfálticas. Os testes realizados em laboratório permitem compreender melhor o comportamento dos materiais quando são submetidos a carregamentos cíclicos. Diversos ensaios são aplicados para o estudo da fadiga em misturas asfálticas, os mais convencionais são:

2.4.1 Fadiga por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos

O ensaio de compressão diametral em corpos de prova cilíndricos é o ensaio de fadiga realizado tradicionalmente no Brasil. Segundo Bernucci et al.(2008) a simplicidade da preparação dos corpos de prova e do equipamento, assim como a fácil interpretação, contribuíram para popularizar o ensaio.

O ensaio é regido no Brasil pela norma DNIT 183/2018 e é realizado geralmente com tensão e temperatura controladas, assim a carga aplicada é mantida constante, levando a deformações crescentes no decorrer do ensaio. Segundo Babadopulos et al. (2014) esse método para analisar a vida de fadiga de misturas asfálticas, é realizado de forma que a carga é aplicada nos corpos de prova cilíndricos por meio de pulsos, ocorrendo a deformação de tração até o rompimento da amostra. É realizada a contagem do número de ciclos, e então construída a curva de Whöler, um gráfico de tensão em função do número de ciclos na escala logarítmica. De acordo com Pazos (2015) a vida de fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como o número de ciclos de carga (N) que levam o corpo de prova a romper.

No ensaio são aplicadas cargas dinâmicas no diâmetro dos corpos de prova cilíndricos, por meio de um friso metálico, ocorre então na vertical compressão e tração na horizontal. São aplicados 60 carregamentos repetidos a cada minuto, de forma que cada carga repetida possui

duração de 0,1 segundo. De acordo com Preussler e Pinto (2010) no ensaio de fadiga à tração indireta, como também é conhecido, a carga depende da Resistência à Tração (RT) da mistura asfáltica, e os carregamentos cíclicos aplicados usualmente estão na margem de 10 a 40% do RT. A Figura 5 ilustra a realização do ensaio.



Figura 5 - ensaio de fadiga por compressão diametral

A principal vantagem do ensaio é de fato a sua simplicidade. Contudo segundo Colpo (2014) algumas das desvantagens apresentadas pelo ensaio são o desenvolvimento de deformações permanentes próximas aos frisos que fazem a aplicação das cargas, podendo minimizar a vida de fadiga do material. Além disso, pode-se citar o tempo que demanda sua realização e a falta de controle das deformações, sendo portanto ineficiente para estudo de fadiga em misturas asfálticas.

2.4.2 Ensaio de fadiga à flexão de quatro pontos em viga

O ensaio é normatizado pela AASHTO T 321- 07, ASTM D 7460 e pela norma européia EN 12697-24. No procedimento realizado pela ASHTO T 321- 07 as vigotas são submetidas à flexão, sem a influência de esforços cortantes ou normais. Ocorre em temperatura controlada de $20\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, e frequência atendendo ao intervalo entre 5 e 10Hz. De acordo com

Pinto (1991) o carregamento é aplicado por um sistema servo-pneumático, por meio de um pulso na forma senoidal.

Assim submete-se a vigota de asfalto, na condição de simplesmente apoiada, a uma carga vertical na faixa do terço médio, assim no centro a viga está submetida a um momento máximo ou mínimo constante, e não existem tensões de cisalhamento, ou seja, o corpo-de-prova está submetido à flexão pura. De acordo com Colpo (2014) o equipamento reproduz a forma senoidal, além de apresentar mobilidade livre de rotação e translação na direção horizontal dos pontos onde a carga é aplicada e onde ocorre reação. A figura 6 ilustra o esquema de aplicação de cargas.

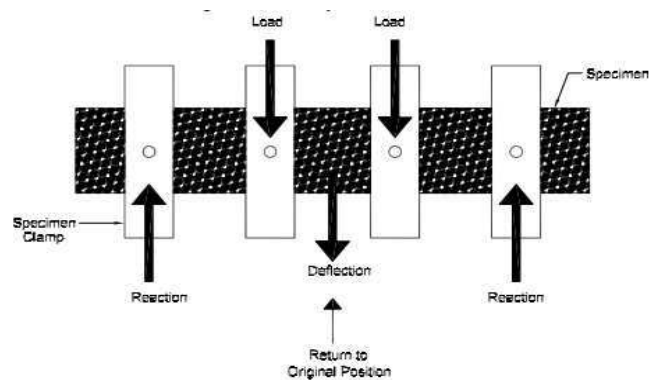


Figura 6 - Equipamento de fadiga à flexão em viga por quatro pontos (AASHTO T 321/07)

Os momentos máximo e mínimo no centro da viga, são gerados devido à inversão da força, o tempo entre as inversões completa um ciclo, quando a força atua em um sentido gera tração nas fibras superiores e quando a força está no sentido oposto nas fibras inferiores. De acordo com Loureiro (2003) quando o corpo de prova rompe é formada na região central da viga, onde se tem o momento constante, uma trinca única. Para cada ciclo de carga, o sistema mede o deslocamento que ocorreu no centro da viga, então a deformação é registrada, e os ciclos continuam até que a deformação apresentada seja constante. A Figura 7 mostra a realização do ensaio.



Figura 7 - Realização do ensaio de fadiga à flexão de quatro pontos em viga (MONTEIRO, 2003)

Através de estudos em laboratório da vida de fadiga em misturas asfálticas Di Benedetto et al.(2004) analisando diferentes formas dos corpos de prova e equipamentos, concluíram que apenas nos ensaios uniaxiais em corpos de prova cilíndricos se tem deformações homogêneas. Tanto o ensaio de tração indireta por compressão diametral e quanto flexão de viga em quatro pontos, apresentam um estado não homogêneo, o que significa que na seção transversal do corpo de prova em diferentes pontos do material se tem diferentes estados de tensão/deformação. De acordo com os autores os ensaios de vida de fadiga são muito sensíveis, podendo apresentar relativamente alta discrepância de resultados, por isso é importante ter uma análise estatística desses resultados. Para se ter um controle desses resultados deve-se atentar para a calibração do equipamento, alinhamento do corpo de prova, que os carregamentos sejam transmitidos da forma correta, e que as leituras não sejam influenciadas pela rigidez do equipamento.

2.5 Comportamento Viscoelástico das misturas asfálticas

O comportamento mecânico dos materiais depende das suas propriedades, e para prever esse comportamento é necessário compreender também como esses materiais respondem às solicitações (tensão-deformação). De acordo com Christensen (2003) os materiais viscoelásticos exibem um comportamento mecânico que não se enquadram na teoria de elasticidade linear ou da viscosidade. Os materiais elásticos possuem a propriedade de armazenar energia mecânica sem haver dissipação, já um fluido viscoso dissipa energia sem armazená-la. Assim os materiais viscoelásticos são aqueles que apresentam comportamento

interpretado como a combinação do apresentado por materiais elásticos e viscosos, e possuem capacidade tanto de armazenar quanto de dissipar energia mecânica.

Segundo Coutinho (2012) quando submetidos a carregamentos de curta duração (frequência alta) os materiais viscoelásticos apresentam comportamento próximo ao dos materiais elásticos armazenando a energia mecânica. Contudo, ao serem submetidos a cargas lentas (baixa frequência) apresentam comportamento semelhante ao dos materiais viscosos apresentando deformações permanentes devido à dissipação da energia mecânica.

De acordo com Mello (2008) na maioria das pesquisas com misturas asfálticas admite-se que esses materiais possuem comportamento viscoelástico. Contudo, em determinadas condições que não são tão raras, esse material apresenta parcelas plásticas, elásticas e viscoplásticas. A Figura 8 mostra as parcelas de deformação de um material visco-elastoplástico que foi submetido a uma determinada sollicitação. É possível observar que quando é aplicado um carregamento em um material viscoelástico e mantido constante pelo período T_L , de imediato ocorre a deformação ϵ_0 , que é composta pelas parcelas elástica (ϵ_e) e plástica (ϵ_p). Em seguida, durante o tempo em que o carregamento é aplicado ocorrem deformações viscoelásticas e viscoplásticas (ϵ_{ve} e ϵ_{vp}). Ao ser retirado o carregamento, ocorre uma deformação elástica instantaneamente e outra parte de deformação viscoelástica durante esse período sem carga, assim ocorre o acúmulo de deformações plásticas no material.

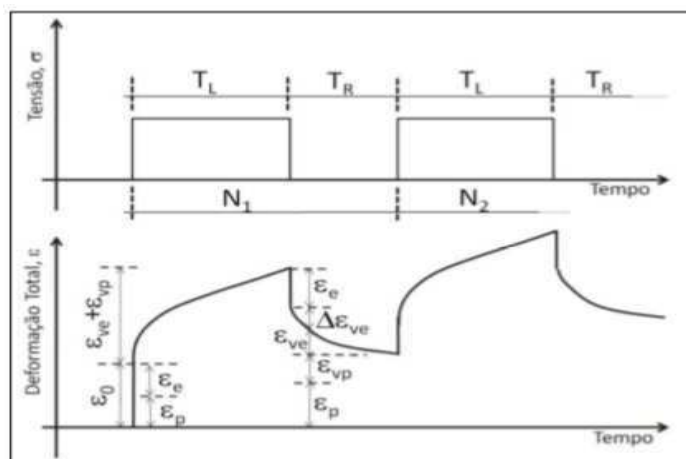


Figura 8 - Representação das componentes da deformação (Sades et al. 1985)

De acordo com Christensen (2003) a resposta de deformação de um material viscoelástico não depende apenas da tensão aplicada naquele dado instante, mas é o resultado

do histórico de tensões ao qual foi submetido, assim estes caracterizam-se pelo chamado efeito memória. Portanto o comportamento de um material viscoelástico linear, pode ser representado de acordo com o princípio da superposição de Boltzmann (Boltzmann, 1974) através das chamadas integrais hereditárias ou Integrais de Superposição de Boltzmann e por meio das Equações 3 e 4 pode ser definido a relação entre tensão e deformação .

$$\sigma_{ij} = \int_0^t E_{ijkl}(t - \tau) \times \frac{d\varepsilon_{kl}}{d\tau} \times d\tau \quad \text{Equação 3}$$

$$E_{ij} = \int_0^t F_{ijkl}(\tau) \times \frac{d\varepsilon_{kl}}{d\tau} \times d\tau \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

E = módulo de relaxação;

F = função de fluência;

σ = tensão;

ε = deformação;

t = tempo total à partir de um determinado referencial (início do ensaio);

τ = variável de integração.

Conforme analisa Coutinho (2012) o módulo de relaxação “E” da Equação 3 é a representação da função analítica de um material solicitado por uma deformação constante, o ensaio é denominado relaxação. A função fluência “F” (*creep compliance*) da Equação 4 é a função analítica para o material sendo solicitado por uma tensão constante, o ensaio é denominado creep estático e avalia a fluência.

De acordo com Mello (2008) à partir das integrais infere-se que a tensão ou a deformação para um tempo presente “t” de um material submetido a uma deformação ou tensão, é uma superposição entre as taxas de deformação ou tensão no tempo “ τ ”, multiplicadas pela função do material no intervalo de tempo (t - τ) que passou desde o instante em que a tensão ou deformação foi aplicada. Essas duas funções características das integrais relacionam o estado presente do material com o já observado.

O comportamento descrito acima para materiais viscoelásticos correspondem às solicitações de carregamento monotônico. As solicitações harmônicas ou oscilatórias são representadas pelo módulo complexo que é a relação entre a tensão e deformação complexa.

Portanto os parâmetros que definem as propriedades mecânicas dos materiais viscoelásticos sob solicitações harmônicas são o módulo complexo (E) e o ângulo de fase (φ), e o sinal de deformação é sempre defasado do de tensão pelo ângulo de fase (φ), as equações 5 e 6 apresentam o comportamento descrito.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \times \sin(\omega t) \quad \text{Equação 5}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ε = deformação;

σ_0 = tensão;

ω = frequência angular;

φ = o ângulo de fase.

O módulo complexo é uma variável complexa, possuindo partes reais e imaginárias, sendo definido pela Equação 7. A parcela da Equação 8 E' representa a energia mecânica armazenada e é conhecida por Módulo de Estocagem, a representada na Equação 9 E'' é conhecido por módulo de perda e representa a energia dissipada durante um ciclo. O valor em absoluto do módulo complexo é o módulo dinâmico e é definido pela relação complexa entre tensão e deformação durante uma solicitação harmônica.

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Equação 7}$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi = |E^*| \cdot \cos \varphi \quad \text{Equação 8}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi = |E^*| \cdot \sin \varphi \quad \text{Equação 9}$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 10}$$

Onde o módulo dinâmico E^* está vinculado à frequência de carregamento e temperatura. O módulo dinâmico descreve o comportamento de materiais viscoelásticos lineares, associado ao ângulo de fase que também depende dos fatores temperatura e frequência de carregamento. Nas temperaturas baixas os materiais viscoelásticos apresentam um

comportamento próximo do elástico ($\varphi \approx 0^\circ$), já em temperaturas elevadas o comportamento tende ao viscoso ($\varphi \approx 90^\circ$).

Segundo Muliana e Khan (2008) de acordo com as respostas reológicas diferentes dos materiais viscoelásticos para temperaturas diferentes eles podem ser classificados como Materiais Termo-reologicamente simples (MTS) ou Termo-reologicamente complexos (MTC), assim se a temperatura influencia principalmente no tempo, este pode ser classificado como MTS ou se afeta as propriedades elásticas iniciais, de equilíbrio (a longo prazo) e o fator tempo podem ser considerados como MTC's.

Segundo Silva (2009) os estudos clássicos da teoria da viscoelasticidade linear dissertam que para descrever o comportamento dos materiais viscoelásticos é necessário uma enorme faixa de tempo, em torno de 10 a 15 ordens logarítmicas. A solução para esse problema é o Princípio da Superposição de Tempo e Temperatura, que possibilita derivar de curvas de propriedades viscoelásticas (módulo complexo, fluência, relaxação) para uma certa temperatura por meio de curvas em temperaturas diferentes.

Portanto, é substituída a realização de um ensaio muito longo por um ensaio curto, mas com temperaturas diferentes. De acordo com Mello (2008) devido às limitações tanto dos equipamentos como de tempo, a determinação do módulo dinâmico é feita através da curva mestre (Master Curve). A curva mestre é obtida por meio de deslocamentos horizontais, os fatores de deslocamento, no tempo (eixo da frequência), ou seja, através dessa curva se pode obter o módulo dinâmico em qualquer temperatura ou frequência, por meio de uma superposição de temperatura e tempo. Por meio da superposição entre tempo e temperatura é possível obter curvas derivadas de propriedades viscoelásticas (podem ser módulo, fluência, relaxação...) em uma temperatura T por meio de curvas em uma determinada temperatura T_1 através da translação do gráfico com eixos logarítmicos, assim várias curvas em diferentes temperaturas podem ser transformadas em uma única curva com a temperatura de referência T_R , a curva mestra.

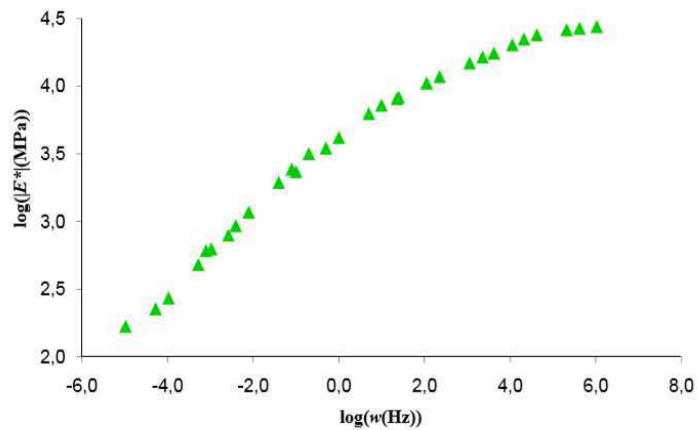


Figura 9 - Curva mestra para a temperatura de referência 21,1 ° (Coutinho, 2012)

A determinação do fator de deslocamento ou translação (a_T) pode ser feita de diferentes formas, sendo uma das mais populares a função sigmoideal, apresentada na Equação 11.

$$|E^*| = \delta + \frac{\vartheta}{1 + \exp(\beta + \gamma \cdot \text{Log}(1/\omega_r))} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

δ = valor mínimo do módulo dinâmico (E^*);

$\delta + \vartheta$ = o valor máximo do módulo dinâmico (E^*);

β e γ = parâmetros da função senoidal;

ω_r = frequência reduzida.

O fator translação a_T define o deslocamento necessário para uma determinada temperatura, e é determinado de acordo com a Equação 12.

$$a_T = \frac{t}{t_r} = \frac{\omega_r}{\omega} \quad \text{Equação 12}$$

Tem-se que a_T é a translação em função da temperatura, t é o tempo para carregamento em uma determinada temperatura e t_r o tempo de carregamento para a temperatura de referência.

$$\text{Log}(a_T) = a \cdot T_i^2 + b \cdot T_i + c \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

a_T : a translação pela temperatura;

Coefficientes a, b e c : são determinados quando a curva mestra está sendo construída.

2.6 Modelo do dano em meio contínuo (VECD)

Diversos dos materiais da Engenharia Civil são submetidos à carregamentos cíclicos, assim, com o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos, o estudo do dano passou a um novo patamar. Com a necessidade de caracterizar o dano por fadiga em pavimentos asfálticos de forma mais precisa e eficiente, foram realizadas diversas pesquisas buscando representar o acúmulo de dano no material associado às premissas do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Surgiu então o VECD para análise de fadiga, que associado ao dano, fornece resultados de forma consideravelmente mais rápida e com maior precisão.

De acordo com Coutinho (2012) o dano por fadiga se dá por meio da formação e crescimento das micro e macro trincas, ocasionadas pelos carregamentos cíclicos dos veículos e constantes mudanças de temperatura a que estão submetidos os pavimentos asfálticos. Anteriormente o estudo do dano nas misturas asfálticas se restringia às curvas de Whöler e aos conceitos clássicos da teoria da mecânica da fratura. Segundo Underwood (2011) a mecânica da fratura relaciona o comportamento do material com o surgimento das microtrincas. Por meio dessa teoria a estrutura interna do material é considerada como homogênea, ignorando as descontinuidades presentes no interior, assim se pressupõe que apenas a estrutura macroscópica do material interfere no seu comportamento em resposta aos carregamentos dinâmicos. Portanto, diversos pesquisadores estudaram a aplicação de conceitos já existentes na mecânica, o dano em meio contínuo.

O processo de microfissuração é contínuo e tem início com baixas tensões, o crescimento e desenvolvimento dessas microtrincas leva à formação de deformações permanentes. krajcinovic (1989) um dos precursores da teoria de dano em meio contínuo, enfatiza a importância das microtrincas na resposta dos materiais sólidos às solicitações. O modelo de dano em meio contínuo assume a contínua perda de resistência e rigidez do material em virtude da microfissuração, e estuda como as mudanças na microestrutura dos materiais se tornam responsáveis pelo seu comportamento em macroescala.

A teoria original do dano em meio contínuo foi desenvolvida por Schapery (1981), baseado em variáveis de condição interna de fissuração e aplicando equações viscoelásticas e

viscoplásticas. Mais tarde Kim e Little (1990) adaptaram a teoria de Schapery do dano associada com a viscoelasticidade não linear para misturas de areia e asfalto sujeitas a cargas cíclicas, surgindo a teoria viscoelástica de dano em meio contínuo. De acordo com Teixeira (2007) as pesquisas desenvolvidas por Schapery (1990), Park et al. (1996) e Lee e Kim (1998) são as principais bases da teoria.

Lee e Kim (1998) desenvolveram o modelo VECD demonstrando a sua aplicabilidade para concretos asfálticos que são submetidos a cargas controladas por tensão ou deformação. Em seguida surgiram vários estudos aprimorando o VECD, dentre os quais se pode citar o de Daniel e Kim (2002) que constataram experimentalmente que a função $C(S)$ não depende das condições de aplicação das cargas em um mesmo material. Underwood et al.(2006) e Underwood et al. (2009) legitimaram o uso em ligantes modificados, encontrando elevada correspondência entre o desempenho das misturas asfálticas por meio do VECD e o encontrado por meio dos simuladores de tráfego.

De acordo com Coutinho (2012) o modelo VECD (modelo viscoelástico de dano em meio contínuo) faz uma relação entre o comportamento dos materiais viscoelásticos e o dano, por meio de ensaios rápidos e com grande precisão, simplificando a previsão do fenômeno da fadiga.

A análise da fadiga por meio desse modelo se dá por duas variáveis dos materiais: a rigidez e o dano. Nascimento (2015) afirmou que a rigidez do material pode ser analisada por meio do módulo da secante instantâneo. Para quantificar o dano, uma das teorias mais aceitas é a do Work Potencial Theory (WPT) desenvolvida por Schapery (1990), nesse modelo são aplicadas variáveis de estado interno para determinar o dano. De acordo com Lundstron e Isacsson (2003) o trabalho ocorre sem depender da trajetória do carregamento, assim se ocorre um aumento do dano, este aumento se deve apenas a uma carga externa. Portanto, aplicando esses conceitos, a variável dano (S) descreve as mudanças que ocorrem na estrutura do material.

Por meio da aplicação da WPT em misturas asfálticas é possível estudar como evolui o dano nos pavimentos submetidos à carregamentos cíclicos. Segundo Mello (2008) o estudo do dano é realizado pela Curva Característica, esta depende da pseudo-rigidez e do dano para ser construída. Park et al. (1996) representaram o dano em função da taxa de carregamento na Equação 14:

$$D_m = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial D_m}\right)^{\alpha_m} \quad \text{Equação 14}$$

Onde :

W^R = a energia de pseudo-deformação;

α_m = uma constante de acordo com o material;

m = variáveis referentes ao dano.

A pseudo-rigidez (C) é obtida por meio da relação entre tensão aplicada no material e a pseudo-deformação gerada na Equação 15:

$$C = \frac{\sigma}{\epsilon^R} \quad \text{Equação 15}$$

A Figura 10 é uma demonstração da Curva Característica do dano, obtida para análise de fadiga pelo modelo VECD, e mostra como o dano evolui no interior do material.

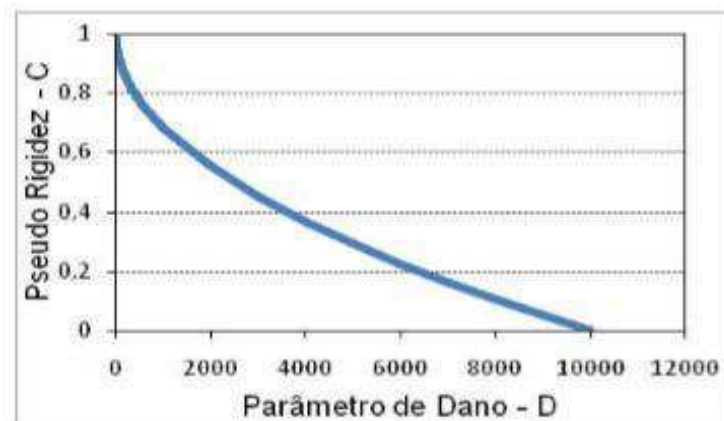


Figura 10 - Curva Característica do dano por fadiga (Mello, 2008)

Em sua pesquisa, Daniel e Kim (2002) conseguiram resultados relevantes e próximos dos obtidos em campo, o dano foi medido por meio de ensaios de tração direta monotônicos. Os ensaios monotônicos eram a forma de avaliação do dano por meio do VECD, já são bem mais simples do que os cíclicos para obter as curvas de dano. Contudo de acordo com Schuster (2018) não é possível obter nenhum critério de fadiga dessas curvas, já que não foram realizados ciclos de carga.

Pesquisas mais recentes de Underwood et al. (2010) e Underwood et al. (2012) tornaram possível a análise de fadiga por meio do modelo viscoelástico de dano simplificado

(S-VECD). Nesse modelo se faz a análise do dano em meio contínuo para cargas cíclicas, tornando possível a análise da vida de fadiga para misturas asfálticas.

De acordo com Kim (2009) o modelo de S-VECD permite fazer a caracterização do dano por fadiga, em um tempo menor e por meio de carregamentos cíclicos. Como critério de falha Sabouri e Kim (2014) propuseram o parâmetro " G^R " que é baseado na taxa em que ocorre liberação da energia de pseudo-deformação. Por meio desse critério os testes foram resumidos para caracterização em uma única temperatura e com apenas um carregamento. As vantagens do S-VECD segundo Nascimento et al. (2014) é que se pode ter as propriedades de dano do material, independente das condições em que o ensaio foi realizado (amplitude, temperatura, tensão e deformação), economizando tempo para realização dos ensaios laboratoriais.

Nas pesquisas realizadas nos Estados Unidos, o método para analisar o dano dos materiais por fadiga comumente utilizado é obtido através do reômetro de cisalhamento dinâmico DSR, através do parâmetro $|G \times| \sin \delta$. Uma grande crítica ao estudo de fadiga por meio desse parâmetro é que essa análise é apenas para o ligante asfáltico, e não para a mistura. Outra crítica apontada por Bahia et al. (2002) é em relação a forma com que o parâmetro é utilizado, que não é adequado para caracterização do dano por fadiga, pois é apenas uma medida inicial de uma propriedade viscoelástica do material não danificado. A especificação SUPERPAVE quando desenvolvida presumiu que o asfalto atua principalmente no regime viscoelástico linear, entretanto, em pesquisas posteriores nas quais foi possível concluir que este não é o comportamento do ligante ao ser aplicado como revestimento asfáltico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS:

3.1 Materiais:

3.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nessa pesquisa foi o Cimento Asfáltico de Petróleo de CAP 50/70, mais utilizado no Nordeste (Figura 11) e foi fornecido pela empresa Rocha Cavalcante de Campina Grande- PB.



Figura 11 - CAP 50/70 utilizado na pesquisa

3.1.2 Agregados

Os agregados graúdos foram a brita 19,1mm e a brita 12,5mm. Os agregados miúdos foram a areia e o pó de pedra. O fíler foi a cal hidratada da marca Megaó obtida no comércio de Campina Grande-PB. Os agregados foram fornecidos pela Pedreira Rocha Cavalcante. Os materiais foram dosados através do método SUPERPAVE, e as amostras foram selecionadas por quarteamento através da norma DNER-PRO 199/96.

3.2 Métodos

3.2.1 Propriedades físicas dos agregados

A metodologia utilizada para a caracterização dos materiais está especificada no fluxograma da Figura 12. Os métodos dos ensaios foram baseados nas especificações da

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (American Society for Testing Materials), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

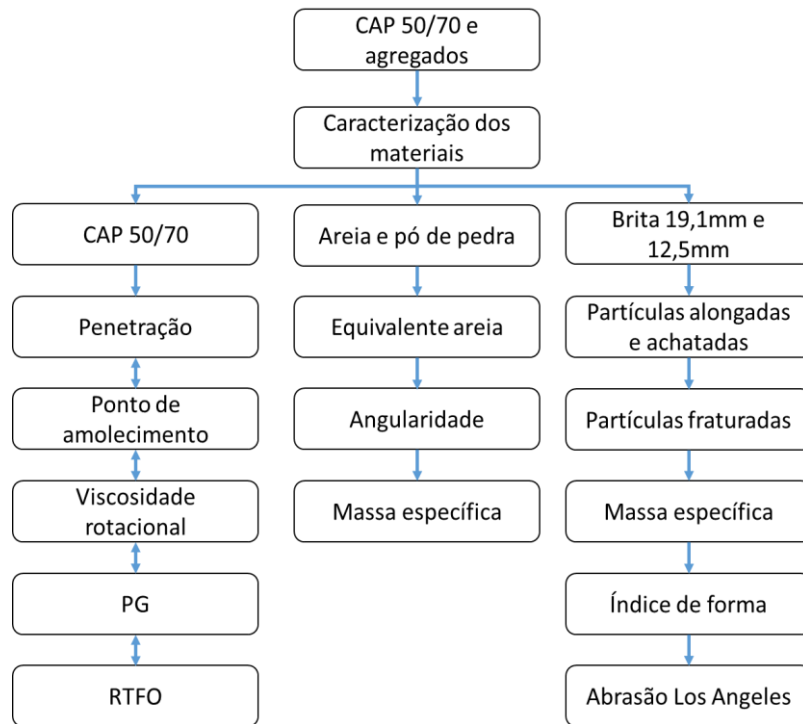


Figura 12 - Fluxograma da caracterização dos materiais

Na Tabela 1 são apresentadas as normas que regem os ensaios de caracterização física dos agregados.

Tabela 1 - Normas dos ensaios de caracterização dos agregados

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica do agregado miúdo	NBR NM 52/2009
Massa específica agregado graúdo	DNIT - ME 081/98
Equivalente de areia	DNER- ME 054/97
Angularidade	ASTM C 1292-93
Partículas alongadas e achatadas	ASTM D 4791/10
Partículas fraturadas	ASTM D 5821/13
Abrasão Los Angeles	DNIT - ME 035/98
Absorção	DNIT - ME 081/98

3.2.1.1 Análise granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos conforme a norma DNIT - ME 083/98, utilizando as peneiras de abertura de 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm. Os agregados foram colocados em estufa por 4 horas, na temperatura de 110°C, para retirada da umidade; em seguida foi realizado o peneiramento de forma manual, obtendo as porcentagens das diferentes faixas de tamanho de grãos em relação à massa total conforme ilustra a Figura 13 e a distribuição granulométrica dos agregados é apresentada na Tabela 3 e Figura 14.



Figura 13 - Granulometria da areia (esquerda) e pó de pedra (direita)

Tabela 2: Granulometria dos agregados

QUANTIDADE PASSANTE ACUMULADA (%)					
Peneira	Peneira	Areia	Pó de pedra	Brita 12,7	Brita 19,1
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	98,02
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	28,98
3/8"	9,5	100,00	100,00	87,34	3,59
Nº 4	4,8	99,36	99,98	16,98	0,08
Nº 10	2	97,58	80,28	0,46	0,06
Nº 40	0,42	72,38	40,37	0,34	0,05
Nº 80	0,18	5,61	23,33	0,16	0,04
Nº 200	0,074	0,46	10,16	0,10	0,02

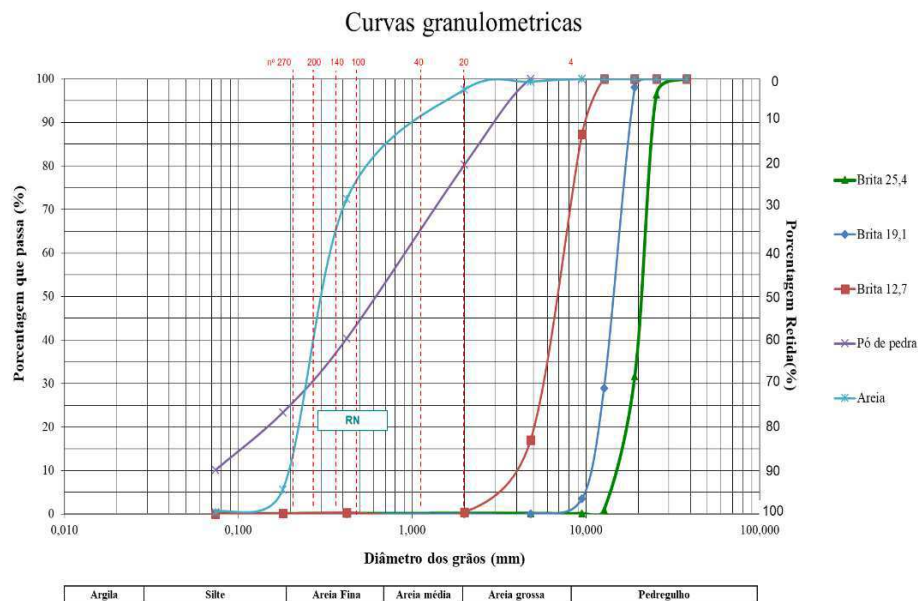


Figura 14 - Distribuição granulométrica dos agregados

3.2.1.2 Massa específica e absorção

Para os agregados graúdos, os ensaios de massa específica e absorção foram realizados de acordo com a especificação do DNIT - ME 081/98. Para os agregados miúdos, a massa específica foi regida pela norma NBR NM 52/2009 e a absorção pela NBR NM 30/01.

O objetivo do ensaio de massa específica é determinar a relação entre a massa e volume do agregado seco, excluindo os poros permeáveis para a massa específica real, e incluindo para a massa específica aparente. A absorção é uma relação em porcentagem de massa seca, que expressa o aumento de massa do agregado quando seus poros permeáveis estão preenchidos por água, que é absorvida (pelos agregados graúdo e miúdo) após o período de imersão. A Figura 15 mostra a realização do ensaio na areia.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de massa específica real e aparente, e de absorção. É possível perceber que os valores de absorção atenderam ao limite máximo estabelecido por norma, e esses dados foram utilizados na determinação do teor ótimo de CAP na dosagem SUPERPAVE.



Figura 15 - Ensaio de massa específica na areia

Tabela 3 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdos

AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA REAL	MASSA ESPECÍFICA APARENTE	ABSORÇÃO OBTIDA (%)	ABSORÇÃO MÁXIMA (%)
Brita 19,1mm	2,75	2,74	0,39	2,00
Brita 12,5 mm	2,75	2,73	0,60	2,00
Areia	2,50	2,42	0,26	--
Pó de pedra	2,70	2,58	0,36	--

3.2.1.3 Equivalente de areia

O ensaio foi realizado conforme as especificações da norma DNER ME 054/97, consiste em adicionar a uma proveta graduada o agregado passante na peneira de abertura 4,75mm (Nº4), e uma solução defloculante que faz com que as partículas argilosas aderidas ao material se soltem, assim agita-se a proveta vigorosamente por 30 segundos. O resultado é a relação entre as leituras das alturas no topo da areia e de argila, conforme é ilustrado na Figura 16.

Os resultados são apresentados na Tabela 5, e de acordo com a norma DNIT 031/2004 – ES o valor mínimo do equivalente areia é de 55% para a pavimentação. A areia atendeu

perfeitamente a especificação, contudo o pó de pedra apresentou resultado abaixo do mínimo, é importante salientar que a presença de fino influenciou diretamente o resultado, visto que o pó de pedra não apresenta material argiloso em sua constituição.

Tabela 4 - Resultados do ensaio equivalente de areia

ENSAIO	AREIA	PÓ DE PEDRA	REQUISITO MÍNIMO
Equivalente areia(%)	86,39%	47,20%	55%



Figura 16 - Ensaio de equivalente areia realizado na areia

3.2.1.4 Angularidade

O objetivo do ensaio de Angularidade do Agregado Fino, desenvolvido pela National Aggregated Association, é determinar a angularidade e a textura da superfície dos agregados finos. Estima-se a angularidade dos agregados finos determinando os vazios da amostra na condição não compactada. No ensaio se faz o lançamento da amostra de uma altura pré-estabelecida em um cilindro de volume 100 cm^3 , o excesso de material é retirado do topo do cilindro cuidadosamente com uma espátula para não haver compactação, conforme é ilustrado na Figura 17.

Os vazios são determinados pela diferença entre o volume do cilindro vazio e o volume do cilindro cheio. De acordo com Gouveia (2002) se as partículas de agregado apresentarem

uma superfície mais lisa e arredondada, estas se acomodam melhor umas com as outras, apresentando um volume de vazios menor que as de superfície rugosa e com angularidade, e estas proporcionam um intertravamento das partículas melhor e uma mistura mais estável.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C 1252/17 para o Método C e o resultado é a média de duas amostras. Na Tabela 6 são apresentados os resultados de vazios não compactados, e de acordo com Bernucci (2010) para as especificações SUPERPAVE o valor mínimo de angularidade deve ser de 45%, portanto a areia e o pó de pedra atenderam aos requisitos.

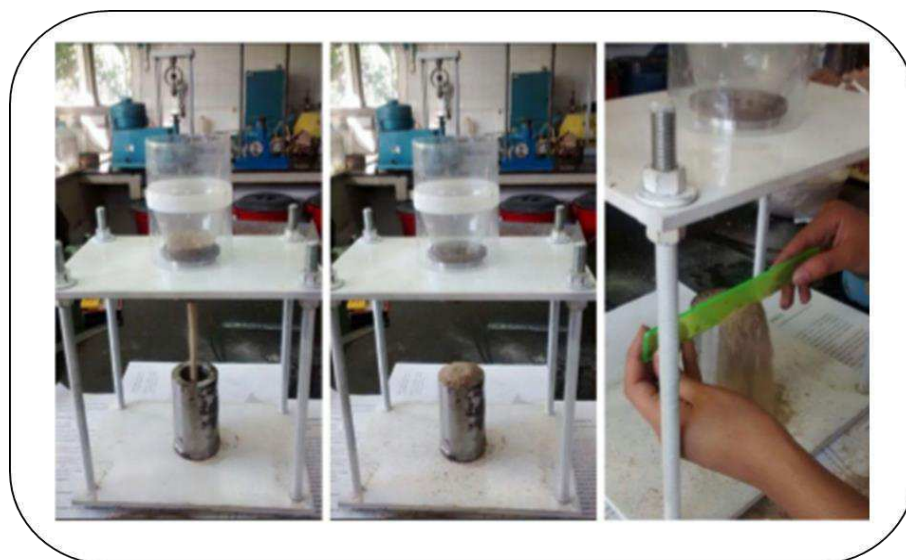


Figura 17 - Ensaio de angularidade na areia (Costa, 2017)

Tabela 5 - Densidade aparente e vazios não compactados dos agregados finos

MATERIAL	DENSIDADE APARENTE(g/cm^3)	VAZIOS NÃO COMPACTADOS (%)	CRITÉRIO	Requisito mínimo (%)
Areia	2,50	45,76	Método B	45
Pó de pedra	2,70	46,58		

3.2.1.5 Partículas alongadas e achatadas

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D 4791/10, obtendo a porcentagem de partículas alongadas e achatadas contidas no agregado graúdo. As partículas alongadas e achatadas do agregado tendem a fraturar mais facilmente, o que pode mudar a graduação e ser prejudicial para a mistura. No ensaio a amostra passa pela peneira de abertura 12,7mm (1/2") para a brita 12,5mm e de 19mm (3/4") para a brita 19,1mm para separar os agregados maiores, e então cada partícula é testada em um dispositivo de calibre na proporção de 5:1 de comprimento e espessura. As partículas que passaram pelo dispositivo são então pesadas para obter a porcentagem de partículas alongadas e achatadas, conforme ilustra a Figura 18.

A especificação Superpave estabelece que para asfalto misturado a quente essa porcentagem deve ser menor do que 10%, os resultados são apresentados na Tabela 7, e estão dentro do limite estabelecido.

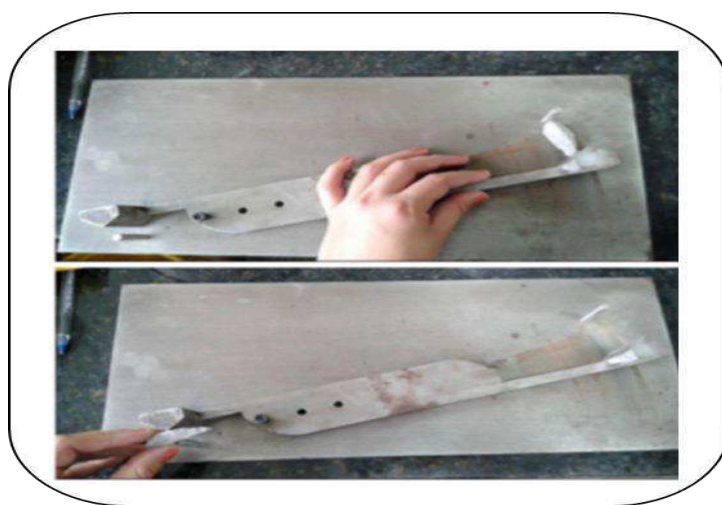


Figura 18 - Medição para obter as partículas alongadas e achatadas

Tabela 6 - Resultado do ensaio de partículas planas e alongadas

Ensaio	Critério	Brita 12,5mm	Brita 19,1mm
Partículas alongadas e achatadas (%)	5:1	1,00	1,07

3.2.1.6 Partículas fraturadas

O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma ASTM D 5821/13. À partir da amostra, observou-se partícula a partícula o número de faces fraturadas, e estas foram separadas em partículas com duas ou mais faces fraturadas e não fraturadas. A norma considera face fraturada como possuindo forma e borda bem definidas, e área de no mínimo 25% da área projetada da partícula, pode ser produzida por processos mecânicos como é o caso da britagem ou por processos naturais. As especificações para porcentagem de partículas fraturadas, possuem o objetivo de maximizar a resistência ao cisalhamento nas misturas, as faces fraturadas indicam a angularidade do agregado, e garantem que o atrito entre os agregados torne a mistura mais resistente às deformações permanentes.

Os resultados para a brita 12,5mm e 19,1mm são apresentados na Tabela 8, de acordo com Bernucci et al. (2010) as especificações SUPERPAVE estabelecem que o valor mínimo de partículas fraturadas deve ser 90%, portanto os agregados atendem satisfatoriamente o requisito mínimo.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de partículas fraturadas

AGREGADO	PARTÍCULAS FRATURADAS (%)	CRITÉRIO	REQUISITO MÍNIMO
Brita 19,1mm	99,88	Duas ou mais faces fraturadas	90%
Brita 12,5mm	99,89		90%

3.2.1.7 Índice de forma

O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma DNIT ME 086/94, e foram utilizados conjuntos de crivos de abertura circular e crivos redutores com abertura retangular. De acordo com Bernucci et al. (2010) a forma dos agregados afeta a trabalhabilidade da mistura e a resistência ao cisalhamento, quanto mais cúbica for a forma dos agregados e suas arestas mais afiadas, melhor será o intertravamento dos grãos compactados. Assim, o índice de forma (f) varia de 1,0 para agregado com ótima cubicidade e 0,0 para agregado lamelar.

A Tabela 9 apresenta os resultados, e de acordo com Bernucci et al. (2010) para atender aos requisitos mínimos o menor valor de f deve ser 0,5, percebe-se, portanto, que as britas 12,5mm e 19,1mm atenderam perfeitamente a recomendação.

Tabela 8 - Resultado do índice de forma

AGREGADO	ÍNDICE DE FORMA	CRITÉRIO	REQUISITO MÍNIMO
Brita 12,5mm	0,74	0<f<1	0,5
Brita 19,1mm	0,88	f=1 cúbico f=0 lamelar	

3.2.1.8 Abrasão Los Angeles

O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma DNIT ME 035/98. O mesmo consistiu em colocar a amostra de agregado graúdo na máquina Los Angeles, junto com uma carga abrasiva, e submeter à rotações com velocidade média de 30 rpm e assim verificar o desgaste do agregado, conforme ilustra a Figura 19. O valor do desgaste é obtido em porcentagem de peso do material passante na peneira de 1,7mm (N°12) de malha quadrada.

Para que o agregado seja resistente aos processos de usinagem e compactação, além do carregamento do tráfego e desgaste pelas intempéries do clima, a especificação DNIT 031/2006 ES recomenda um valor de no máximo de desgaste igual ou inferior a 50%. O ensaio foi realizado apenas para a brita 19,1mm, uma vez que a 12,5mm é da mesma pedreira. Foi obtida uma abrasão de 21,01%, atendendo ao critério máximo por norma e os resultados são apresentados na Tabela 10.



Figura 19 - Ensaio abrasão Los Angeles

Tabela 9 - Resultados de abrasão Los Angeles

ENSAIO	CRITÉRIO (%)		AGREGADO GRAÚDO
	Mínimo	Máximo	Brita 19,1mm
Abrasão Los Angeles	-	50%	21,01%

3.2.2 Caracterização do Cimento asfáltico de Petróleo (CAP)

O Fluxograma da Figura 20 apresenta os ensaios de caracterização realizados e a Tabela 11 as respectivas normas dos ensaios.

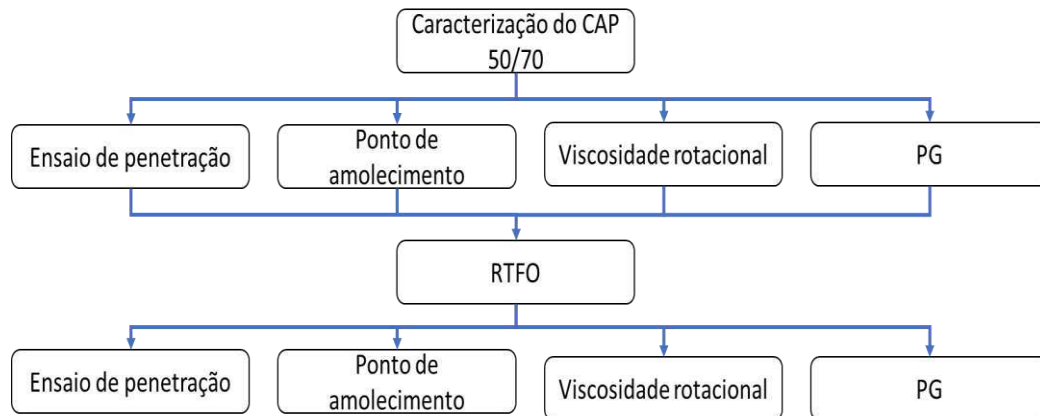


Figura 20 - Fluxograma da caracterização do CAP

Tabela 10 - Normas dos ensaios de caracterização do CAP

CARACTERIZAÇÃO DO CAP	
Penetração	DNIT 155/2010- ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010
Viscosidade rotacional	ABNT NBR 15184:2007
PG	ASTM D 6373-16
Procedimento RTFO	ASTM D 2872/12

3.2.2.1 Procedimento de envelhecimento à curto prazo (RTFO)

O procedimento de RTFO foi realizado de acordo com a ASTM D 2872/12. A amostra de 35g aproximadamente é levada à estufa RTFO com prateleiras giratórias a uma temperatura de 163°C, dura cerca de 85 minutos e são realizadas injeções de ar na amostra. O objetivo é simular o envelhecimento que ocorre durante a usinagem e compactação do asfalto. Após a realização do envelhecimento à curto prazo RTFO foram executados novamente os ensaios de caracterização, a fim de verificar o efeito do envelhecimento no CAP.

3.2.2.2 Penetração

O ensaio é regido pela norma DNIT 155/2010- ME. Consiste na profundidade, medida em décimos de milímetros, que uma agulha padrão penetra durante 5 segundos uma amostra de ligante asfáltico na temperatura de 25°C. O ensaio foi realizado em duplicata, e foram realizadas cinco medições, sendo o resultado a média dessas medições. A Figura 21 mostra como é realizado o ensaio.



Figura 21 - Ensaio de penetração

3.2.2.3 Ponto de amolecimento

O ensaio é realizado conforme a norma DNIT 131/2010, e consiste na média das temperaturas em que duas esferas padronizadas, dentro de um béquer com banho de água, atravessam um anel com material asfáltico por uma distância específica, tocando uma placa no fundo. O resultado é média de duas medições, a Figura 22 ilustra a realização do ensaio.



Figura 22 - Ensaio de ponto de amolecimento

3.2.2.4 Índice de Susceptibilidade Térmica

À partir dos valores obtidos nos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, foi calculado o índice de susceptibilidade térmica (IST). Esse parâmetro indica a sensibilidade do ligante asfáltico às variações de temperatura, e quanto maior menos susceptível é o ligante às variações de temperatura. É calculado conforme a Equação 16.

$$IST = \frac{500 \times (\text{LOG PEN}) + 20 \times (T^{\circ}\text{C}) - 1951}{120 - (50) \times (\text{LOG PEN}) + (T^{\circ}\text{C})} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

PEN = penetração na temperatura de 25°C, de uma agulha padrão por 5 segundos na amostra;

(T°C) = temperatura do ponto de amolecimento.

3.2.2.5 Viscosidade Rotacional

O ensaio é realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15184:2007, com o viscosímetro Brookfield modelo DVII. A viscosidade mede o torque para rotacionar o spindle imerso na amostra de asfalto. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 135, 150 e 177°C nas velocidades de 20,50 e 100 rpm respectivamente. A Figura 23 ilustra o viscosímetro utilizado na realização do ensaio.



Figura 23 - Viscosímetro Brookfield utilizado no ensaio de viscosidade

3.2.2.6 Grau de desempenho (PG)

A determinação do grau de desempenho é realizada conforme a norma ASTM D 6373-16. O mesmo consiste na temperatura para a qual o parâmetro $G^*/\sin\delta$ ultrapassa 1,0 Kpa antes do envelhecimento, e após quando ultrapassa 2,2 Kpa. O ensaio foi realizado para intervalos de 6°C, dentro da faixa de temperaturas de 46 a 82°C. A Figura 24 mostra o equipamento utilizado na realização do ensaio, o reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.



Figura 24 - Reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer

Esse teste é utilizado na classificação dos ligantes asfálticos, substituindo as classificações por meio da penetração. Assim, por meio do PG é determinada a máxima temperatura para a qual o ligante mantém sua resistência à deformação permanente e a trincamentos térmicos em temperaturas baixas. A classificação do asfalto por meio desse ensaio é representada por PG XX - XX, em que os dois primeiros dígitos indicam a maior temperatura na qual o ligante é capaz de manter as suas propriedades, e os dois dígitos após o sinal negativo indicam a menor temperatura. Devido às condições climáticas do Brasil, o ensaio foi realizado apenas para a temperatura máxima.

3.2.2.7 Tabela resumo da caracterização do CAP

O ligante asfáltico aplicado nessa pesquisa é classificado como CAP 50/70, atendendo as normas dos órgãos regulamentadores. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11: Tabela resumo de caracterização do CAP

ENSAIO	MÉTODO	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Penetração	DNIT 155/2010-ME	0,1mm	50 a 70	71,60
Penetração retida		%	>55	67,32
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010	°C	>46	48,00
Aumento do ponto de amolecimento			<8	8,00
Índice de susceptibilidade térmica	--	--	(-1,5) a (+0,7)	-0,24
Variação de massa	--	%	<0,5	0,06
Viscosidade rotacional	ABNT NBR 15184:2007	cP	--	--
A 135°C, SP 21, 20 RPM			>274	375,00
A 135°C, SP 21, 20 RPM			>112	187,50
A 177°C, SP 21, 100 RPM			57 a 285	69,25
PG	ASTM D 6373-16	°C	--	64

3.2.3 Dosagem Superpave

A dosagem SUPERPAVE foi realizada para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico na mistura. As etapas da dosagem foram realizadas conforme o fluxograma da Figura 25.

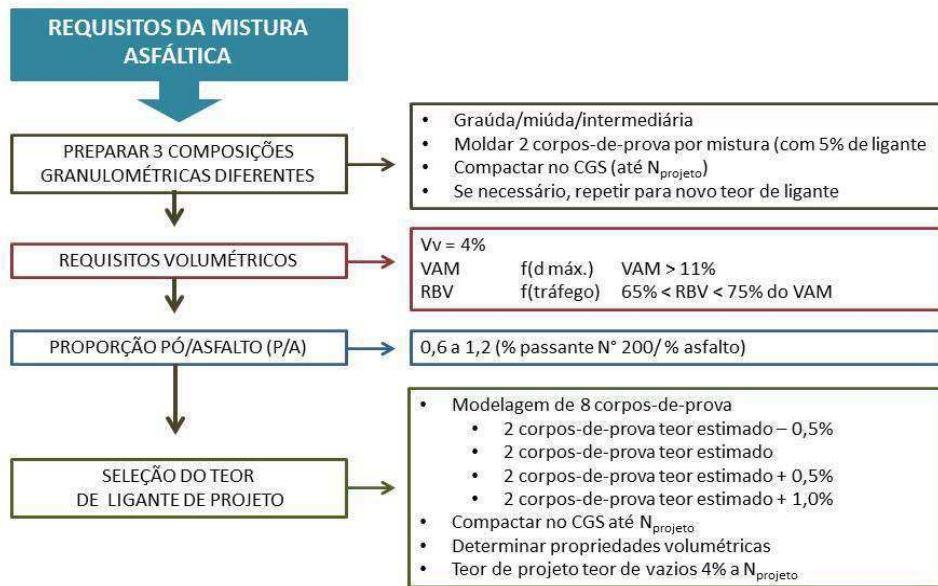


Figura 25 - Fluxograma de doagem SUPERPAVE

Inicialmente procedeu-se escolhendo três composições granulométricas, na Faixa C de granulometria do DNIT, utilizando os agregados disponíveis (brita 19,1mm, brita 12,5mm, areia, pó de pedra e cal). Por meio da granulometria dos materiais, e utilizando uma planilha Excel, foram construídas as três composições que foram testadas (uma superior, uma intermediária e uma inferior), por fim foi escolhida a curva inferior da Figura 26.

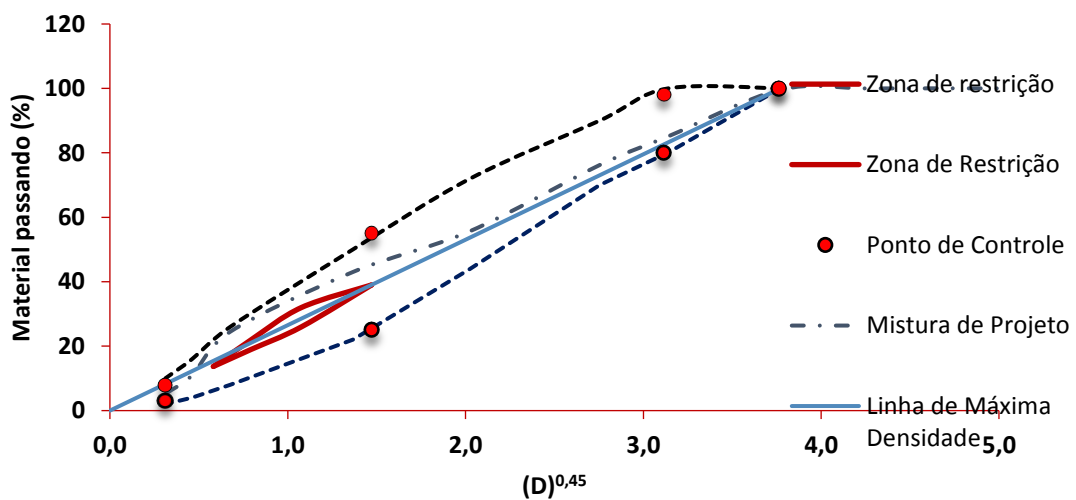


Figura 26 - Gráfico da curva granulométrica superior

Em seguida, procedeu-se com a compactação dos corpos de prova para um teor de ligante para cada mistura, o teor inicialmente adotado foi de 4,5%. Os corpos de prova foram compactados por amassamento no compactador giratório de acordo com a norma ASTM D 6925-09, da Figura 27.



Figura 27 - Compactador giratório SUPERPAVE

Para obter a densidade máxima foi realizado o Rice Test de acordo com a norma ASTM D2041. O ensaio foi executado com 2500g de mistura, que foi inserida em um recipiente metálico, em seguida foi adicionada água ao recipiente na temperatura de 25°C. Durante 15 minutos foi aplicada pressão a vácuo de 30mmHg, retirando os vazios da mistura. Por fim, o recipiente (contendo mistura e água) foi submetido à pressão ambiente e pesado. A Figura 28 ilustra a realização do ensaio, e o parâmetro obtido por meio desse ensaio é a densidade máxima Gmm calculada de acordo com a Equação 17.



Figura 28 - Ensaio de Rice Test

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(C-B)}$$

Equação 17

Onde:

A = massa da amostra seca (g);

B = massa do recipiente metálico com água (g);

C = massa do recipiente com a amostra imerso em água (g).

À partir da massa específica máxima da mistura (G_{mm}), e com a massa específica real e aparente dos agregados foi determinado o teor inicial de ligante que foi de 4,5%. De acordo com a norma ASTM D-6925-09 os corpos de prova foram compactados com números de giro diferentes, levando em consideração o tráfego, assim para um tráfego de Médio a Alto foi considerado $N_{mínimo}$ de 8 giros, $N_{projeto}$ de 100 giros e $N_{máximo}$ de 160 giros aplicados pelo compactador giratório. O $N_{projeto}$ deve atender ao critério de 4% de volume de vazios, e à partir dele é selecionado o teor de ligante asfáltico ótimo da mistura.

À partir do cálculo dos parâmetros volumétricos, definiu-se a curva de projeto como sendo a inferior, uma vez que os valores obtidos foram os que estavam mais próximos da dosagem SUPERPAVE. Em seguida, os corpos de prova foram compactados para as proporções da curva inferior, foram realizados com mais três teores : $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja, 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%. A Tabela 13 apresenta as proporções de agregados para moldagem dos corpos de prova nesses teores, e a Figura 29 mostra os corpos de prova moldados.

Tabela 12 - Proporção de agregados para cada teor de ligante.

BRITA 19,1MM	BRITA 12,5MM	AREIA	PÓ-DE- PEDRA	FÍLER	TEOR DE LIGANTE
20,16%	26,88%	9,60%	38,40%	0,96%	4,0%
20,06%	26,74%	9,55%	38,20%	0,96%	4,5%
19,95%	26,60%	9,50%	38,00%	0,95%	5,0%
19,85%	26,45%	9,45%	37,80%	0,95%	5,5%



Figura 29 - Corpos de prova moldados para os teores de teste.

Os parâmetros volumétricos para os teores definidos são apresentados na Tabela 14, por meio dos quais foi possível definir o teor de projeto, para o qual foram avaliadas as propriedades mecânicas.

Tabela 13 - Parâmetros volumétricos.

LIGANTE %	%GMM NPROJETO	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	MASSA ESPECÍFICA(G/CM ³)
4,0	92,25	17,14	7,75	75,60	2,560
4,5	93,81	16,23	6,19	74,67	2,545
5,0	95,66	15,32	4,34	73,77	2,523
5,5	97,54	14,54	2,46	73,07	2,497
Critérios da dosagem	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Analisando os resultados, para nenhum dos quatro teores de ligante testados (4,0; 4,5; 5,0 e 5,5%) foi possível obter 4% de vazios. Por meio da curva do teor de ligante em função do volume de vazios, apresentada na Figura 30, estimou-se o teor de ligante para o qual se tem 4,0% de vazios, o qual foi de 5,1%, e foram então moldados novamente os corpos de prova para obter os parâmetros volumétricos e confirmar o teor de vazios.

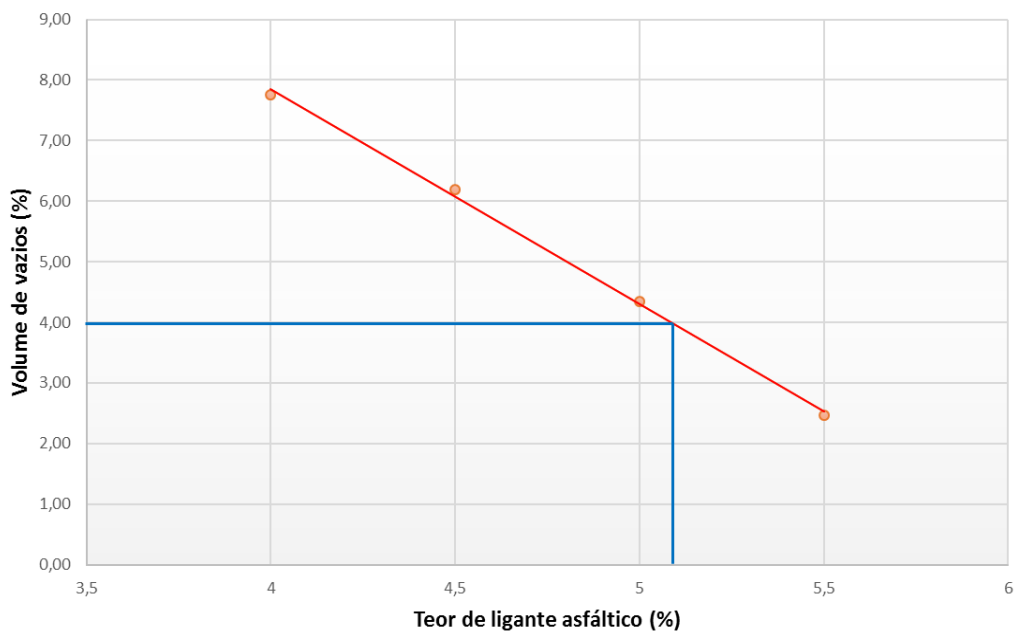


Figura 30 - Estimativa do teor ótimo de ligante

3.2.4 Caracterização mecânica e avaliação da fadiga

O fluxograma dos ensaios de caracterização mecânica e avaliação da fadiga é apresentado na Figura 31. Foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e suas respectivas normas são apresentados na Tabela 15.

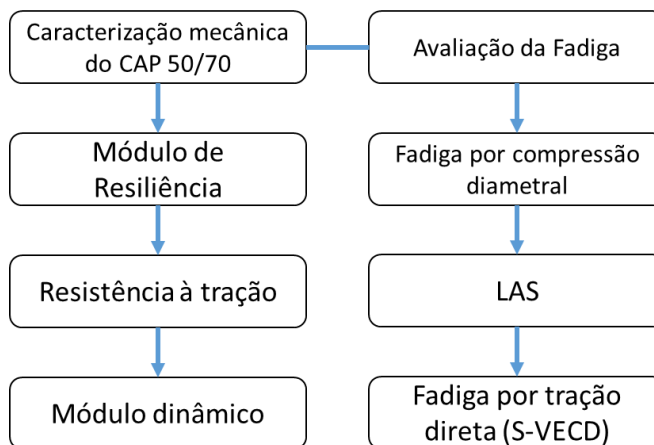


Figura 31 - Fluxograma dos ensaios de resistência mecânica

Tabela 14 - Ensaios de resistência mecânica e suas respectivas normas

ENSAIO	NORMA
Resistência à tração indireta	DNIT ME 136/10
Módulo de resiliência	NBR 16018/2011
Módulo dinâmico	AASHTO TP-62/2009
Fadiga por compressão diametral	DNIT 183/2018
LAS	ASHTO TP 101:2014
Fadiga à tração-compressão uniaxial	AASHTO TP-107:2014

3.2.4.1 Caracterização mecânica

3.2.4.1.1 Resistência a tração

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT ME 136/10, por meio dele é determinada a tensão máxima que a mistura asfáltica suporta. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados no compactador giratório com o teor de ligante definido na dosagem SUPERPAVE, e então por meio de frisos metálicos de mesmo comprimento do corpo de prova são aplicadas duas forças concentradas e opostas diametralmente. A velocidade de carregamento foi de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, e o ensaio é ilustrado na Figura 32.



Figura 32 - Prensa do ensaio de resistência à tração

A resistência à tração é determinada pela Equação 18, e o resultado final é a média de três corpos de prova.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH}$$

Equação 18

Onde:

σ_t = resistência à tração;

F = carga que leva à ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

3.2.4.1.2 Módulo de resiliência

As deformações resilientes são deformações recuperáveis quando o pavimento é submetido a carregamentos cíclicos. Para analisar a capacidade de recuperação elástica e de deformabilidade, é preciso analisar os módulos de resiliência das camadas do pavimento.

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 16018/2011, na prensa hidráulica UTM-25 (Figura 33) em corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e altura aproximada de 6,5 cm. O ensaio se baseia na aplicação de uma carga de compressão aplicada como um pulso de onda, no plano vertical de forma repetida, levando à tração transversalmente ao plano de aplicação. A carga gera uma tensão transversal ao plano de aplicação, e os LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) fazem a medição do deslocamento diametral recuperável na direção horizontal que corresponde à tensão criada.

Durante a realização do ensaio foi aplicada uma carga correspondente a 10% do RT, na forma de pulso de cargas de 1Hz (60 ciclos por minuto) durante 0,1s e com repouso de 0,9s. O resultado final é o módulo de resiliência obtido em MPa e consistiu na média de 3 corpos de prova ensaiados.



Figura 33 - Prensa UTM-25 utilizada para realização do módulo de resiliência

3.2.4.1.3 Módulo dinâmico

A teoria da viscoelasticidade é considerada uma alternativa robusta e representativa, por meio dela são modeladas as características importantes das misturas asfálticas como fluência, tempo, temperatura, carregamento e histórico de tensões. No laboratório a propriedade viscoelástica fundamental comumente determinada é o módulo complexo, também denominado módulo dinâmico.

O módulo dinâmico (MD) é um ensaio realizado para dar uma estimativa da rigidez da mistura asfáltica. De acordo com Queiroz (2016) no ensaio é aplicada uma carga uniaxial de compressão na forma senoidal, em um corpo de prova cilíndrico, realizado em diferentes temperaturas e frequências de carga. O parâmetro módulo dinâmico ($|E^*|$) é obtido pela tensão máxima (pico a pico) da onda de carga senoidal pela deformação axial recuperável (pico a pico). A interpretação dos resultados se dá por meio da curva mestra, permitindo avaliar para temperaturas e frequências diferentes.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma da AASHTO TP-62/2009, em corpos de prova cilíndricos de 150mm de altura e 100mm de diâmetro, a realização do ensaio é ilustrada na Figura 34. Para gerar a curva mestra, foi realizado para as temperaturas de 4; 21 e 37°C e frequências de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 e 25 Hz. Os corpos de prova munidos dos seus LVDTs foram testados para 27 combinações de temperatura e frequência, iniciando à partir das menores e aumentando gradativamente. De acordo com COSTA (2017) em cada temperatura, aplica-se uma carga de contato de 5% do valor representativo de carga dinâmica normalmente encontrada em cada temperatura, as cargas são apresentadas na Tabela 16.

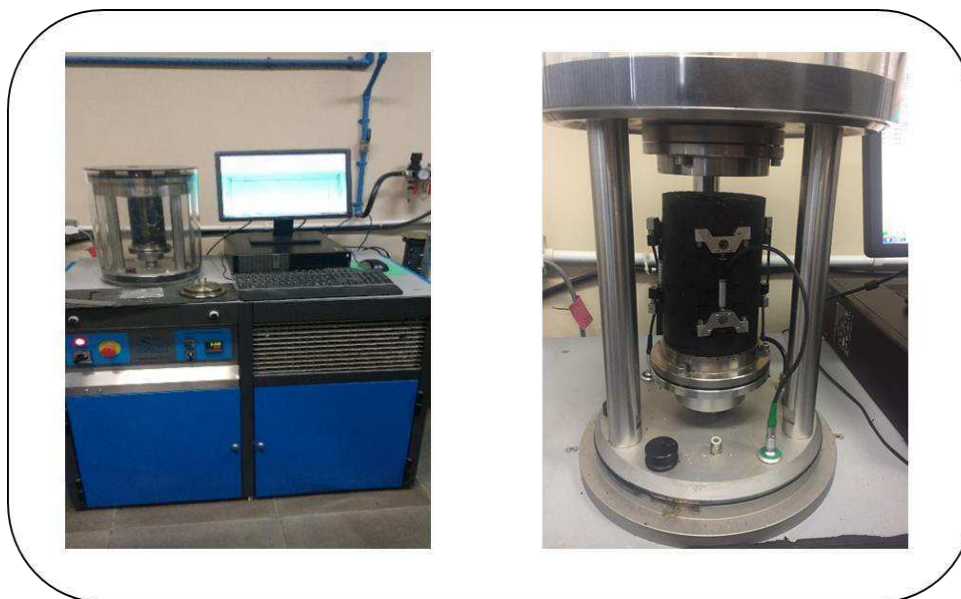


Figura 34 - Realização do ensaio de MD no equipamento AMPT

Tabela 15 - Temperaturas e tensões de contao do ensaio de MD.

Temperatura (°C)	Tensão (KPa)
4	700
21	350
37	140

3.2.4.2 Avaliação da fadiga

3.2.4.2.1 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

De acordo com Bundy (2012) na fadiga por compressão diametral o corpo de prova é submetido à uma carga de compressão diametralmente, assim o mesmo é sujeito a um estado de tensões biaxial, de modo que na direção vertical está sujeito à tensão de compressão e na direção horizontal à tensão de tração.

A norma que rege o ensaio é a DNIT 183/2018, é realizado na prensa UTM-25. O ensaio consiste em uma carga senoidal aplicada na forma de pulso, com frequência de 1Hz, de modo que em 0,1s foi aplicada a carga e nos 0,9s seguintes foi mantido o repouso. A

temperatura de realização foi 25°C, e as cargas aplicadas estavam no intervalo entre 30 e 40% da resistência à tração (RT) da mistura asfáltica. A figura 35 mostra a realização do mesmo.



Figura 35 - Realização do ensaio de fadiga por compressão diametral na prensa UTM-25.

O resultado do ensaio é o número de ciclos que fez o corpo de prova romper para uma tensão já definida, sendo possível construir a curva de Whöler, um gráfico na escala logarítmica da tensão pelo número de ciclos ou solicitações (N). O valor de N é expresso em razão das tensões ou deformações iniciais, pelas Equações 19 e 20 a seguir:

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad \text{Equação 19}$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

N = número de cargas cíclicas que levaram à ruptura do corpo de prova;

$\Delta\sigma$ = diferença entre as tensões vertical e horizontal do centro do corpo de prova;

ε_i = deformação por tração inicial;

K e n = constantes resultantes de resultados experimental.

3.2.4.2.2 LAS (Linear Amplitude Sweep)

A metodologia do ensaio foi proposta por Johnson and Bahia (2010) para estudar a fadiga no ligante asfáltico de forma mais rápida por meio da teoria do dano em meio contínuo viscoelástico (VECD). De acordo com Duarte (2018) para estudar a fadiga nos ligante asfálticos anteriormente era usado o parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ como fundamento, contudo pesquisas posteriores mostraram que o mesmo é inadequado para estimar a resistência à fadiga. O ensaio é realizado para a condição de viscoelasticidade linear, contudo o dano por fadiga ocorre no estado de viscoelasticidade não-linear e com grande deformidade.

O ensaio é realizado de acordo com a norma ASHTO TP 101:2014, no reômetro de cisalhamento dinâmico, nesse método são aplicadas na amostra torções cíclicas entre as placas do reômetro por meio do aumento da amplitude de cargas para antecipar o dano, e esse dano acumulado pode ser um indicador da resistência à fadiga do ligante asfáltico para determinadas condições de tráfego.

O LAS foi realizado para amostras envelhecidas pelo RTFO na temperatura de 25°C. Inicialmente a amostra é submetida a uma varredura de frequência com carregamento de cisalhamento com amplitude de 0,1% e a frequência variando de 0,1 a 30 Hz no estado viscoelástico do ligante asfáltico, apresentando o estado do material sem dano. Em seguida, o material é submetido a uma varredura com frequência constante de 10Hz, e nível de deformação de 0 a 30%, e são medidas as deformações de acordo com o número de ciclos de carga aplicados.

3.2.4.2.3 Ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial

O ensaio de fadiga por tração direta foi realizado de acordo com a norma AASHTO TP-107:2014. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos moldados no compactador giratório SUPERPAVE com diâmetro de 100 mm e altura de 145 mm. Para submeter o corpo de prova à tração direta, o mesmo é colado com 24 horas de antecedência nos pratos de fixação do equipamento com uma resina epóxi de alta resistência em que foram adicionados 20g de cada material, o processo de colagem é mostrado na Figura 36. Assim os corpos de prova foram fixados nos pratos inferior e superior, certificando o alinhamento dos mesmos para que não existam tensões que não sejam de tração.



Figura 36 - Preparação da cola e posterior colagem nos pratos de fixação do corpo de prova

Conforme disserta Schuster (2018) o ensaio consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação senoidal, de amplitude constante, até que ocorre a ruptura caracterizada pela defasagem do ângulo de fase (Figura 37). Durante o ensaio são coletados e monitorados a deformação, a carga, a temperatura, o módulo dinâmico, o ângulo de fase e o deslocamento do atuador.

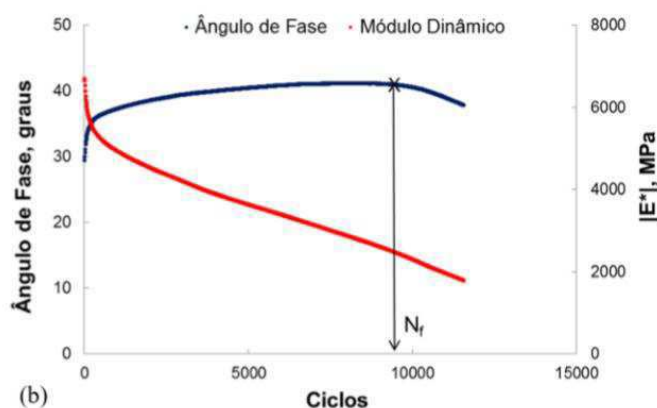


Figura 37 - Evolução do módulo dinâmico e ângulo de fase durante o ensaio (Nascimento, 2014)

De acordo com Mocelin (2018) são apresentadas tensões de tração e compressão durante os carregamentos cíclicos, contudo as deformações ocorrem exclusivamente devido à tração. Esse ensaio é bastante preciso, o controle das deformações no corpo de prova foi realizado por meio dos LVDTs que são bastante sensíveis, e devem ser ajustados detalhadamente antes da realização do ensaio.

Os corpos de prova foram mantidos na temperatura de 20°C condicionados pela câmara do equipamento AMPT, conforme ilustra a Figura 38. O ensaio foi realizado para dois corpos de prova, com deformações controladas diferentes e buscou-se manter o número de ciclos entre 1000 e 100000 conforme é recomendado por norma. O procedimento de realização do ensaio, conforme o modelo de Mocelin (2018) foi:

- a) Manter as amostras na temperatura de 20°C;
- b) Aplicar a carga de assentamento no corpo de prova de aproximadamente 0,09 KN, em seguida a carga é aliviada permitindo livre expansão e contração do equipamento;
- c) Os extensômetros foram dispostos ao redor do corpo de prova em distâncias iguais, foram utilizados três extensômetros distanciados de 120° em relação ao outro;
- d) Inicialmente foi realizado o ensaio cíclico denominado fingerprint com frequência de 10Hz. O ensaio deve manter a deformação no intervalo de 50 a 75 $\mu\epsilon$, fazendo com que o material trabalhe no regime elástico linear, não havendo o acúmulo de dano;
- e) No ensaio de fingerprint é realizada a medição do módulo dinâmico ($|E * |_{fingerprint}$);
- f) Em seguida, é realizado o ensaio de fadiga por tração direta, com deformação controlada de 300 $\mu\epsilon$ na frequência de 10 Hz;
- g) O critério de parada do ensaio é quando a propagação de trincas origina uma macrotrinca visível;
- h) Para o outro corpo de prova o nível de deformação adotado foi em função do número de ciclos que levaram à ruptura da 1ª amostra, conforme a Tabela 16;
- i) No caso de no primeiro corpo de prova o número de ciclos for inferior a 500, deve ser descartado e o ensaio deve ser realizado novamente com deformação constante de 250 $\mu\epsilon$.

Tabela 16 - Níveis de deformação para o ensaio de fadiga por tração direta (Mocelin. 2018)

CASO	ϵ_{os2}	ϵ_{os3}
500<Nf1<1000	$\epsilon_{os1} - 100$	$\epsilon_{os1} - 150$
1000<Nf1<5000	$\epsilon_{os1} - 50$	$\epsilon_{os1} - 100$
5000<Nf1<20000	$\epsilon_{os1} + 50$	$\epsilon_{os1} - 50$
20000<Nf1<100000	$\epsilon_{os1} + 100$	$\epsilon_{os1} + 50$
100000<Nf1	$\epsilon_{os1} + 150$	$\epsilon_{os1} + 100$

De forma diferente aos ensaios convencionais de análise de vida de fadiga, o ensaio de fadiga por tração direta se baseia na mecânica do dano em meio contínuo viscoelástico. A interpretação dos resultados é realizada de acordo com a norma americana AASHTO TP-107 (2014). A Figura 38 ilustra a realização do ensaio, com o corpo de prova confinado no equipamento AMPT.

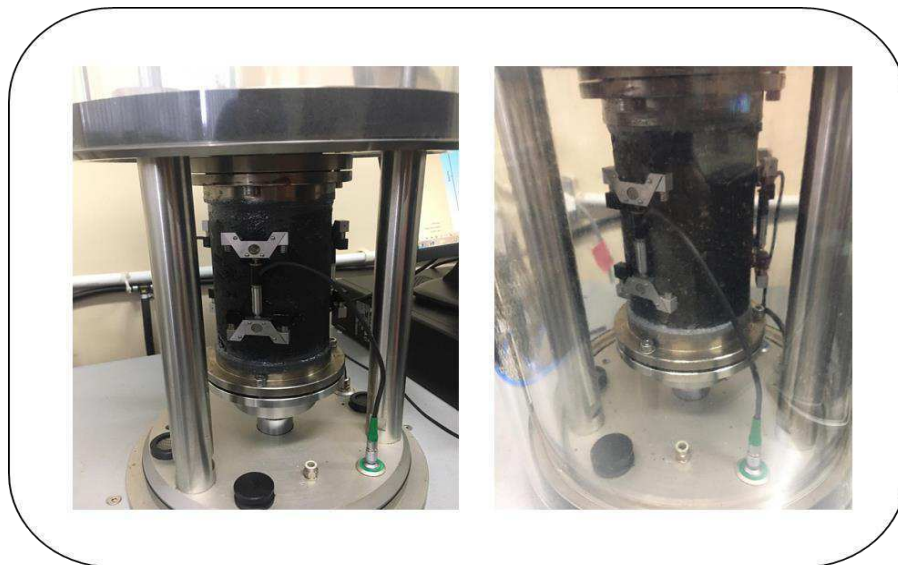


Figura 38 - Corpo de prova para o ensaio de fadiga por tração direta na AMPT

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização mecânica

4.1.1 Ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral e módulo de resiliência.

A Tabela 17 apresenta o resultado de resistência à tração (RT), a média de três corpos de prova do ligante asfáltico 50/70. Verifica-se que o resultado atendeu ao mínimo especificado em norma de 0,65 MPa a 25°C de acordo com a DNIT ES031/2006. Esse ensaio é utilizado na caracterização de misturas asfálticas e fornece uma boa aproximação em relação aos resultados dos ensaios de fadiga (Brito et al., 2008; Rossato, 2015).

Tabela 17 - Resultado do ensaio de resistência à tração

ENSAIO	UNIDADE	DNIT ES031/2006	RESULTADO
Resistência à tração	MPa	0,65	1,16

O módulo de resiliência para os corpos de prova é apresentado na Tabela 18, e de acordo com Bernucci et al. (2008) os valores de MR no Brasil para 25°C estão entre 2000 e 8000 MPa, portanto a mistura apresentou-se dentro dos limites.

Tabela 18 - Resultado do ensaio de módulo de resiliência no CAP 50/70

ENSAIO	UNIDADE	PARÂMETRO	RESULTADO
MR	MPa	2000-8000	5271

Por meio da análise dos resultados percebe-se que a mistura apresentou elevada rigidez e resistência mecânica, uma inferência da resistência à fadiga. Em muitas pesquisas para estudos de fadiga (trincamento) utiliza-se a relação MR/RT, de acordo com Coutinho (2012) esse parâmetro indica um equilíbrio entre flexibilidade e resistência. Portanto, espera-se um valor pequeno da relação para que a mistura não seja muito rígida a ponto de absorver as tensões levando o revestimento asfáltico a trincar precocemente e possua elevada resistência aos esforços de tração (já que o pavimento deve resistir mais a essas solicitações). Segundo Leite

et al. (2000) para o mesmo RT o uso de valores menores do parâmetro MR/RT é de interesse já que permite a utilização de camadas mais delgadas para uma mesma vida de fadiga.

A relação MR/RT tem sido empregada como indicativo da vida de fadiga, e de acordo com Boeira (2014) misturas asfálticas com valores elevados de MR devem apresentar valores também elevados de RT, pois ocasiona em um acúmulo de tensões em seu interior, e para valores menores dessa relação serão maiores a flexibilidade e a vida de fadiga. Para o ligante 50/70 ensaiado o valor da relação MR/RT foi de 4543,97, ainda não existe norma brasileira indicando um parâmetro para esses valores, contudo Pinheiro et al. (2003) e Leite et al.(2000) dissertam que valores próximos de 3000 são indicativos de uma mistura flexível e com adequada resistência à tração. O valor alto da relação MR/RT para a mistura se deve ao elevado módulo de resiliência na temperatura de compactação, mostrando uma falta de equilíbrio entre as propriedades mecânicas da mistura, e uma menor vida de fadiga.

Contudo, em sua pesquisa Tinajeros (2016) observou que a mistura com a maior relação MR/RT, que apresentaria a menor vida de fadiga, no ensaio de vida de fadiga foi a que apresentou melhor comportamento. De acordo com Mendes (2011) a finalidade de utilização do parâmetro foi para dar suporte às universidades que não possuíam o aparato para realização do MR. Em seus estudos Vale (2007) verificou que não foi encontrada uma correlação entre o parâmetro e a vida de fadiga de misturas asfálticas, sendo necessário outros ensaios para fazer essa análise assim como foram realizados nessa pesquisa.

4.1.1 Módulo dinâmico ($|E^*|$)

A curva mestra para a mistura asfáltica foi obtida para as três temperaturas e nove frequências, fazendo uma superposição entre tempo e temperatura na temperatura de referência de 21°C. A curva mestra da mistura com CAP 50/70 é apresentada na Figura 35.

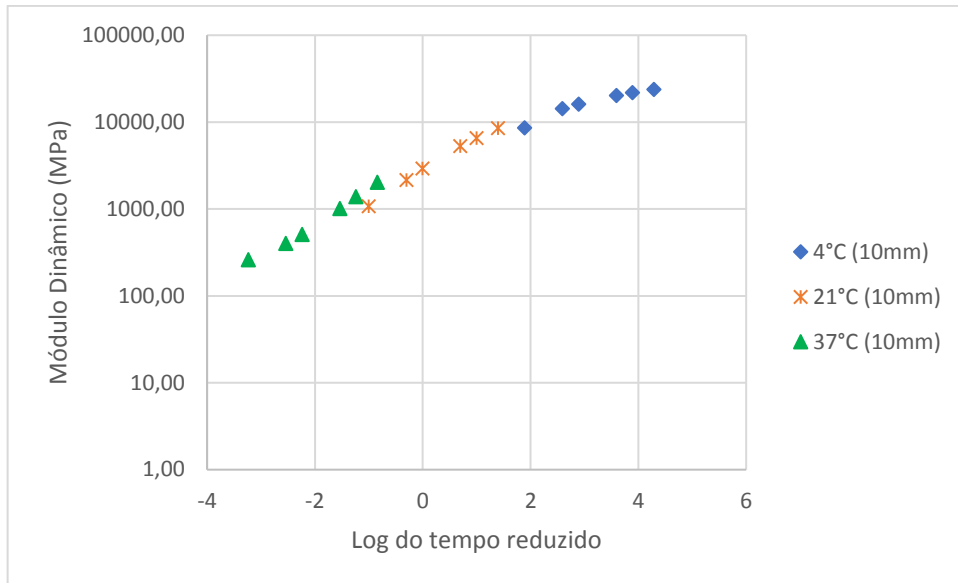


Figura 39 - Curva mestra da mistura com CAP 50/70

De forma análoga ao MR, por ser uma medida de rigidez, o módulo dinâmico é influenciado pela temperatura, e ocorre uma redução na rigidez com o aumento da temperatura. É possível observar também que a rigidez da mistura diminuiu à medida que a frequência de aplicação de carga foi reduzida. O resultado de módulo dinâmico para a mistura nas três temperaturas de ensaio é apresentado no gráfico da Figura 40.

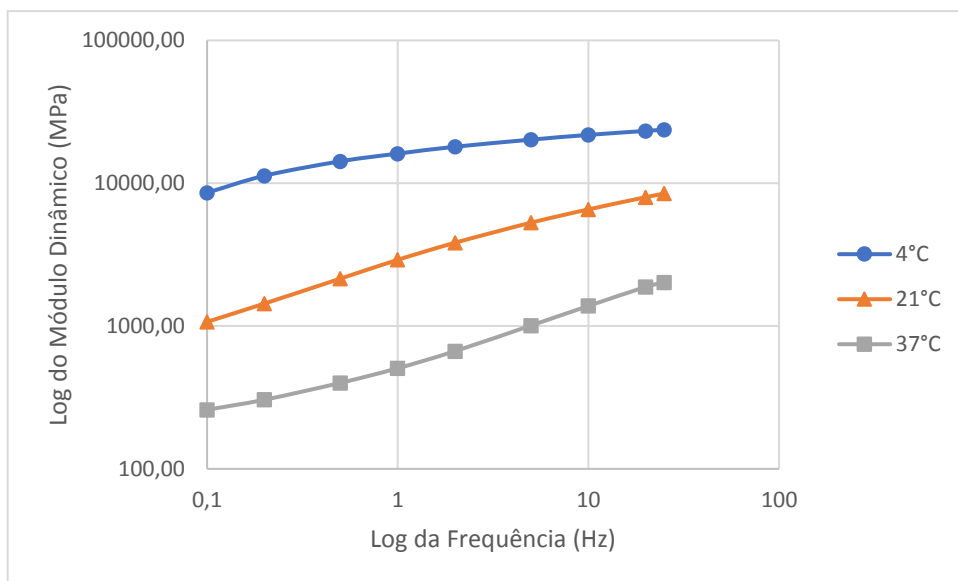


Figura 40 - Módulo dinâmico da misturas pra 4, 21 e 37°C

As propriedades viscoelásticas lineares fundamentais dos materiais são o módulo dinâmico e o ângulo de fase, sendo o último a diferença entre o pulso de tensão e o de deformação e que pondera o efeito das temperaturas e frequências de cargas aplicadas, no desempenho do material. Valores mais elevados do ângulo de fase indicam um comportamento mais viscoso e menos elástico do material, no gráfico da Figura 37 é apresentado o ângulo de fase em função das frequências de carregamento.

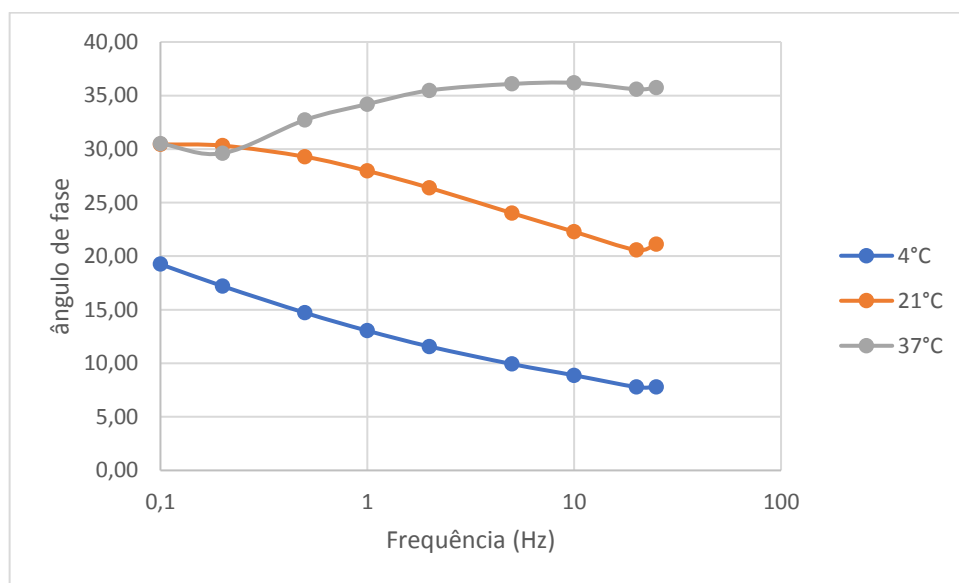


Figura 41 - Ângulo de fase em função da frequência de carregamento para as temperaturas de 7, 21 e 37°C

Foi possível observar que o ângulo de fase aumenta com o incremento das temperaturas e diminui com o aumento da frequência. Entretanto, na temperatura de 37°C o comportamento foi diferente, pois o ângulo de fase foi reduzido nas frequências mais baixas e nas frequências maiores. Segundo Ali et al.(2016) o ângulo de fase em temperaturas mais baixas aumenta, e entende-se que grande parte da energia se dissipa no comportamento viscoelástico, o que significa dizer que o comportamento do ângulo de fase para baixas temperaturas e altas frequências é atribuído ao ligante, e segue o desempenho dele. Nas temperaturas elevadas e baixas frequências o agregado interfere na tendência do ângulo de fase, assim grande parte da energia se deve à interação entre ligante e agregado levando à redução do ângulo de fase.

4.2 Avaliação da fadiga

4.2.1 Fadiga por compressão diametral a tensão controlada

O ensaio de fadiga foi realizado para cinco níveis de tensão controlada: 40; 37,5; 35; 32,5 e 30% do RT. Os diferentes níveis de tensão referem-se à tração gerada no centro do corpo de prova durante a realização do ensaio. As curvas de fadiga foram apresentadas em função da diferença de tensões (Figura 42) e em função da deformação específica (Figura 43).

Para a curva foi gerada a equação mais apropriada para sua linha de tendência, assim foi determinado o parâmetro R^2 referente a qualidade do ajuste do modelo para os pontos e foram determinados também os parâmetros K_1 , K_2 , n_1 e n_2 das equações 19 e 20. Na Tabela 19 são apresentados os parâmetros das equações de vida de vida de fadiga em relação à diferença de tensões e à deformação específica .

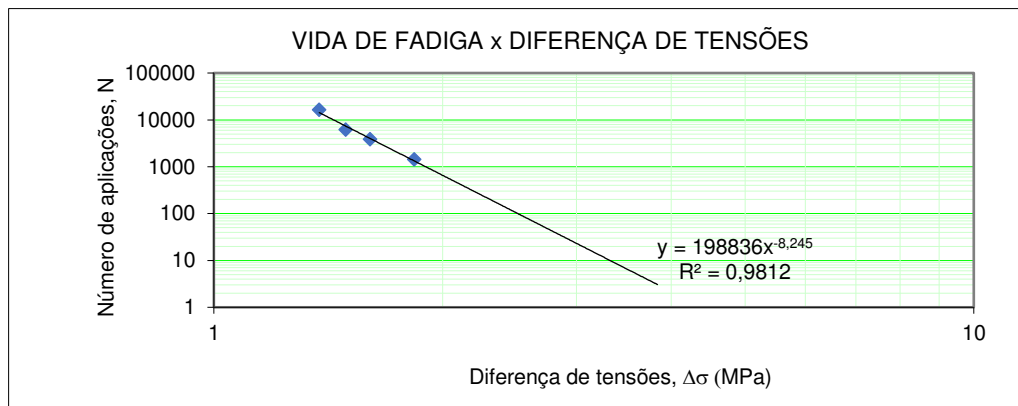


Figura 42 - Vida de fadiga x Diferença de tensões

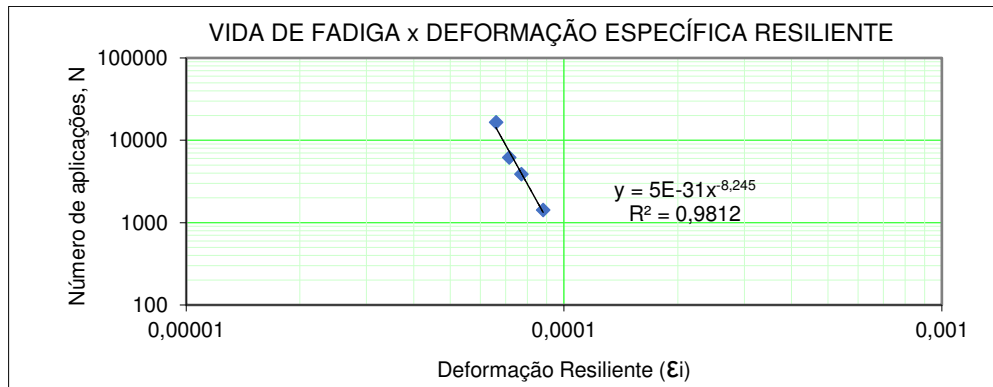


Figura 43 - Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente

Tabela 19 - Parâmetros das equações de vida de fadiga

Mistura	Curva	$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_1}$ ou $N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2}$	R ²	Parâmetros	
		CAP 50/70		N × Δσ	$198836 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-8,245}$
N × ε _i	$5 \times 10^{-31} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-8,245}$		0,9812	$K_2 = 5 \times 10^{-31}$	$n_2 = 8,245$

Analisando os resultados da Tabela 19, o fator R² próximo de 1 indica que o modelo apresentou uma menor dispersão dos dados para ambas as curvas de fadiga. A vida de fadiga é o número de ciclos (N) que a mistura resiste, sendo apresentada nas curvas de Wöhler em função da diferença de tensões e deformação específica. Se uma mistura resiste a maiores valores de N apresenta um melhor desempenho frente à fadiga, de acordo com Merighi (2015) o volume de vazios e a matriz de agregados são parâmetros que interferem na vida de fadiga.

Morilha Junior (2004) faz uma classificação do desempenho à fadiga de misturas asfálticas, assim utiliza-se três níveis de diferença de tensão: nível baixo para 0,5 MPa; nível médio para 1 MPa e nível alto para 2,0 MPa, essa classificação também foi utilizada nessa pesquisa. Assim a mistura com CAP 50/70 ensaiada apresenta maior resistência a altas tensões, resultado esperado devido ao valor elevado de MR.

A curva de vida de fadiga em função da diferença de tensões, a inclinação da reta é indicada pelo coeficiente n_1 , assim as curvas podem possuir baixa ou alta declividade, em misturas que apresentam desempenho similar em baixas e altas diferenças de tensão as curvas apresentam baixa declividade, e as que apresentam uma resistência à fadiga superior apenas nas tensões mais baixas apresentam alta declividade. De acordo com Tadeu Junior (2008) n_1 indica o quanto a mistura asfáltica é susceptível a mudanças no estado de tensões. O valor do parâmetro n_1 para o CAP 50/70 foi de 8,245, ou seja, apesar de apresentar resistência elevada em altas tensões, o mesmo é susceptível ao estado de tensões, resultados próximos foram encontrados por Carvalho (2018) e Porto (2018) para o CAP 50/70.

Nas curvas de vida de fadiga em função da deformação específica, a deformação resiliente define a interferência do módulo de resiliência inicial apresentado pela mistura. Assim

o coeficiente n_2 define a inclinação da curva, e de forma semelhante ao que foi feito na análise de fadiga em função da diferença de tensões, foram empregados três níveis de deformação de resiliência conforme De Cezaro Junior (2008): 3.10^{-5} cm/cm para nível baixo; 6.10^{-5} cm/cm para nível médio e 1.10^{-4} cm/cm para nível alto. Assim a mistura com CAP 50/70 apresentou melhor desempenho para um nível médio de deformação.

4.2.2 Varredura linear de amplitude de deformação – LAS

O resultado do ensaio foi analisado para dano contínuo em meio viscoelástico (VECD) por meio dos parâmetros do experimento “A” e “B” e a fadiga através do número de ciclos que levou à ruptura em função da amplitude de deformação. Os valores dos parâmetros “A” e “B” são apresentados na Tabela 21.

Tabela 20 - Parâmetros "A e "B" para análise VECD

ANÁLISE VECD (PARÂMETROS)	
A	B
100900,00	2,33

De acordo com Pamplona (2013) o parâmetro “A” é dependente da integridade do ligante em função do dano (por exemplo $|G^*| \cdot \sin \delta$ versus o dano acumulado) e do módulo complexo inicial (antes do dano). Assim maiores valores de “A” indicam uma maior resistência ao dano e parâmetros de integridade superiores. É almejado que o material seja capaz de manter alta a integridade mensurada pelo parâmetro ($|G^*| \cdot \sin \delta$) e assim apresente valor de A elevado, se houver uma rápida redução desse parâmetro ($|G^*| \cdot \sin \delta$) o valor de A será baixo. Para a amostra ensaiada o valor de “A” obtido foi de 100900 e se mostrou próximo ao encontrado por Duarte (2018) e Marinho Filho (2017) que também realizaram o ensaio com o CAP 50/70.

O parâmetro “B” depende apenas α que é o ângulo de inclinação da curva do módulo de armazenamento (G') em função da frequência, obtido por meio da varredura de frequência. Menores valores do parâmetro B são desejáveis pois indicam um ligante menos susceptível às deformações sob mudanças térmicas. O valor do parâmetro “B” foi de 2,33 e novamente se

mostrou próximo ao encontrado por Duarte (2018) e Marinho Filho (2017) que trabalharam com o mesmo tipo de ligante.

Segundo Hintz (2012) por meio dos princípios da teoria do dano em meio contínuo viscoelástico (VECD) é possível analisar a fadiga através do comportamento do ligante asfáltico em relação ao dano em temperaturas intermediárias, para diferentes condições de deformação e carga. O número de ciclos que o material suporta até a sua ruptura está relacionado com as condições de tráfego que o mesmo pode ser submetido, e segundo Nuñez et al. (2014) é um indicativo da estrutura do pavimento asfáltico e das deformações admissíveis.

O gráfico da Figura 44 apresenta a vida de fadiga (número de ciclos N_f) em função da amplitude de deformação para o ensaio realizado na temperatura de 25°C.

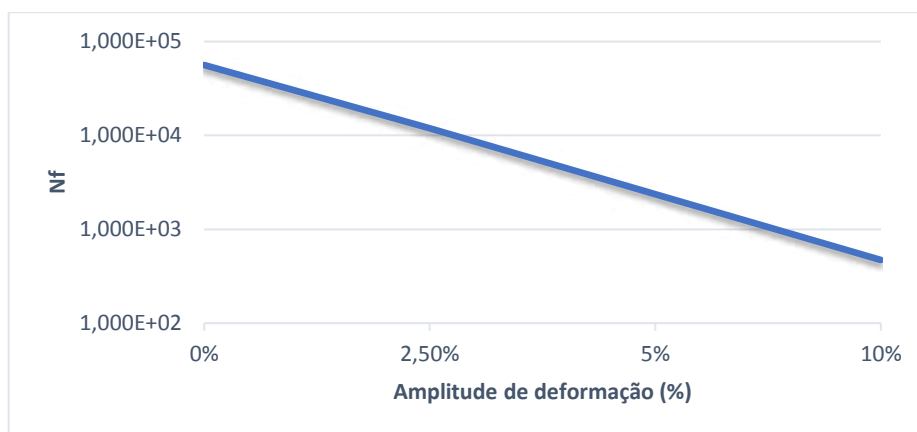


Figura 44 -Variação dos ciclos de ruptura em função da amplitude de deformação para o CAP 50/70

Conforme também foi observado por Pamplona et al. (2014) o desempenho a fadiga de ligantes asfálticos depende do nível de tensões. Assim, nos menores níveis de tensão ligantes mais rígidos apresentam vida de fadiga maior. Assim, pavimentos sujeitos a pequenas deformações são beneficiados quando apresentam comportamento mais rígido.

Para relacionar os parâmetros de fadiga obtidos com o ensaio de LAS e em campo Teymourpour e Bahia (2014) sugeriram relaciona o número de ciclos até a ruptura da amostra N_f para diferentes níveis de tensão (2,5; 5,0 e 10%). Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Vida de fadiga do LAS para diferentes níveis de tensão

NÍVEL DE TENSÃO	N_f
2,5%	11920
5,0%	2370
10,0%	471

Analisando os resultados foi possível observar que para o nível de 2,5% de deformação o valor de N_f é bem mais elevado, o aumento do nível de deformação faz com que os ciclos até a ruptura reduzam expressivamente. Números de ciclos próximos para as mesmas deformações e também com o ligante 50/70 foram encontrados por Duarte (2018). Por meio da análise VECD é possível perceber a relação estreita entre a vida de fadiga de ligantes asfálticos e o nível de deformação.

No ensaio de LAS para análise do comportamento à fadiga, apesar de ser realizado conforme a metodologia VECD, Rodrigues (2018) ressalta que o desempenho à fadiga do ligante não necessariamente é o mesmo para as misturas asfálticas. Mello (2008) estudou a evolução do dano nas misturas asfálticas, de acordo com o autor comportamento mecânico das misturas não depende apenas da rigidez (parâmetro analisado no LAS), mas de outros fatores como granulometria, volume de vazios, temperatura e nível de deformação.

4.2.3 Ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão

A análise da fadiga por tração-compressão uniaxial foi realizada na temperatura de 20°C, com amplitude de deformação constante e frequência de 10 Hz. O ensaio foi realizado para duas amostras, na primeira foi mantida a deformação constante de $300\mu\epsilon$ e de acordo com o número de ciclos que levou à ruptura (N_f) o segundo foi ensaiado para a deformação constante de $350\mu\epsilon$.

Antes do ensaio de fadiga propriamente dito, foi realizado o ensaio denominado fingerprint, para determinar o módulo dinâmico e a variação de rigidez das amostras. É importante destacar que o fingerprint é obtido na tração-compressão da mesma forma que o ensaio de fadiga.

Durante a realização do ensaio foram coletados dados de carga, deformação, módulo dinâmico e ângulo de fase. Com esses dados foram geradas as curvas de Módulo Dinâmico (E^*) e do Ângulo de Fase (δ) em função do número de ciclos de tração-compressão para cada amostra. Esses parâmetros são indicadores importantes das propriedades elásticas e viscoelásticas do material, tornando possível verificar o ciclo de ruptura das amostras. As curvas são apresentadas nas Figura 45 e 46, para as deformações constantes de $300 \mu\epsilon$ e $350 \mu\epsilon$.

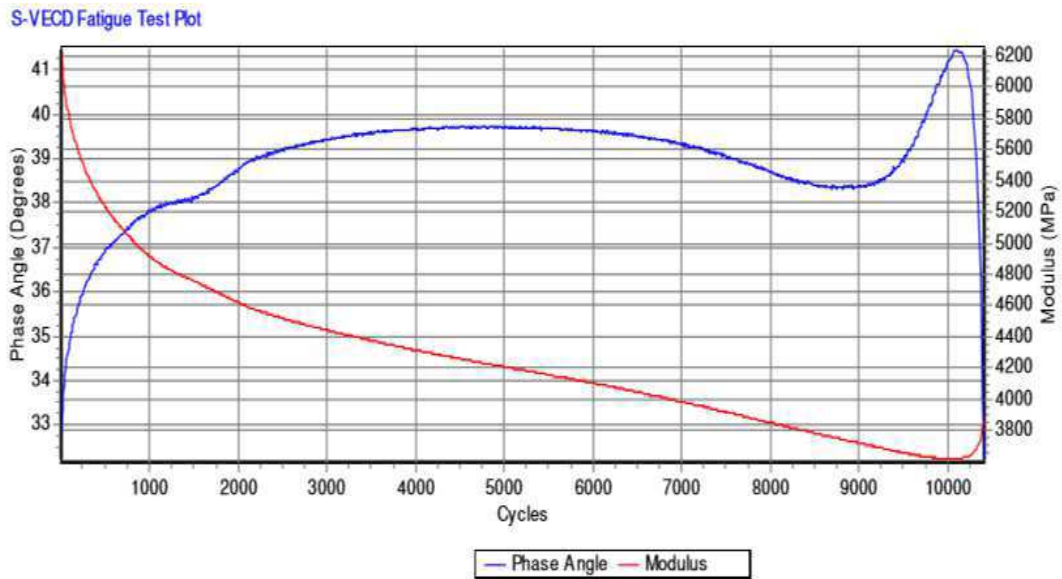


Figura 45: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de $300 \mu\epsilon$

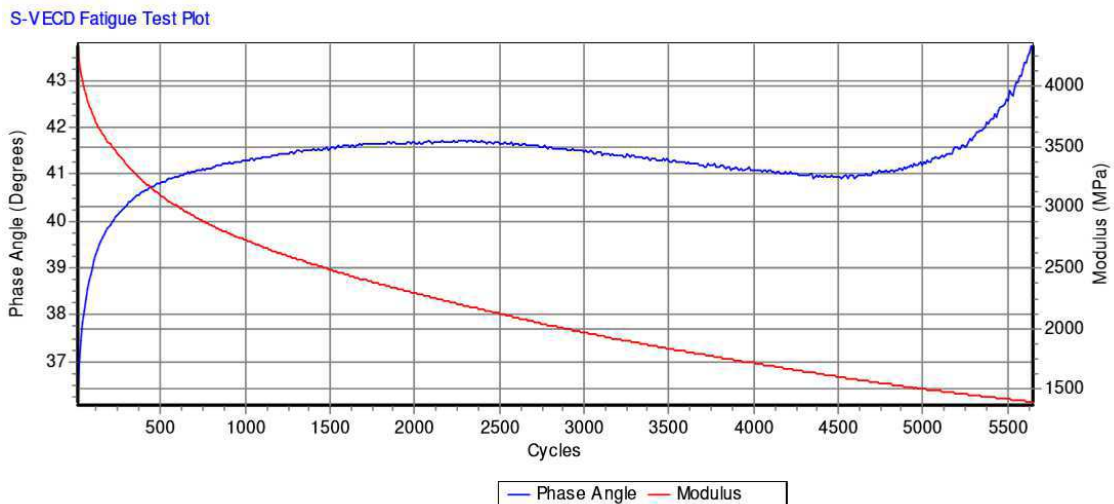


Figura 46: Módulo dinâmico e ângulo de fase em função do número de ciclos do ensaio de fadiga para deformação constante de $350 \mu\epsilon$

Analisando os resultados é possível observar que o módulo dinâmico diminui continuamente enquanto o ângulo de fase cresce até um pico, resultado encontrado por outros autores que realizaram o mesmo ensaio (Rodrigues, 2018; Schuster, 2018; Mocelin, 2018; Boeira, 2018). Conforme observou Rodrigues (2018) o rompimento do corpo de prova é caracterizado pelo pico do ângulo de fase seguido da sua queda brusca, e o módulo complexo cai quase que verticalmente. O software utilizado no equipamento AMPT interrompe o ensaio imediatamente com queda do ângulo de fase (ruptura da amostra) e informa no relatório o número de ciclos que levou à ruptura N_f , portanto não foi possível observar o módulo dinâmico decaindo verticalmente. Nas pesquisas realizadas com softwares em equipamentos em que o ensaio é interrompido pelo operador esse comportamento é observado, e o número de ciclos é obtido por meio da análise das curvas, observando o ponto em que ocorre o pico do ângulo de fase.

Os parâmetros obtidos no ensaio para as duas amostras são apresentados na Tabela 22. Os resultados foram obtidos para diferentes amplitudes de deformação, e observa-se que o número de ciclos variou bastante, para a amostra com deformação constante de $300 \mu\epsilon$ o valor de N_f foi 10410 e para $350 \mu\epsilon$ foi de 5650. De acordo com Schuster (2018) a evolução da integridade do material em relação ao crescimento do número de ciclos é muito diferente para cada nível de deformação.

Tabela 22: Parâmetros do ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial

Deformação constante de 300 $\mu\epsilon$		Deformação constante de 350 $\mu\epsilon$	
Número de ciclos		Número de ciclos	
inicial	final	inicial	final
10	10410	10	5650
Módulo dinâmico		Módulo dinâmico	
inicial	final	inicial	final
6235	3864	4333	1392
Ângulo de fase (°)		Ângulo de fase (°)	
inicial	final	inicial	final
32,75	41,6	36,14	43,73
Tensão pico a pico (KPa)		Tensão pico a pico (KPa)	
inicial	final	inicial	final
1370,6	1057,0	1294,2	488,0

Segundo Magiaficio (2014) no decorrer do ensaio, as amostras sofrem danos progressivos, que em conjunto com a falha prematura é um efeito dos ciclos de cargas repetidas. Os danos progressivos é o que leva o módulo dinâmico, ou seja, a rigidez decair progressivamente com o aumento do número de ciclos e o ângulo de fase aumentar.

Para as amostras ensaiadas também foram obtidos os gráficos de tensões de pico nas Figuras 47 (deformação de 300 $\mu\epsilon$) e 48 (deformação de 350 $\mu\epsilon$). Os resultados exibem a mesma tendência, a tensão de pico diminui até atingir a deformação necessária. A diminuição da tensão de pico se deve perda de integridade das amostras.

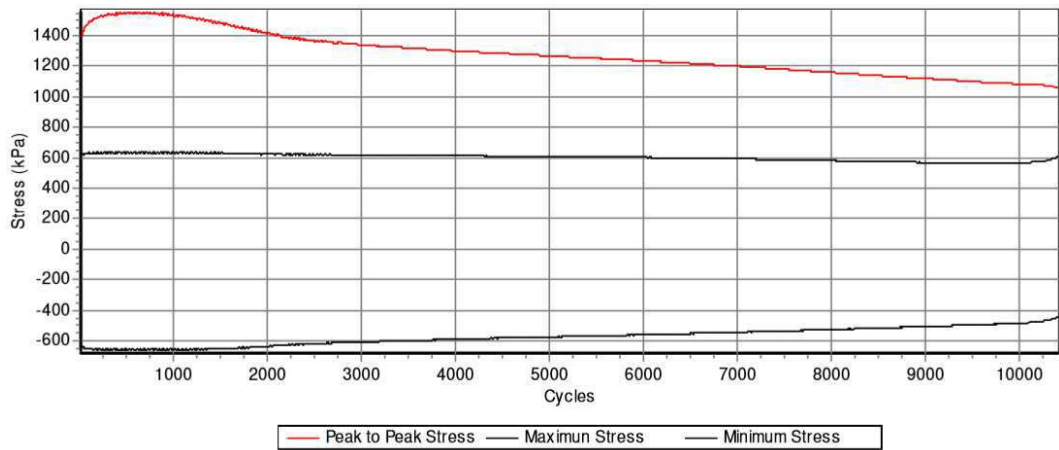


Figura 47: tensões de pico do ensaio de fadiga para deformação constante de $300 \mu\epsilon$

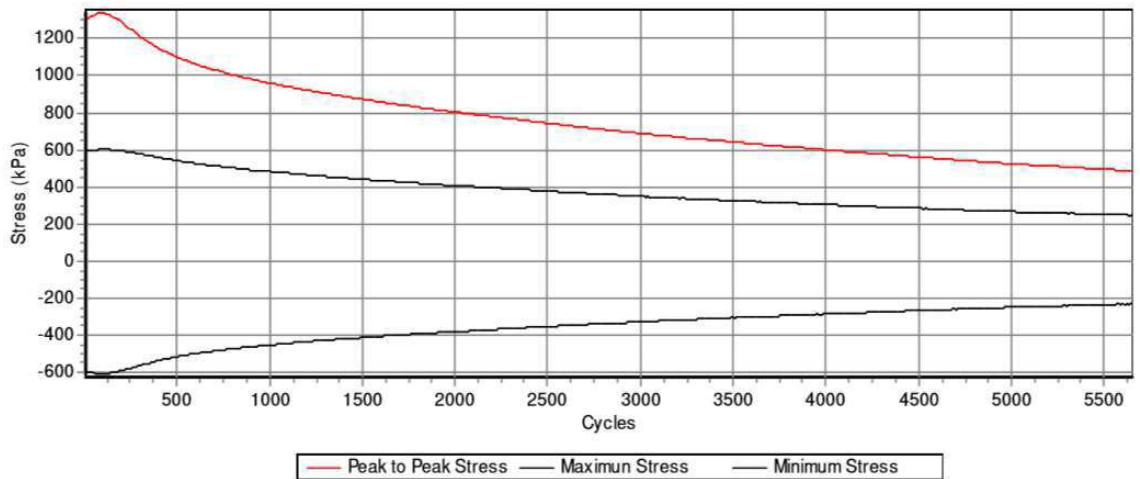


Figura 48: tensões de pico do ensaio de fadiga para deformação constante de $350 \mu\epsilon$

Para a utilização do modelo S-VECD, dois parâmetros principais devem ser obtidos: a pseudo-rigidez (C) também denominada integridade do material, e o dano acumulado (S). A relação desses parâmetros é uma propriedade fundamental. Segundo Boeira (2018) para ensaios executados em determinadas condições (temperatura, deformação, tensão, entre outros) são obtidos parâmetros que se estendem a condições diferentes, diminuindo consideravelmente o tempo para realização dos ensaios em laboratório. Por meio desse modelo podem ser feitas diversas análises, contudo duas devem ser destacadas: a curva de fadiga para condições diferentes da ensaiada e o estudo do comportamento mecânico do pavimento por meio da teoria do dano em meio contínuo viscoelástico.

A curva C em função de S é denominada curva característica do material. Os valores são obtidos por meio de rotina computacional no MATLAB à partir dos parâmetros de módulo complexo e fadiga na tração-compressão. À partir dos valores C e S é possível gerar as curvas de integridade dos materiais em função do acúmulo de dano, essas curvas devem ficar sobrepostas mesmo quando aplicadas deformações diferentes.

As curvas de cada mistura geralmente são obtidas por meio do *fitting* (Schuster, 2018; Boeira, 2018). Nessa pesquisa não foi obtida a curva característica do material, pois o trabalho se deteve a implementar o ensaio de cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Uma vez que não foi obtida a curva característica da mistura asfáltica não foi possível estabelecer comparação entre os diferentes métodos de análise de fadiga, já que cada ensaio foi realizado em condições diferentes.

Segundo Kim (2009) o modelo S-VECD foi desenvolvido para estudos em laboratório com o objetivo de caracterizar o dano em um menor intervalo de tempo. O ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão é utilizado para calibrar o modelo, por ser cíclico torna possível a obtenção de parâmetros de critérios de fadiga. A principal diferença entre a determinação da vida de fadiga por meio do S-VECD e o ensaio tradicional (compressão diametral) é a base teórica mais consistente do primeiro, segundo a mecânica do dano em meio contínuo viscoelástico.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Quanto ao processo metodológico do ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão pode-se concluir que:

- O aparato desenvolvido para o ensaio pode ser considerado adequado para os ensaios de tração-compressão, uma vez que as deformações medidas apresentam concordância, e não houve nenhuma perturbação por falhas no projeto;
- A metodologia de colagem dos corpos de prova aos pratos inferior e superior foi satisfatória. O ensaio foi realizado levando o corpo de prova a romper sem desfazer a ancoragem dos CPs;
- Todos os corpos de prova ensaiados romperam dentro da área de abrangência dos LVDT's, portanto os ensaios foram considerados adequados;
- O sistema de controle de deformação nos corpos de prova funcionou satisfatoriamente, uma vez que depois do processamento dos dados foi verificado que a deformação medida estava de acordo com a pré-determinada para o ensaio;
- O ensaio permitiu satisfatoriamente a identificação da ruptura, por meio da observação das curvas de módulo complexo em função do ângulo de fase, obtendo o número de ciclos por meio do relatório final do ensaio.

Em relação à análise de fadiga:

- No ensaio de fadiga por compressão diametral, à partir da análise das curvas Wöhler foi possível concluir que o fator R^2 próximo de 1 indicou que o modelo apresentou uma menor dispersão dos dados. Por meio do parâmetro n_1 foi possível constatar que a mistura apresenta elevada resistência em tensões elevadas, e em relação ao coeficiente n_2 foi constatado que a mistura apresentou melhor desempenho para o nível médio de tensões. Contudo, é importante destacar que a análise de fadiga em misturas asfálticas apenas por meio das curvas de Wöhler é muito limitada, e pode levar a conclusões equivocadas. Essas curvas são definidas para uma faixa restrita de variáveis, enquanto que em campo se tem uma grande variabilidade de condicionantes;

- Na análise de fadiga por meio do LAS, para a mistura ensaiada foi possível observar que para o nível de 2,5% de deformação o valor de N_f é bem mais elevado, o aumento do nível de deformação faz com que os ciclos até a ruptura reduzam expressivamente. Contudo, deve-se salientar que a análise de fadiga por meio do LAS é para o ligante asfáltico, e pode não apresentar correspondência com o comportamento das misturas asfálticas. Além disso, a análise é feita por meio da rigidez, e a fadiga depende de vários outros fatores;
- O ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial foi realizado com sucesso, permitindo satisfatoriamente a identificação da ruptura e a obtenção do número de ciclos. Nessa pesquisa não foram obtidas as curvas características do dano, contudo por meio do ensaio, por ser cíclico, ao aplicar a metodologia S-VECD é possível obter parâmetros de fadiga;
- Por meio dos estudos realizados pode-se concluir que a grande vantagem do modelo S-VECD é não depender de variáveis que interferem na vida de fadiga, e assim apresenta grande potencial simulando condições reais;
- Uma vez que não foi obtida a curva característica da mistura asfáltica não foi possível estabelecer comparativo entre os diferentes métodos de análise de fadiga.

5.2 Sugestões

Como principais sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Realizar o ensaio cíclico de fadiga à tração-compressão uniaxial comparando misturas dosadas com diferentes faixas granulométricas, além da utilização de ligantes asfálticos modificados para fazer um comparativo;
- Aplicação do modelo S-VECD para obtenção dos parâmetros fundamentais: integridade do material, a pseudo-rigidez (C) e o dano acumulado (S). Por meio desses parâmetros construir as curvas características dos materiais, e assim determinar a vida de fadiga de forma que se entenda a condições diferentes das ensaiadas, sendo portanto mais verossímil.

6 REFERÊNCIAS

ALI, Y. IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. *Materials and Structures*, v. 49, p. 857–868, 2016.

AASHTO **TP 107-14** (R2016). Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

AASHTO **TP 101:2014** Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading) (Withdrawn 2015). Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. Dissertação (mestrado) em Engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BABADOPULOS, L. F. A. L. (2014) **.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, Brasil,

BAHIA, H.U., ZHAI, H., ZENG, M., HU, Y., TURNER, P. (2002) **Development of Binder Specification Parameters Based on Characterization of Damage Behavior**. J. Assn. Asphalt Paving Technologists, vol. 70, 442-470.

BALBO, J. T. Estudo das propriedades Mecânicas das misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirrígidos. Tese de Doutorado- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

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

BERNUCCI, L. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros** – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

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

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

BRENNAN M.J., LOHAN G., GOLDEN J.M., **A laboratory study of the effect of bitumen content, bitumen grade, nominal aggregate grading and temperature on the fatigue performance of dense bitumen macadam**. Proceedings of the IVth International Rilem Symposium, Chapman & Hall, Budapest, p. 358-366, 1990.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. **Indicadores do desempenho de misturas asfálticas através do ensaio de compressão diametral**. Revista Transportes, v. XVI, n. 1, p 36-44, 2008.

CABRAL, A. M. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregado sinterizado de argila modificadas por nanomaterial de multicamadas de grafeno**. Dissertação(mestrado) em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CAPITÃO, S. D. Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade Utilizadas em Portugal. IN: XIII Panamerican Conference of Traffic na Transportation Engineering, 2004.

CARVALHO, J. R. (2018). **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande- PB.

CHRISTENSEN, R. M. (2003). **Theory of Viscoelasticity**. Dover Publications, Inc, 2nd Ed. New York, USA, 364 pg.

CNT, C.N. dos T. (2018). Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial.

COLPO, G. B. (2015). **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre- RS.

COUTINHO, R. P. (2012). **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DANIEL, J. S. & KIM, Y. R. (2002). **Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model**. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT. Colorado – EUA.

DE CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DE MORAES, T. M. R. P. (2018). **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT 148**: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e combustão (vaso aberto Cleveland). Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 131**: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 155**: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 083**: Agregados: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 035**: Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT ME 136**: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT PRO 199**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DNIT PRO 195**: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

DI BENEDETTO, H., DE LA ROCHE, C., BAAJ, H., PRONK, A., LUNDSTRÖM, R. (2004). **Fatigue of Bituminous Mixtures. Materials and Structures**, V. 37, pp. 202-216.

FERNANDES JR, J. L. (1994). **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

GOUVEIA, L. T. De (2002). **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação Superpave**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

HARVEY, J. J., DEACON, J. A., TSAI, B. W., MONISMITH, C. L., **Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California.** Report prepared for California Department Transportation, University of California, Berkeley, 1995.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2018.

DUARTE, E. V. DE N. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado ao ácido polifosfórico.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2018.

HINTZ, C. **Understanding mechanics leading to asphalt binder Fatigue.** Dissertation (Doctorate degree). University of Wisconsin-Madison, 2012.

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

JUNOR TADEU, C. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia/UFRGS. 2008.

JOHNSON, C. M. **Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using na Accelerated Test Method.** PhD Thesis. University of Wisconsin- Madison, Madison, 2010.

KACHANOV, L. M. (1986). **Introduction to Continuum Damage Mechanics.** Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, 133 pg.

KIM, Y. R.; KHOSLA, P. **Effects of Aggregate Type of Gradation on Fatigue na Permanent Deformation of Asphalt Concrete.** In: ASTM 1147, 1992.

LEE, H. J., KIM, Y. R. A. **Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading.** In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 1, pp. 32-40, 1998.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, L. B. (2000). **Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboraty.** In: Asphalt Rubber – The Pavement Material of The 21st Century- Proceedings. Vilamoura, Portugal, pp. 309-318.

LOUREIRO, T. G. (2003). **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LUNDSTRÖM, R. & ISACSSON, U. (2004). **An Investigation of the Applicability of Schapery's Work Potential Model for Characterization of Asphalt Fatigue Behavior.** Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, V. 73.

MAHBOUB, K & Little, D.N., 1988. **Improved Asphalt Concrete Design Procedure.** Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute, USA.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PN, 2017.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. 461f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Doutorado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 3ª edição, 2015.

MELLO, L. G. R. **A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2008.

MENDES, L. O. **Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2011.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. 2015.

MIRANDA, L. P. **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza.**

Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MOCELIN, D. M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico.** Dissertação (mestrado) em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2018.

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

MORAES, T. M. P. DE. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2018.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 165f, 2004.

NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N., NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R., CHACUR, M., MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras.** Submetido ao 21º Encontro de Asfalto do IBP. 2014.

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

PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes.** Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 2013.

PARK, S.W., KIM, Y. R., SCHAPERY, R.A. (1996). **A Viscoelastic Continuum Damage Model and its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete.** Mechanics of Material, V. 24, pp. 241-255.

PAZOS, Abraham Guerrero. **Efeito de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil – Rio de Janeiro, 2015.

PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. & LEITE, L.F.M. **Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidos pelos processos úmido e seco**. XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. Pp.116-129.2003.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

RAAD, L.; SABOUDJIAN, S.;MINASSIAN, G. **Field Aging Effects on Fatigue Asphalt Rubber Concrete**. In: Transportation Research Record, 2001.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do Trincamento por Fadiga**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1991.

RODRIGUES, I A. **Análise do dano em mistura de agregados finos (MAF)**. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2018.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

SALES, P de M. **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do ccbt**. Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das Influências do Tipo de Ligante e do Volume de Vazios na Vida de Fadiga de Algumas Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influências de ligante e volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação (mestrado) de Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SCHAPERLY, R. A. **A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure**. J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, pp. 215-253, 1990.

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

SOARES, J. P. et al. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Variação de Granulometria e de CAP**. In: 15º Encontro de Asfalto, IBP, 2000.

SPECHT, L.P., 2004. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

TAYEBALI, A. A. **Modeling Fatigue Responses of Asphalt Aggregate Mixtures**. Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists, V-62, p.385-421, USA, 1993.

TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation. **Binder Expert Task Group Meeting**, 2014.

TEIXEIRA, V.F., SOUSA, F.V., SOARES, J.B. (2007) **Modelagem da Vida de Fadiga e do Acúmulo de Deformações Permanentes em Pavimentos Asfálticos por Meio de um Modelo de Dano Contínuo**. Revista Transportes. vol. 15 (2), 17-25.

TINAJEROS, R. A. P. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente convencional e modificada com polímero**. Dissertação (mestrado) de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

TONIAL, I. A. et al. **Características de Fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros**. IN: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, SC, 2001.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete**. In: 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI N. M. (2010). **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model**. International Journal of Pavement Engineering, 11:6, 459-476, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430903398088> 2010.

SHAN, L., TAN, Y., UNDERWOOD, B., & KIM, Y. **Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2207, 89–98. <https://doi.org/10.3141/2207-12>, 2011.

UNDERWOOD, B., BAEK, C., & KIM, Y. R. (2012). **Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2296, 36–45. <https://doi.org/10.3141/229604> .

UGE, P., & van de Loo. P.J., 1974. **Permanent Deformation of Asphalt Mixes, Koninklijke/Shell-** Laboratorium, Amsterdam, Netherlands.

VALE, A.C. **Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2007.